

Appunti di Logica e Algebra 2

Pietro Pizzoccheri

2024

Indice

1	Introduzione	2
1.1	Insiemi	2
1.1.1	Operazioni tra insiemi	2
1.2	Funzioni	2
1.2.1	Composizione di funzioni	3
1.2.2	Operazioni su insiemi	3
1.3	Monoidi e Gruppi	4
1.4	Morfismi	5
1.5	Relazioni	8
1.5.1	Insieme quoziente per gruppi abeliani	9

1 Introduzione

1.1 Insiemi

Un insieme è una collezione di oggetti, detti elementi dell'insieme.

$\mathbb{N} := \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ insieme dei numeri naturali

$\mathbb{Z} := \{\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots\}$ insieme degli interi

$\mathbb{Q} := \left\{ \frac{a}{b} \mid a, b \in \mathbb{Z}, b \neq 0 \right\}$ insieme dei numeri razionali

$\mathbb{R} :=$ insieme dei numeri reali

$\mathbb{C} :=$ insieme dei numeri complessi

1.1.1 Operazioni tra insiemi

\subseteq inclusione tra insiemi

\subsetneq inclusione propria tra insiemi

$X \subseteq Y$ si legge "X è sottoinsieme di Y" o "X è incluso in Y"

Se X è un insieme finito, indico con $|X|$ il numero di elementi di X , detto anche la **cardinalità di X** .

\emptyset : Insieme vuoto e $|\emptyset| = 0$

Siano X e Y due insiemi. L'insieme $X \times Y := \{(x, y) : x \in X, y \in Y\}$ lo chiamiamo **prodotto cartesiano** di X e Y .

Sia $A \in \mathcal{P}(X)$, dove $\mathcal{P}(X) := \{A : A \subseteq X\}$ è detto **Insieme delle parti di X** . L'insieme $A^c := X \setminus A$ è detto **complementare** di A .

1.2 Funzioni

Siano X e Y due insiemi. **Una funzione f da X a Y** è un sottoinsieme $F \subseteq X \times Y$ tale che:

- $(x, y_1) \in F, (x, y_2) \in F \implies y_1 = y_2, \forall x \in X, y_1, y_2 \in Y$.
- $x \in X \implies \exists y \in Y$ tale che $(x, y) \in F$

Una funzione $F \subseteq X \times Y$ la indichiamo con $f : X \rightarrow Y$. E scriviamo $f(x) = y$ se $(x, y) \in F$.

Definizione: La funzione $Id_x : X \rightarrow X$ tale che $Id_x(x) = x, \forall x \in X$ la chiamiamo **funzione identità su X**

Definizione: Una funzione $f : X \rightarrow Y$ è **iniettiva** se $\forall x_1, x_2 \in X, f(x_1) = f(x_2) \implies x_1 = x_2$

Definizione: Una funzione $f : X \rightarrow Y$ è **suriettiva** se $Im(f) = Y$, dove $Im(f) = \{y \in Y : \exists x \in X \text{ tale che } f(x) = y\}$ è detta **immagine di f**

Definizione: Una funzione $f : X \rightarrow Y$ è **biunivoca** se è sia iniettiva che suriettiva.

1.2.1 Composizione di funzioni

Siano $f : X \rightarrow Y$ e $g : Y \rightarrow Z$ due funzioni. La **composizione di f e g** è la funzione $g \circ f : X \rightarrow Z$ tale che $(g \circ f)(x) = g(f(x))$, $\forall x \in X$.

Definizione: una funzione $f : X \rightarrow Y$ è detta **invertibile** se esiste una funzione $g : Y \rightarrow X$ tale che

- $g \circ f = Id_X$
- $f \circ g = Id_Y$

la funzione g è detta **funzione inversa di f** e la indichiamo con f^{-1} .

Una funzione $f : X \rightarrow Y$ è invertibile se e solo se è biunivoca.

1.2.2 Operazioni su insiemi

Definizione: Una funzione $f : X \times X \rightarrow X$ è detta **operazione su X** . Invece di $f(x, y)$ scriveremo $x \cdot y$.

Definizione: Un'operazione \cdot su X è detta **associativa** se $(x \cdot y) \cdot z = x \cdot (y \cdot z)$, $\forall x, y, z \in X$.

Definizione: Un'operazione \cdot su X è detta **commutativa** se $x \cdot y = y \cdot x$, $\forall x, y \in X$.

Esempio:

- $\mathcal{P}(X)$ con l'operazione di unione \cup è associativa e commutativa, così come lo è con l'intersezione \cap .
- $A \setminus B := A \cap B^C$ (**differenza insiemistica**) è un'operazione su $\mathcal{P}(X)$.
non è associativa: sia $A \neq \emptyset$. Allora $A \setminus (A \setminus A) = A \neq (A \setminus A) \setminus A = \emptyset$
non è commutativa: $A \setminus \emptyset = A \neq \emptyset \setminus A = \emptyset$, se $A \neq \emptyset$
- $A \Delta B := (A \setminus B) \cup (B \setminus A)$ (**differenza simmetrica**) è un'operazione su $\mathcal{P}(X)$.
è commutativa e anche associativa, facilmente verificabile coi diagrammi di Venn.
- Sia $F(X) := \{f : X \rightarrow X\}$.
La composizione " \circ " è un'operazione su $F(X)$.
è associativa, ma non è commutativa.
- $a \circ b = \frac{a+b}{2}$ è un'operazione commutativa su \mathbb{Q} , ma non associativa.

Definizione: Sia \cdot un'operazione su X . Un elemento $e \in X$ tale che $e \cdot x = x \cdot e = x$, $\forall x \in X$ è detto **elemento neutro o identità**.

L'identità è unica; se $e, e' \in X$ sono due identità, allora $e = e \cdot e' = e'$.

1.3 Monoidi e Gruppi

Definizione: Un insieme X con un'operazione associativa e un'identità è detto **monoide**.

Esempio:

- $\mathbb{N}, \mathbb{Z}, \mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$ con l'addizione e identità 0 sono monoidi.
- $\mathbb{N}, \mathbb{Z}, \mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$ con la moltiplicazione e identità 1 sono monoidi.
- $\mathcal{P}(X)$ con \cup e come identità l'insieme X è un monoide.
- $\mathcal{P}(X)$ con \cap e come identità l'insieme vuoto è un monoide.
- $F(X) := \{f : X \rightarrow X\}$ con la composizione " \circ " e come identità la funzione identità (Id_X) è un monoide.

Definizione: Sia X un monoide. Un elemento $x \in X$ è detto **invertibile** se esiste $y \in X$ tale che $x \cdot y = y \cdot x = e$, dove e è l'identità di X . L'elemento y è detto **inverso** di x .

Se $x \in X$ è invertibile, il suo inverso è unico e lo indichiamo con x^{-1} .
L'identità del monoide è invertibile e il suo inverso è l'identità stessa.

Esempio:

- L'insieme degli elementi invertibili di $(\mathbb{N}, +)$ è $\{0\}$.
- L'insieme degli elementi invertibili di $(\mathbb{Z}, +)$ è \mathbb{Z} , di $(\mathbb{Q}, +)$ è \mathbb{Q} , di $(\mathbb{R}, +)$ è \mathbb{R} , di $(\mathbb{C}, +)$ è \mathbb{C} .
- L'insieme degli elementi invertibili di (\mathbb{N}, \cdot) è $\{1\}$, di (\mathbb{Z}, \cdot) è $\{1, -1\}$, di (\mathbb{Q}, \cdot) è $\mathbb{Q} \setminus \{0\}$, di (\mathbb{R}, \cdot) è $\mathbb{R} \setminus \{0\}$, di (\mathbb{C}, \cdot) è $\mathbb{C} \setminus \{0\}$.
- L'insieme degli elementi invertibili di $F(X) = \{f : X \rightarrow X\}$ è l'insieme delle funzioni invertibili.

Definizione: Un monoide X è detto **gruppo** se ogni suo elemento è invertibile. Se l'operazione è commutativa, il gruppo è detto **gruppo abeliano**.

Esempio:

- $(\mathcal{P}(x), \Delta)$ è un gruppo abeliano. L'identità è l'insieme vuoto e l'inverso di $A \in \mathcal{P}(x)$ è A stesso. ($A^2 = \emptyset, \forall A \subseteq X$)
- $(\mathbb{Z}, +), (\mathbb{Q}, +), (\mathbb{R}, +), (\mathbb{C}, +)$ sono gruppi abeliani
- $(\mathbb{Q} \setminus \{0\}, \cdot), (\mathbb{R} \setminus \{0\}, \cdot), (\mathbb{C} \setminus \{0\}, \cdot)$ sono gruppi abeliani
- sia $X = \{1, 2, \dots, n\}$ l'insieme delle funzioni invertibili $f : X \rightarrow X$ è il **Gruppo delle permutazioni di n elementi (o gruppo simmetrico)**. Lo indiciamo con S_n . $|S_n| = n!$. Non è abeliano se $n \geq 3$.

Definizione: Sia X un monoide con identità e . Un sottoinsieme $Y \subseteq X$ tale che $e \in Y$ e Y è chiuso rispetto all'operazione di X è detto **sottomonide di X** . Analogamente definiamo la nozione di **sottogruppo di X** . il gruppo $\{e\}$ è detto **sottogruppo banale di X** .

Esempio:

- Con l'addizione, $\{0\}$ è un sottomonoido di \mathbb{N} . $\{0\}$ è anche sottogruppo banale.
- Con la moltiplicazione abbiamo la catena di sottomonoidi $\{1\} \subseteq \mathbb{N} \subseteq \mathbb{Z} \subseteq \mathbb{Q} \subseteq \mathbb{R} \subseteq \mathbb{C}$ e di sottogruppi $\{1\} \subseteq \mathbb{Q} \setminus \{0\} \subseteq \mathbb{R} \setminus \{0\} \subseteq \mathbb{C} \setminus \{0\}$
- con l'addizione abbiamo la catena di sottogruppi $\{0\} \subseteq \mathbb{Z} \subseteq \mathbb{Q} \subseteq \mathbb{R} \subseteq \mathbb{C}$

Definizione: Sia X un monoide e $S \subseteq X$ un sottoinsieme. L'insieme $\langle S \rangle := \{x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n : n \in \mathbb{N}, x_1, x_2, \dots, x_n \in S\}$ è detto **sottomonoido generato da S** (intersezione di tutti i sottomonoidi di X che contengono S). Se X è un gruppo, $\langle S \rangle$ è detto **sottogruppo generato da S** .

Esempio:

- $S = \{1\} \subseteq (\mathbb{N}, +)$. Allora $\langle S \rangle = \{0, 1, 2, \dots\} = \mathbb{N}$
- sia $S := \{p \in \mathbb{N} : p \text{ è primo}\} \cup \{0\} \subseteq (\mathbb{N}, \cdot)$. allora $\langle S \rangle = \mathbb{N}$
- $S = \{0, 1\} \subseteq (\mathbb{N}, \cdot)$. Allora $\langle S \rangle = \{0, 1\}$
- sia $S = \{1\} \subseteq (\mathbb{Z}, +)$. il sottogruppo generato da S è $\langle S \rangle = \mathbb{Z}$
- uno spazio vettoriale V è un gruppo abeliano se consideriamo l'operazione di addizione fra vettori. Prendiamo $V = \mathbb{R}^2 = \mathbb{R} \times \mathbb{R}$. Sia $v = (1, 1) \in \mathbb{R}^2$. Il sottogruppo $\langle \{v\} \rangle = \{(n, n) : n \in \mathbb{Z}\}$ è un sottogruppo proprio del sottospazio generato da $\{v\}$. Sia $v_1 = (1, 0)$ ed $v_2 = (0, 1)$, allora il sottogruppo $\langle \{v_1, v_2\} \rangle$ è $\mathbb{Z} \times \mathbb{Z} \subseteq \mathbb{R} \times \mathbb{R}$

Definizione: Siano M_1, M_2 con identità e_1, e_2 rispettivamente. Si definisce prodotto diretto di M_1 e M_2 l'insieme $M_1 \times M_2$ con l'operazione $(m_1, m_2) \cdot (m'_1, m'_2) = (m_1 \cdot m'_1, m_2 \cdot m'_2)$ e identità (e_1, e_2) . Analogamente si definisce prodotto diretto di gruppi G_1, G_2 .

L'inverso di una coppia $(a, b) \in G_1 \times G_2$ è (a^{-1}, b^{-1}) .

1.4 Morfismi

Definizione: Siano M_1, M_2 monoidi con identità e_1, e_2 . Una funzione $f : M_1 \rightarrow M_2$ è un **morfismo di monoidi se**:

- $f(e_1) = e_2$
- $f(xy) = f(x)f(y)$

Definizione: Siano G_1, G_2 gruppi con identità e_1, e_2 . Una funzione $f : G_1 \rightarrow G_2$ è un **morfismo di gruppi se**:

- $f(e_1) = e_2$
- $f(xy) = f(x)f(y)$

Definizione: Il **nucleo** di un morfismo di monoidi $f : M_1 \rightarrow M_2$ è il sottomonoido di M_1 definito come: $\text{Ker}(f) := \{x \in M_1 : f(x) = e_2\}$

Definizione: Il nucleo di un morfismo di gruppi $f : G_1 \rightarrow G_2$ è il sottogruppo di G_1 definito come: $\text{Ker}(f) := \{x \in G_1 : f(x) = e_2\}$. **Il nucleo è un sottogruppo di G_1 .** e $\text{Im}(f)$ è un sottogruppo di G_2 .

Definizione: Un **isomorfismo di monoidi (e di gruppi)** è un morfismo biunivoco, tale che la funzione inversa sia un morfismo.

Proposizione: Sia $f : M_1 \rightarrow M_2$ un morfismo di monoidi. Se f è biunivoco, allora è un isomorfismo. Questo vale anche per i gruppi.

Dimostrazione: Dobbiamo far vedere che la funzione inversa $f^{-1} : M_2 \rightarrow M_1$ è un morfismo di monoidi. Poiché $f(e_1) = e_2$, allora $f^{-1}(e_2) = e_1$. Siano $x_2, y_2 \in M_2$, allora esistono $x_1, y_1 \in M_1$ tali che $f(x_1) = x_2, f(y_1) = y_2$. Quindi $f^{-1}(f(x_1)f(y_1)) = f^{-1}(f(x_1y_1)) = x_1y_1 = f^{-1}(x_2)f^{-1}(y_2)$

Esempio:

- Siano $M_1 = (\mathcal{P}(X), \cup)$ e $M_2 = (\mathcal{P}(X), \cup)$, dove X è un insieme. Sia $f : M_1 \rightarrow M_2$ definita ponendo $f(A) = A^C, \forall A \subseteq X$. la funzione f è biunivoca. Inoltre, dalle formule di De Morgan segue che $f(A \cap B) = (A \cap B)^C = A^C \cup B^C = f(A) \cup f(B)$. Quindi f è un isomorfismo di monoidi, poiché $f(X) = X^C = \emptyset$, essendo X l'identità di M_1 e \emptyset l'identità di M_2 .
- Sia $\mathbb{Z}_2 := \{0, 1\}$ con l'operazione definita come: $0+0=0, 0+1=1+0=1, 1+1=0$. Sia $X := \{1, 2, \dots, n\}, n \in \mathbb{N}$. La funzione $f : \mathcal{P}(X) \rightarrow \mathbb{Z}_2 \times \dots \times \mathbb{Z}_2$ (n volte) definita da: $f(A) = (a_1, a_2, \dots, a_n)$, dove $a_i = 1$ se $i \in A$ e $a_i = 0$ se $i \notin A$.
è un isomorfismo del gruppo $(\mathcal{P}(X), \Delta)$ con il gruppo $\mathcal{P}(X) \rightarrow \mathbb{Z}_2 \times \dots \times \mathbb{Z}_2 = (\mathbb{Z}_2)^n$

Vediamo ora come ogni monoide finito è isomorfo a un monoide di matrici quadrate, dove l'operazione è il prodotto righe per colonne.

Sia $M = \{x_1, \dots, x_n\}$ un monoide, $|M| = n \in \mathbb{N}$, con identità $e = x_1$. Pero ogni $x \in M$ definiamo una matrice $A(x) \in \text{Mat}_{n \times n}(\mathbb{Z})$ nel seguente modo: $A(x)_{ij} = 1$ se $x_i \cdot x = x_j$ e $A(x)_{ij} = 0$ altrimenti. La funzione $F : M \rightarrow \text{Mat}_{n \times n}(\mathbb{Z})$ ($x \mapsto A(x)$) è iniettiva.

Infatti, se $A(x) = A(y)$, allora $A(x)_{i1} = A(y)_{i1}, \forall i \in \{1, \dots, n\}$.

Quindi se $A(x)_{i1} = A(y)_{i1} = 1$, allora $xx_1 = xe = x = yx_1 = y$.

Risulta inoltre facile vedere che $A(xy) = A(x)A(y)$ (prodotto righe per colonne), ossia che F è un morfismo di monoidi ($\text{Mat}_{n \times n}(\mathbb{Z})$ è un monoide con l'operazione di prodotto righe per colonne, la cui identità è la matrice I_n).

Quindi $F : M \rightarrow \text{Im}(F)$ è un isomorfismo di monoidi.

Esempio: Sia $M = (\mathbb{Z}_2, \cdot)$ il monoide definito da:

\cdot	0	1
0	0	0
1	0	1

costruiamo un sottomonoide di $Mat_{4 \times 4}(\mathbb{Z})$ isomorfo a $M \times M = \{(0, 0), (0, 1), (1, 0), (1, 1)\}$.

$$(0, 0) \mapsto \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, (0, 1) \mapsto \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, (1, 0) \mapsto \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, (1, 1) \mapsto \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

\cdot	(0, 0)	(0, 1)	(1, 0)	(1, 1)
(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)	(0, 0)
(0, 1)	(0, 0)	(0, 1)	(0, 0)	(0, 1)
(1, 0)	(0, 0)	(0, 0)	(1, 0)	(1, 0)
(1, 1)	(0, 0)	(0, 1)	(1, 0)	(1, 1)

Si può verificare direttamente che le matrici hanno la stessa tabella moltiplicativa. (fine esempio)

Abbiamo quindi visto che un monoide finito di cardinalità n è isomorfo a un monoide di matrici $n \times n$ le cui colonne hanno un unico "1" e altrove sono "0".

Ognuna di queste matrici può essere vista come una funzione da $X = \{1, \dots, n\}$ in X :

$$A_{ij} = 1 \Leftrightarrow f(j) = i$$

$$A_{ij} = 0 \Leftrightarrow f(j) \neq i$$

Il prodotto righe per colonne corrisponde alla composizione di funzioni.

Quindi un monoide finito di cardinalità n è isomorfo a un sottomonoide del monoide delle funzioni f da $\{1, \dots, n\}$ in $\{1, \dots, n\}$ con l'operazione di composizione.

Notiamo che un elemento $x \in M$ di un monoide finito M è invertibile se e solo se la matrice associata è invertibile (una matrice $A \in Mat_{n \times n}(\mathbb{Z})$ è invertibile se e solo se il suo determinante è invertibile su \mathbb{Z} , ossia se e solo se $\det(a) \in \{-1, 1\}$).

Da ciò segue che un gruppo finito G di cardinalità $|G| = n$, è isomorfo a un gruppo di matrici le cui componenti sono "0" e "1" e che hanno un unico "1" in ogni riga e ogni colonna (matrici di permutazioni).

Il gruppo G è inoltre isomorfo a un sottogruppo del gruppo delle funzioni biunivoche da $\{1, \dots, n\}$ in $\{1, \dots, n\}$, che abbiamo chiamato **gruppo simmetrico** S_n .

Gli elementi di S_n in notazione a una linea sono indicati nel modo seguente: sia $\sigma \in S_n$ una funzione biunivoca da $\{1, \dots, n\}$ in $\{1, \dots, n\}$, allora σ è indicata come $\sigma(1)\sigma(2) \dots \sigma(n)$.

Teorema (Teorema di Cayley): Ogni sottogruppo finito di cardinalità $n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$ è isomorfo a un sottogruppo di S_n

Esempio:

- $S_2 = \{12, 21\}$
 $S_3 = \{123, 132, 213, 231, 312, 321\}$
- vediamo il gruppo $(\mathbb{Z}_2, +)$ come gruppo di matrici e come gruppo di permutazioni.
 $(\mathbb{Z}_2, +) \simeq \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \right\} \simeq \{12, 21\} = S_2 \text{ (} \simeq \text{isomorfismodi gruppi)}$

1.5 Relazioni

Definizione: Sia X un insieme. Un sottoinsieme $R \subseteq X \times X$ è detto **relazione su X** .

Definizione: Una relazione $R \subseteq X \times X$ è detta **relazione di equivalenza** se soddisfa le seguenti proprietà:

- **riflessità:** $(x, x) \in R, \forall x \in X$
- **simmetria:** $(x, y) \in R \implies (y, x) \in R, \forall x, y \in X$
- **transitività:** $(x, y) \in R \text{ e } (y, z) \in R \implies (x, z) \in R, \forall x, y, z \in X$

Se R è una relazione di equivalenza su X e $(x, y) \in R$, scriviamo $x \sim y$, che si legge "x è equivalente a y".

Definizione: Sia X un insieme e $R \subseteq X \times X$ una relazione di equivalenza su X . L'insieme $[x]_R := \{y \in X : x \sim y\}$ è detto **classe di equivalenza di x rispetto a R** .

Definizione: L'insieme $X/\sim := \{[x] : x \in X\}$ è detto **insieme quoziente**.

Definizione: La funzione $\pi : X \rightarrow X/\sim, x \mapsto [x]$ è detta **proiezione canonica**.

Definizione: Siano $x, y \in X$. Allora se $x \sim y$ abbiamo che $[x] = [y]$. Se $x \not\sim y$ abbiamo che $[x] \cap [y] = \emptyset$. Quindi $X = \bigsqcup_{[x] \in X/\sim} [x]$, ossia X/\sim è una partizione di X .

Esempio:

- L'uguaglianza " $=$ " è una relazione di equivalenza su ogni insieme X .
- Sia $X = \{1, 2, \dots, n\}$. Definiamo su $\mathcal{P}(X)$ la seguente relazione: $A \sim B \Leftrightarrow |A| = |B|, \forall A, B \subseteq X$. Questa è una relazione di equivalenza e $\mathcal{P}(X)/\sim \equiv \{0, 1, \dots, n\}$. Se $A \subseteq X$ è tale che $|A| = k \leq n$ allora $[A] = \binom{n}{k} := \frac{n!}{k!(n-k)!}$
- Sia G un gruppo e $H \subseteq G$ un sottogruppo. La relazione \sim su G definita da $g_1 \sim g_2 \Leftrightarrow g_1 = g_2 h$ per qualche $h \in H$ è una relazione di equivalenza.

- $g \sim g : g \cdot e, \forall g \in G, e \in H$
- $g_1 \sim g_2 \rightarrow g_2 \sim g_1 : g_1 = g_2 h \rightarrow g_1 h^{-1} = g_2 \text{ (} h^{-1} \in H \text{)}$
- $g_1 \sim g_2, g_2 \sim g_3 \rightarrow g_1 \sim g_3 : g_1 = g_2 h, g_2 = g_3 h' \rightarrow g_1 = g_3 h h' = g_3 h'', \forall g_1, g_2, g_3 \in G$

In questo caso l'insieme quoziente lo indichiamo con G/H .

Definizione: Il numero $\binom{n}{k}$ è chiamato **coefficiente binomiale**, questo perché $(x + y)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^k y^{n-k}, \forall x, y \in \mathbb{C}$

1.5.1 Insieme quoziente per gruppi abeliani

Se G è un gruppo abeliano, possiamo definire la seguente operazione "+" su G/H : $[g_1] + [g_2] := [g_1 + g_2]$, vediamo che è ben definita: se $g'_1 = g_1 + h_1$ e $g'_2 = g_2 + h_2$, allora $[g'_1] = [g_1]$, $[g'_2] = [g_2]$ e $g'_1 + g'_2 = g_1 + h_1 + g_2 + h_2 = g_1 + g_2 + h$, dove $h = h_1 + h_2 \in H$. Quindi $[g'_1 + g'_2] = [g_1 + g_2]$. L'operazione è ovviamente associativa e commutativa, perché lo è quella su G . Inoltre $[g] + [0] = [g]$, $\forall [g] \in G/H$ dove con "0" abbiamo indicato l'identità di G . Quindi la classe $[0]$ dell'identità di $(G/H, +)$. Infine $[g] + [-g] = [g - g] = [0]$, dove con $-g$ abbiamo indicato l'inverso di g in G . Quindi $-[g] = [-g]$, $\forall [g] \in G/H$, ossia $(G/H, +)$ è un gruppo abeliano.

Esempio:

- Se $H = \{0\} \subseteq G$, allora G/H è isomorfo a G . ($\{0\}$ gruppo banale e G gruppo abeliano)
- Sia $G = (\mathbb{Z}, +)$ e $n \in \mathbb{N}$. Il sottoinsieme $n\mathbb{Z} = \{nz : z \in \mathbb{Z}\}$ è un sottogruppo di \mathbb{Z} .

- $0\mathbb{Z} = \{0\}$
- $1\mathbb{Z} = \{\mathbb{Z}\}$
- $2\mathbb{Z} = \{\dots, -4, -2, 0, 2, 4, \dots\}$
- $3\mathbb{Z} = \{\dots, -6, -3, 0, 3, 6, \dots\}$

Definiamo il gruppo abeliano $\mathbb{Z}_n := \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$, per $\mathbb{Z}_0 = \mathbb{Z}/0\mathbb{Z} = \mathbb{Z}/\{0\} = \mathbb{Z}$.

Sia $n \geq 0$ e siano $x, y \in \mathbb{Z}$.

- Allora $x \sim y \Leftrightarrow x = y + h \ (h \in n\mathbb{Z}) \Leftrightarrow x - y = kn \text{ (per } k \in \mathbb{Z}) \Leftrightarrow$
il resto della divisione di x per n è uguale al resto della divisione di y per n .

I possibili resti della divisione per n sono $0, 1, \dots, n-1$.

Quindi $\mathbb{Z}_n = \{[0], [1], \dots, [n-1]\} = \{\bar{0}, \bar{1}, \dots, \overline{n-1}\}$. ($\{[0], [1], \dots, [n-1]\}$ sono le classi di resto)

- $\mathbb{Z}_2 = \{\bar{0}, \bar{1}\}$, $\bar{1} + \bar{1} = [1 + 1] = [2] = [0]$

+	$\bar{0}$	$\bar{1}$
$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{1}$
$\bar{1}$	$\bar{1}$	$\bar{0}$

- $\mathbb{Z}_3 = \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}\}$,

+	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$
$\bar{0}$	$\bar{0}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$
$\bar{1}$	$\bar{1}$	$\bar{2}$	$\bar{0}$
$\bar{2}$	$\bar{2}$	$\bar{0}$	$\bar{1}$

Definizione: Sia G un gruppo abeliano e $H \subseteq G$ un sottogruppo. La proiezione canonica $\pi : G \rightarrow G/H$ è un **morfismo suriettivo di gruppi**

Se G è un gruppo finito e $H \subseteq G$ è un sottogruppo, allora $[g] \in G/H \rightarrow |[g]| = |H|$.
 Infatti $[g] = \{gh : h \in H\}$ e $gh_1 = gh_2 \rightarrow h_1 = h_2$.
 Poiché le classi di equivalenza sono una partizione di G , abbiamo $|G| = |G/H| \cdot |H|$.
 In particolare la cardinalità o (**ordine**) di un sottogruppo di un gruppo finito divide la cardinalità del gruppo.

Teorema: Sia $f : G_1 \rightarrow G_2$ un morfismo di gruppi. Allora f è iniettivo se e solo se $\text{Ker}(f) = \{e_1\}$.
 (Questo non vale per i morfismi di monoidi.)

Dimostrazione: Sia f iniettivo. Sia $x \in \text{Ker}(f)$. Allora $f(x) = e_2$ e quindi, poiché anche $f(e_1) = e_2$, si ha che $x = e_1$ per l'ipotesi di iniettività.
 Sia $\text{Ker}(f) = \{e_1\}$. Siano $x, y \in G_1$ tali che $f(x) = f(y)$.
 Allora $f(x)f(y^{-1}) = e_2 \rightarrow f(xy^{-1}) = e_2 \rightarrow xy^{-1} \in \text{Ker}(f) \rightarrow xy^{-1} = e_1 \rightarrow x = y$.

Esempio:

- $G = \mathbb{Z}_4 = \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}, \bar{3}\}$,
 - $\langle \bar{0} \rangle = \bar{0}$ sottogruppo banale $\simeq \mathbb{Z}_1$
 - $\langle \bar{1} \rangle = \mathbb{Z}_4$
 - $\langle \bar{2} \rangle = \{\bar{0}, \bar{2}\} \simeq \mathbb{Z}_2$ ($2 + 2 = 0$)
 - $\langle \bar{3} \rangle = \mathbb{Z}_4$ ($3, 3 + 3 = 6 = 2, 3 + 2 = 5 = 1, 3 + 1 = 4 = 0$)

I sottogruppi di \mathbb{Z}_4 possono aver cardinalità 1, 2, 4. L'insieme dei sottogruppi di \mathbb{Z}_4 è $\{\{\bar{0}\}, \{\bar{0}, \bar{2}\}, \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}, \bar{3}\} = \mathbb{Z}_4\}$

- $G = \mathbb{Z}_6 = \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}, \bar{3}, \bar{4}, \bar{5}\}$,
 - $\langle \bar{0} \rangle = \bar{0}$ sottogruppo banale $\simeq \mathbb{Z}_1$
 - $\langle \bar{1} \rangle = \mathbb{Z}_6$
 - $\langle \bar{2} \rangle = \{\bar{0}, \bar{2}, \bar{4}\} \simeq \mathbb{Z}_3$
 - $\langle \bar{3} \rangle = \{\bar{0}, \bar{3}\} \simeq \mathbb{Z}_2$
 - $\langle \bar{4} \rangle = \{\bar{0}, \bar{2}, \bar{4}\} \simeq \mathbb{Z}_3$
 - $\langle \bar{5} \rangle = \mathbb{Z}_6$

I sottogruppi di \mathbb{Z}_6 possono aver cardinalità 1, 2, 3, 6. L'insieme dei sottogruppi di \mathbb{Z}_6 è $\{\{\bar{0}\}, \{\bar{0}, \bar{2}, \bar{4}\}, \{\bar{0}, \bar{3}\}, \{\bar{0}, \bar{1}, \bar{2}, \bar{3}, \bar{4}, \bar{5}\} = \mathbb{Z}_6\}$

Caso generale: consideriamo il gruppo $\mathbb{Z}_n = (\{\bar{0}, \bar{1}, \dots, \overline{n-1}\}, +)$ sia $m \in \mathbb{N}, m < n$.

Se $m = 0$, $\langle \bar{0} \rangle = \{\bar{0}\}$.

Sia $m > 0$ e $z := \frac{\text{mcm}\{m, n\}}{m}$. (mcm = minimo comune multiplo)

$$\bar{m} + \bar{m} + \dots = \bar{m} = \overline{zm} = \overline{\text{mcm}\{m, n\}} = \bar{0}$$

Se $i \leq i \leq z$: $im < zm = \text{mcm}\{m, n\} \rightarrow n$ non divide im .

$\bar{m} + \bar{m} + \dots = \bar{m} = \overline{im} \neq \bar{0}$ perché im è multiplo di m e $im < \text{mcm}\{m, n\}$, quindi im non è multiplo di n . Dunque $|\langle \bar{m} \rangle| = z = \frac{\text{mcm}\{m, n\}}{m}$.

In particolare, $\langle \bar{m} \rangle = \mathbb{Z}_n \Leftrightarrow z = n \Leftrightarrow \text{MCD}\{m, n\} = 1$. Ossia l'insieme $\{\bar{m}\}$ genera il gruppo \mathbb{Z}_n sse m e n sono coprimi.

Definizione: La funzione definita da $\varphi : \mathbb{N} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{N} \setminus \{0\}$,
 $\varphi(n) := |\{m \in \mathbb{N} \setminus \{0\} : m < n \text{ e } \text{MCD}\{m, n\} = 1\}|$ è detta **funzione di Eulero**.
 Quindi ci sono $\varphi(n)$ elementi \overline{m} tali che $\langle \overline{m} \rangle = \mathbb{Z}_n$.

Proposizione: L'insieme dei sottogruppi di $(\mathbb{Z}, +)$ è $\{n\mathbb{Z} : n \in \mathbb{N}\}$.

Dimostrazione: Sia $H \subseteq \mathbb{Z}$ un sottogruppo non banale.
 Sia $k := \min(H_{>0})$ dove $H_{>0} := \{h \in H : h > 0\}$.
 Sia $h \in H_{>0}, h \neq k$.
 Allora $h > k$ e $h = nk + r, n \in \mathbb{N}, 0 \leq r < k$.
 Dunque $r = h - nk \in H \rightarrow r = 0$ per la minimalità di k .

Definizione: Un gruppo G è detto **ciclico** se esiste $g \in G$ tale che $\langle g \rangle = G$.
 Un gruppo ciclico è anche abeliano

Esempio:

- $\mathbb{Z} = \langle 1 \rangle$ è ciclico
- $\mathbb{Z}_n = \langle \overline{1} \rangle$ è ciclico
- $\mathbb{Z} \times \mathbb{Z} = \langle (1, 0), (0, 1) \rangle$ non è ciclico, infatti in $\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$, se $(a, b) \in \mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$, $\langle (a, b) \rangle = \{(ka, kb) : k \in \mathbb{Z}\} = \{(x, y) : a \text{ divide } x, b \text{ divide } y\} \subsetneq \mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$.
- $\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2$ non è ciclico. Infatti, in $\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2$ si ha:
 - $\langle (\overline{0}, \overline{0}) \rangle = \{(\overline{0}, \overline{0})\}$
 - $\langle (\overline{0}, \overline{1}) \rangle = \{\overline{0}\} \times \mathbb{Z}_2$
 - $\langle (\overline{1}, \overline{0}) \rangle = \mathbb{Z}_2 \times \{\overline{0}\}$
 - $\langle (\overline{1}, \overline{1}) \rangle = \{(\overline{0}, \overline{0}), (\overline{1}, \overline{1})\}$

Quindi nessun elemento di $\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2$ genera $\mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2$.

Teorema (di isomorfismo per gruppi abeliani): Sia $f : G_1 \rightarrow G_2$ un morfismo di gruppi abeliani. Allora esiste un morfismo iniettivo $\varphi : G_1 / \text{Ker} f \rightarrow G_2$ tale che il seguente diagramma è commutativo:

$$\begin{array}{ccc} G_1 & \xrightarrow{f} & G_2 \\ \pi \downarrow & \nearrow \varphi & \\ G_1 / \text{Ker}(f) & & \end{array}$$

In particolare, $G_1 / \text{Ker}(f) \simeq \Im(f)$.

Dimostrazione: L'assegnazione $[g] \mapsto f(g), \forall g \in G$, definisce una funzione $\varphi : G_1 / \text{Ker}(f) \rightarrow G_2$.

Infatti, se $g' \sim g$, ossia $[g] = [g']$, allora $g = g' + h, h \in \text{Ker}(f)$.

Dunque $f(g) = f(g' + h) = f(g') + f(h) = f(g')$. Poiché f è morfismo di gruppi, anche φ lo è.

Inoltre $\text{Ker}(f) = \{[g] \in G / \text{Ker}(f) : \varphi([g]) = O_2\} = \{[g] \in G / \text{Ker}(f) : f(g) = O_2\} = [O_1]$.
 Quindi φ è iniettiva.

Infine, $\varphi : G_1 / \text{Ker}(f) \rightarrow \text{Im}(f)$ è un morfismo di gruppi, iniettivo e suriettivo, quindi un isomorfismo.

Teorema: Sia G un gruppo ciclico. Allora ogni sottogruppo di G è ciclico.

Dimostrazione: Sia $g \in G$ tale che $g = \langle g \rangle$. La funzione $\varphi : (\mathbb{Z}, +) \rightarrow G$ definita da $\varphi(g) = g^n, \forall n \in \mathbb{Z}$, è un morfismo suriettivo di gruppi.

- G è infinito: allora $\text{Ker}(f) = \{0\}$ e quindi φ è iniettivo. Dunque φ è un isomorfismo di gruppi. Tutti i sottogruppi di \mathbb{Z} sono ciclici.
- G è finito: sia $H \subseteq G$ un sottogruppo. Allora $\varphi^{-1}(H) := \{n \in \mathbb{Z} : \varphi(n) \in H\} \subseteq \mathbb{Z}$ è un sottogruppo di \mathbb{Z} , quindi esiste $\varphi^{-1}(H) = \langle k \rangle$ con $k \in \mathbb{N}$.
La restrizione $\varphi : k\mathbb{Z} \rightarrow H$ è un morfismo suriettivo di gruppi e $\varphi(hk) = \varphi(\underbrace{k + k + \dots + k}_{h \text{ volte}}) = \varphi(k)\varphi(k) \dots \varphi(k) = [\varphi(k)]^h, \forall h \in \mathbb{Z}$. Quindi $H = \langle \varphi(k) \rangle$.

Corollario: L'insieme dei sottogruppi di $\mathbb{Z}_n, n \in \mathbb{N}$ è $\{\langle \overline{m} \rangle : \overline{m} \in \mathbb{Z}_n\}$.

Proposizione: Sia $n \in \mathbb{N}$ e sia $d|n$ (d divide n). Allora esiste al più un unico sottogruppo di \mathbb{Z}_n di cardinalità d .

Dimostrazione: Sia $H \subseteq \mathbb{Z}_n$ sottogruppo tale che $|H| = d$. Si considerino le proiezioni canoniche $\mathbb{Z} \xrightarrow{\pi_1} \mathbb{Z}_n \xrightarrow{\pi_2} \mathbb{Z}_n/H$.

Poiché $\pi_1^{-1}(H) = \{m \in \mathbb{Z} : \pi_1(m) \in H\}$ è un sottogruppo di \mathbb{Z} , allora esiste $k \in \mathbb{N}$ tale che $\pi_1^{-1}(H) = k\mathbb{Z}$. Inoltre $\text{Ker}(\pi_1 \cdot \pi_2) = \pi_1^{-1}(H)$ e quindi, essendo $\pi_1 \cdot \pi_2$ un morfismo suriettivo di gruppi, $\mathbb{Z}_n/H \simeq \mathbb{Z}/\pi_1^{-1}(H) = \mathbb{Z}/k\mathbb{Z} = \mathbb{Z}_k$.

Quindi $|\mathbb{Z}_k| = k = |\mathbb{Z}_n/H| = |\mathbb{Z}_n|/|H| = \frac{n}{d}$, ossia k è univocamente determinato, e allora $H = \pi_1(k\mathbb{Z})$ è univocamente determinato.

Esempio: I sottogruppi di \mathbb{Z}_{899} sono quattro, perché $899 = 31 \cdot 29$, quindi c'è un sottogruppo di cardinalità 1 (il sottogruppo banale), uno di cardinalità 31, uno di cardinalità 29 e \mathbb{Z}_{899} .

Sono: $\{\{0\}, \langle \overline{29} \rangle, \langle \overline{31} \rangle, \mathbb{Z}_{899}\}$.