

# Appunti di Algebra Superiore

Github Repository: [Oxke/appunti/AlgebraSuperiore](#)

Primo semestre, 2025 - 2026, prof. Alberto Canonaco

## Libri utili

- Per la parte di algebra omologica Hilton-Stammbach, Osborne e Weibel.
- Dispense sui moduli (su KIRO) utili
- Aluffi, *Algebra Chapter 0*

Il corso è di 60 ore, non perché sia più pesante ma perché dovrebbero esserci ore di esercitazioni (non sarà necessariamente vero ma Canonaco cercherà di andare un po' nel dettaglio, fornire esempi e controesempi per quanto possibile)

# Indice

<b>1</b>	<b>Prerequisiti</b>	<b>3</b>
1.1	Richiami sugli Anelli . . . . .	3
1.2	Richiami sui Moduli . . . . .	6
1.2.1	Prodotti . . . . .	8
1.2.2	restrizione degli scalari . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Categorie</b>	<b>15</b>
2.1	Categorie preadditive . . . . .	28
2.1.1	Prodotti, coprodotti, proprietà universali . . . . .	31

# Capitolo 1

## Prerequisiti

### 1.1 Richiami sugli Anelli

Per convenzione, parlando di **anelli** si parlerà sempre di **anelli con unità**

#### Definizione 1: Anello

Un **anello**  $A, +, \cdot$  è un gruppo abeliano  $A, +$  (con 0 elemento neutro) e contemporaneamente un monoide  $A, \cdot$  (con 1 elemento neutro). Inoltre le due operazioni sono legate dalle proprietà distributive

$$a(b + c) = ab + ac \quad ; \quad (b + c)a = ba + ca$$

Diremo che l'anello è **commutativo** se l'operazione  $\cdot$  è commutativa

Per quasi tutto ciò che si vedrà in questo corso non è necessario andare a disturbare anelli non commutativi, dunque si useranno quasi sempre anelli commutativi.

**Esempio 2.**  $\mathbb{Z}, \mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}, \mathbb{H}, \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$

**Esempio 3.** Se  $A$  è un anello (commutativo), allora i polinomi a coefficienti in  $A$  e con variabili in  $\Lambda$  costituiscono l'anello  $A[x_\lambda \mid \lambda \in \Lambda]$

**Esempio 4** (Anello Banale). L'anello composto da un solo elemento  $\{0 = 1\}$

**Esempio 5** (Non comm.).  $A$  anello, allora l'anello  $M_n(A)$  delle matrici  $n \times n$  a coefficienti in  $A$  non è commutativo se  $n > 1$  (e se non è l'anello banale ma dall'anello banale non esiste davvero)

**Esempio 6.** Endomorfismi Se  $(G, +)$  è un gruppo abeliano, allora  $\text{End}(G)$  è anello con  $+$  determinato da  $(f + g)(a) = f(a) + g(a)$  e  $\cdot$  dato dalla composizione  $(f \circ g)(a) = f(g(a))$

In generale se  $G, G'$  sono gruppi con  $(G, +)$  abeliano, allora l'insieme  $\text{Hom}(G', G)$  degli omomorfismi da  $G'$  a  $G$  è un sottogruppo di  $G^{G'}$  il gruppo delle funzioni da  $G'$  a  $G$ .

Infatti se  $X$  è un insieme allora  $G^X$  è un gruppo con  $(f + g)(a) = f(a) + g(a)$

#### Definizione 7: Invertibile

$a \in A$  è invertibile a sinistra (destra) se  $\exists a' \in A$  tale che  $a'a = 1$  ( $aa' = 1$ ).

$a$  viene detto **invertibile** se  $\exists a' \in A$  tale che  $a'a = aa' = 1$

*Osservazione* (invertibile  $\iff$  invertibile a destra e sinistra). solo una implicazione non è ovvia. Se  $a', a'' \in A$  sono tali che  $a'a = aa'' = 1$  allora

$$\begin{aligned}(a'a)a'' &= a'(aa'') \\ 1a'' &= a'' = a' = a'1\end{aligned}$$

quindi  $a$  è invertibile e  $a^{-1} = a' = a''$

*Osservazione* (Gruppo degli invertibili). L'insieme degli elementi invertibili forma un gruppo con l'operazione di prodotto e si indica con  $A^*$

In generale, se  $1 \neq 0$ , allora  $A^* \subseteq A \setminus \{0\}$

### Definizione 8: Anello con Divisione

$A$  si dice **anello con divisione** se  $A^* = A \setminus \{0\}$ . Un campo è un anello con divisione commutativo.

### Definizione 9: Divisore di zero

$a \in A$  è detto **divisore di zero** a sinistra (destra) se  $\exists a' \in A \setminus \{0\}$  tale che  $aa' = 0$  ( $a'a = 0$ )

*Osservazione.* Divisore di zero a sinistra:  $aa' = 0$ . Invertibile a sinistra:  $a'a = 1$

### Definizione 10: Dominio

$A$  viene detto **dominio** se  $A \neq 0$  e  $A$  non ha divisori di zero. Viene inoltre chiamato **dominio di integrità** se è commutativo.

**Esempio 11.** I campi,  $\mathbb{Z}$ , se  $A$  dominio d'integrità, allora anche  $A[x_\lambda \mid \lambda \in \Lambda]$  è dominio d'integrità.

*Osservazione.*  $A \neq 0$  tale che  $\forall 0 \neq a \in A$  è invertibile a sinistra, allora  $A$  è un anello con divisione.

*Dimostrazione.*  $\exists a' \in A$  tale che  $a'a = 1$  ma anche  $\exists a'' \in A : a''a' = 1$ . Allora  $a'$  è invertibile a sinistra e a destra, infatti

$$a'^{-1} = a = a'' \implies a \in A^*$$

□

### Definizione 12: Sottoanello

$A' \subseteq A$  è **sottoanello** di  $A$  se  $(A', +) < (A, +)$ ,  $ab \in A'$  per ogni  $a, b \in A'$  e  $1 \in A'$

**Esempio 13.**  $\mathbb{Z} \subseteq \mathbb{Q} \subseteq \mathbb{R} \subseteq \mathbb{C} \subseteq \mathbb{H}$  sono tutti sottoanelli

**Esempio 14.**  $A \subseteq A[X]$  sottoanello

### Definizione 15: Ideale

$I \subseteq A$  è un'ideale sinistro (destro) se  $(I, +) < (A, +)$  e  $ab \in I$  ( $ba \in I$ ),  $\forall a \in A$  e  $\forall b \in I$ .

Un **ideale bilatero** è un ideale sia sinistro che destro.

**Esempio 16.** Gli ideali in  $\mathbb{Z}$  sono tutti e soli della forma  $n\mathbb{Z}$ , con  $n \in \mathbb{N}$

*Osservazione.* Se  $I$  è un ideale sinistro o destro allora

$$I = A \iff I \cap A^* \neq \emptyset$$

quindi  $A$  con divisione  $\implies$  gli unici ideali sinistri o destri sono  $\{0\}$  e  $A$

### Definizione 17: Anello opposto

L'**anello opposto** di un anello  $A$  è  $A^{op}$ , con  $(A^{op}, +) := (A, +)$  e con prodotto  $ab$  in  $A^{op}$  definito come  $ba$  in  $A$

*Osservazione.*  $(A^{op})^{op} = A$  e  $A^{op} = A \iff A$  commutativo

**Proposizione 18** (Anello Quoziente). *Se  $I \subseteq A$  ideale, allora il gruppo abeliano  $A/I, +$  è un anello con prodotto  $\bar{a}\bar{b} := \overline{ab}$ , dove  $\bar{a} := a + I \in A/I$*

### Definizione 19: omomorfismo di anelli

Siano  $A, B$  anelli.  $f : A \rightarrow B$  è **omomorfismo** di anelli se,  $\forall a, a' \in A$

$$\text{i) } f(a + a') = f(a) + f(a')$$

$$\text{ii) } f(aa') = f(a)f(a')$$

$$\text{iii) } f(1_A) = 1_B$$

ed è **isomorfismo** se è un omomorfismo biunivoco

*Osservazione.*  $f$  omomorfismo è isomorfismo  $\iff \exists f' : B \rightarrow A$  omomorfismo tale che  $f' \circ f = \text{id}_A$  e  $f \circ f' = \text{id}_B$

Indicheremo  $A \cong B$  se esiste un isomorfismo tra  $A$  e  $B$

**Proposizione 20.** *Se  $f : A \rightarrow B$  è un omomorfismo allora*

1.  $A' \subseteq A$  è sottoanello  $\implies f(A') \subseteq B$  è sottoanello.
2.  $B' \subseteq B$  sottoanello  $\implies f^{-1}(B') \subseteq A$  è sottoanello
3.  $J \subseteq B$  è ideale (sinistro / destro)  $\implies f^{-1}(J) \subseteq A$  è ideale (sinistro / destro). In particolare  $\text{Ker } f := f^{-1}(0_B) \subseteq A$  è ideale
4.  $f$  **suriettivo** e  $I \subseteq A$  ideale  $\implies f(I) \subseteq B$  è ideale

*Osservazione.*  $f : A \rightarrow B$  è iniettivo  $\iff \text{Ker } f = \{0_A\}$  e in tal caso  $A \cong \text{Im } f := f(A)$  che dunque è sottoanello di  $B$

### Teorema 21: Omomorfismo

$f : A \rightarrow B$  è omomorfismo di anelli,  $I \subseteq A$  ideale tale che  $I \subseteq \text{Ker } f$ . Allora

$$\exists! \bar{f} : A/I \rightarrow B \text{ omomorfismo tale che } \bar{f}(\bar{a}) = f(a) \quad \forall a \in A$$

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{f} & B \\ \pi \downarrow & \searrow \bar{f} & \\ A/I & & \end{array}$$

Inoltre  $\text{im } \bar{f} = \text{im } f$  e  $\text{Ker } \bar{f} = \text{Ker } f / I$

**Proposizione 22.** *Gli ideali di  $A/I$  sono tutti e soli della forma  $J/I$  con  $J \subseteq A$  ideale tale che  $I \subseteq J$*

**Teorema 23: Primo teorema di isomorfismo**

$f : A \rightarrow B$  è omomorfismo di anelli, allora  $\text{im} f \cong A/\text{Ker} f$

**Definizione 24: Ideale massimale (sinistro / destro)**

Un ideale  $J$  (sinistro/destro) di  $A$  è massimale se  $\forall I$  ideale (sinistro/destro) tale che  $J \subseteq I \subseteq A$ , allora  $I = J$  o  $I = A$

*Osservazione.* Esiste sempre un ideale (sinistro/destro) massimale (*lemma di Zorn*)

**Definizione 25**

L'ideale generato da  $U \subseteq A$  è il più piccolo ideale di  $A$  che contiene  $U = \bigcap_{U \subseteq I \subseteq A \text{ ideale}} I$  ed esplicitamente è

$$AUA := \left\{ \sum_{i=1}^n a_i u_i b_i : n \in \mathbb{N}, a_i, b_i \in A, u_i \in U \right\}$$

*Osservazione.* Se  $A$  è commutativo e  $U = \{u\}$  allora  $A\{u\}A = Au = \{au : a \in A\}$  (ideale principale)

**Definizione 26: PID**

$A$  è un dominio (d'integrità) a ideali principali (PID) se ogni ideale di  $A$  è principale.

**Esempio 27.** Campi (non ci sono ideali propri)

**Esempio 28.**  $\mathbb{Z}$  (con ideali  $n\mathbb{Z} = (n)$ )

**Esempio 29.**  $K[X]$  con  $K$  campo

## 1.2 Richiami sui Moduli

**Definizione 30: A-modulo**

Un  $A$ -modulo (di default sinistro)  $M$  è un gruppo abeliano  $(M, +)$  con una moltiplicazione per scalare definita da

$$\begin{aligned} \cdot : A \times M &\longrightarrow M \\ (a, x) &\longmapsto ax \in M \end{aligned}$$

e tale che,  $\forall a, b \in A$  e  $\forall x, y \in M$ :

- 1)  $a(x + y) = ax + ay$
- 2)  $(a + b)x = ax + bx$
- 3)  $(ab)x = a(bx)$
- 4)  $1x = x$

*Osservazione.* Se  $\mathbb{K}$  è un campo, allora un  $\mathbb{K}$ -modulo è uno spazio vettoriale.

*Osservazione.* Se  $(M, +)$  è un gruppo abeliano, data  $f : A \times M \rightarrow M$  posso definire  $\alpha : A \rightarrow M^M$  come  $\alpha(a) = (x \mapsto ax)$ , e quindi le proprietà precedenti si traducono in

1.  $\alpha(a)(x + y) = \alpha(a)(x) + \alpha(a)(y)$  e dunque  $\alpha(a)$  è omomorfismo di gruppi, dunque  $\alpha(A) \subseteq \text{End}(M)$
2.  $\alpha(a + b) = \alpha(a) + \alpha(b)$  dunque  $\alpha : A \rightarrow \text{End}(M)$  è omomorfismo di gruppi
3.  $\alpha(a) \circ \alpha(b) = \alpha(ab)$
4.  $\alpha(1) = \text{id}_M$

Dalla 2,3,4  $\alpha : A \rightarrow \text{End}(M)$  è omomorfismo di anelli.

### Teorema 31: Secondo teorema di isomorfismo

Sia  $M$  un modulo, con  $M', M'' \subseteq M$  sottomoduli. Allora

$$M'/(M' \cap M'') \cong (M' + M'')/M''$$

*Dimostrazione.* Si prenda  $f : M' \rightarrow (M' + M'')/M''$  composizione dell'inclusione di  $M'$  in  $M' + M''$  e della proiezione a quoziente, dunque è un omomorfismo.

Allora  $\text{Ker} f = \{x \in M' : x + M'' = M''\} = M' \cap M''$ .

Preso  $y \in (M' + M'')/M''$ ,  $y = x' + x'' + M'' = x' + M'' = f(x')$  dunque  $f$  è suriettiva. Dal primo teorema di isomorfismo segue la tesi.  $\square$

### Teorema 32: Terzo teorema di isomorfismo

Dati  $M'' \subseteq M' \subseteq M$  sottomoduli e modulo, allora

$$(M/M')/(M'/M'') \cong M/M'$$

*Dimostrazione.* Sia  $f$  la composizione delle due proiezioni a quoziente, dunque è suriettiva. Allora

$$x \in \text{Ker} f \iff \pi(x) \in \text{Ker} \pi' = M'/M''$$

dunque  $\text{Ker} f = M'$  da cui la tesi per il primo teorema di isomorfismo.  $\square$

### Proposizione 33.

1. Sia  $A$  un anello, allora un  $A$ -modulo  $M$  è ciclico se e solo se  $\exists I \subseteq A$  ideale sinistro tale che  $M \cong A/I$
2.  $M$  è semplice se e solo se  $\exists I \subseteq A$  ideale sinistro massimale tale che  $M \cong A/I$

*Dimostrazione.* 1. ( $\Leftarrow$ )  $A/I$  è ciclico (generato da  $\bar{1}$ ). Viceversa per ( $\Rightarrow$ ) so che  $M = Ax$  per un qualche  $x \in M$ . Considerata  $f :_A A \rightarrow M$  data da  $a \mapsto ax$ ,  $\text{Ker} f$  è sottomodulo di  $A$ , ovvero ideale sinistro. Concludo per il primo teorema di isomorfismo.

2. Se  $M$  è semplice allora  $\forall 0 \neq x \in M$ ,  $M = Ax$ , dunque  $M$  è ciclico e per il punto 1. esiste  $I$  ideale sinistro tale che  $M \cong A/I$ . La proposizione si riduce a dire che  $A/I$  è semplice se e solo se  $I$  è massimale. Sappiamo che i sottomoduli di  $A/I$  sono tutti e soli della forma  $J/I$  con  $I \subseteq J \subseteq A$  ideale sinistro. Allora  $A/I \neq 0 \iff I \neq A$  e gli unici sottomoduli di  $A/I$  sono  $I/I$  e  $A/I$ , ossia gli unici ideali sinistri  $J$  tali che  $I \subseteq J \subseteq A$  sono  $I$  e  $A$ .

$\square$

*Osservazione.* Con il lemma di Zorn si dimostra che  $A \neq 0 \implies$  esiste un ideale sinistro massimale (e dunque esiste un sottomodulo semplice)

### 1.2.1 Prodotti

#### Definizione 34: Prodotto

Supponiamo di avere  $M_\lambda$   $A$ -moduli, per  $\lambda \in \Lambda$ . Allora

$$M := \prod_{\lambda \in \Lambda} M_\lambda \text{ è un } A\text{-modulo detto } \mathbf{prodotto} \text{ degli } M_\lambda$$

con  $(x + y)_\lambda := x_\lambda + y_\lambda$  e  $(ax)_\lambda = ax_\lambda$  per ogni  $\lambda \in \Lambda$  e  $x, y \in M$ .

$\forall \mu \in \Lambda$  esiste  $p_\mu : M \rightarrow M_\mu$ ,  $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda} \mapsto x_\mu$  che è  $A$ -lineare e suriettivo.

**Proposizione 35** (Proprietà universale del prodotto).

Dati  $f_\mu : N \rightarrow M_\mu$   $A$ -lineari  $\forall \mu \in \Lambda$ , allora esiste unico  $f : N \rightarrow M$   $A$ -lineare tale che  $f_\mu = p_\mu \circ f$

$$\begin{array}{ccc} N & & \\ f_\mu \downarrow & \searrow \exists! f & \\ M_\mu & \xleftarrow{p_\mu} & \prod_{\lambda \in \Lambda} M_\lambda \end{array}$$

#### Esercizio 36

Dimostrare la proprietà universale del prodotto

#### Definizione 37: Somma diretta

La **somma diretta** (o coprodotto) degli  $M_\lambda$  è

$$M' := \bigoplus_{\lambda \in \Lambda} M_\lambda = \{(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda} \in M : x_\lambda = 0 \text{ per finiti } \lambda \subseteq M\}$$

è sottomodulo.

$\forall \mu \in \Lambda$  esiste

$$i_\mu : M_\mu \longrightarrow M'$$

$$x \mapsto i_\mu(x) = (x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}, \quad x_\lambda := \begin{cases} x & \lambda = \mu \\ 0 & \lambda \neq \mu \end{cases}$$

che è  $A$ -lineare e iniettivo.

**Proposizione 38** (Proprietà universale somma diretta).

$$\begin{array}{ccc} N & & \\ f_\mu \uparrow & \nwarrow \exists! f & \\ M_\mu & \xrightarrow{i_\mu} & \bigoplus_{\lambda \in \Lambda} M_\lambda \end{array}$$

*Osservazione.* Se  $\#\Lambda < +\infty$  allora

$$\bigoplus_{\lambda \in \Lambda} M_\lambda = \prod_{\lambda \in \Lambda} M_\lambda$$

*Nota (zione).* Se  $M_\lambda = M$  per ogni  $\lambda \in \Lambda$ , si denota

$$\prod_{\lambda \in \Lambda} M =: M^\Lambda \quad \text{e} \quad \bigoplus_{\lambda \in \Lambda} M =: M^{(\Lambda)}$$



Dati  $M_\lambda \subseteq M$  sottomoduli, con  $\lambda \in \Lambda$ , sia

$$f : \bigoplus_{\lambda \in \Lambda} M_\lambda \rightarrow M$$

l'omomorfismo indotto dalle inclusioni  $M_\lambda \xrightarrow{i_\lambda} M$ , allora

$$\text{im } f =: \sum_{\lambda \in \Lambda} M_\lambda \subseteq M \text{ è sottomodulo}$$

Inoltre  $f$  è iniettiva se e solo se  $M_\mu \cap \sum_{\lambda \in \Lambda \setminus \{\mu\}} M_\lambda = 0$  per ogni  $\mu \in \Lambda$  e in tal caso  $f$  induce un isomorfismo tra  $\bigoplus_{\lambda \in \Lambda} M_\lambda$  e  $\sum_{\lambda \in \Lambda} M_\lambda$  e si può scrivere  $\bigoplus_{\lambda \in \Lambda} M_\lambda$  per indicare il sottomodulo di  $M$

### Definizione 39: Linearmente indipendente, base, modulo libero

Sia  $U \subseteq M$  un insieme, con  $M$   $A$ -modulo. Si dice che  $U$  è  $A$ -linearmente indipendente se dati  $x_1, \dots, x_n \subseteq U$  distinti

$$a_1, \dots, a_n \in A \text{ t.c. } \sum_{i=1}^n a_i x_i = 0 \implies a_1 = \dots = a_n = 0$$

$U$  è detta **base** di  $M$  se è linearmente indipendente e genera  $M$ , ossia  $M = AU$ . Si dice che  $M$  è **libero** se ammette una base

**Esempio 40.** Per ogni  $\Lambda$ ,  $A^{(\Lambda)}$  è libero con base  $\{e_\lambda : \lambda \in \Lambda\}$  dove, per ogni  $\lambda \in \Lambda$ ,

$$(e_\lambda)_i = \begin{cases} 1 & \lambda = i \\ 0 & \lambda \neq i \end{cases}$$

**Proposizione 41.** Siano  $L, M$   $A$ -moduli, con  $L$  libero con base  $\{l_\lambda : \lambda \in \Lambda\}$  tale che  $l_\lambda \neq l_\mu$  se  $\lambda \neq \mu$ , allora

$$\forall \lambda \in \Lambda \quad \exists ! f : L \rightarrow M \text{ } A\text{-lineare t.c. } f(l_\lambda) = x_\lambda$$

**Corollario 42.** Un  $A$ -modulo è libero se e solo se è isomorfo a  $A^{(\Lambda)}$  per qualche  $\Lambda$ .  
*Dimostrazione.*

$\implies$   $M$  libero con base  $\{x_\lambda : \lambda \in \Lambda\}$  con  $x_\lambda \neq x_\mu$  se  $\lambda \neq \mu$ . Allora per la proposizione

$$\exists ! f : A^\Lambda \rightarrow M \text{ } A\text{-lineare t.c. } f(e_\lambda) = x_\lambda$$

per ogni  $\lambda \in \Lambda$ . Allora  $\text{im } f = \langle x_\lambda : \lambda \in \Lambda \rangle_A = M$  e  $f$  è iniettivo perché gli  $x_\lambda$  sono linearmente indipendenti.

$\Leftarrow$  ovvio

□

**Corollario 43.** Ogni  $A$ -modulo è isomorfo a un quoziente di un modulo libero ( $A^{(\Lambda)}$  per un qualche  $\Lambda$ ).

Inoltre un  $A$ -modulo è finitamente generato se e solo se è isomorfo a un quoziente di  $A^n$ ,  $n \in \mathbb{N}$

*Dimostrazione.* Sia  $\{x_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}$  un insieme di generatori di un modulo  $M$ . Per la proposizione  $\exists ! f : A^{(\Lambda)} \rightarrow M$   $A$ -lineare tale che  $fl_\lambda = x_\lambda$  per ogni  $\lambda \in \Lambda$ . Allora  $\text{Im } f = M$  e dunque per il primo teorema di isomorfismo  $M \cong A^{(\Lambda)} / \ker f$ .

Per la seconda parte se  $M$  è finitamente generato posso scegliere  $\Lambda$  finito e viceversa  $M \cong A^n / N$  è finitamente generato perché  $A^n$  lo è e  $\pi : A^n \rightarrow A^n / N$  è un omomorfismo suriettivo.

□

**Proposizione 44.**  $A$  è con divisione se e solo se ogni suo  $A$ -modulo è libero

*Dimostrazione.*

$\implies$  (complementi di algebra)

$\Leftarrow$  Sia  $M$  un  $A$ -modulo semplice. Per ipotesi è libero, allora  $M \cong A^{(\Lambda)}$  per un qualche  $\Lambda$ . Ma se  $\#\Lambda > 1$  allora  $A^{(\Lambda)}$  non è semplice ( $A \subseteq A^{(\Lambda)}$  è un sottomodulo non banale). Inoltre  $\Lambda \neq \emptyset$  ( $A^{(\emptyset)} = \{0\}$  non è semplice).

Ne consegue che  $M \cong A$  e dunque  $A$  è con divisione

□

**Esempio 45.** Con  $A = \mathbb{Z}$ ,  $\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$  non è libero

Si può dimostrare che se  $A$  è con divisione, allora tutte le basi di un  $A$ -modulo (libero)  $M$  hanno la stessa cardinalità, che viene detta rango e indicata con  $\text{rk}_A M$ .

In generale non tutte le basi di un  $A$ -modulo libero hanno la stessa cardinalità, esistono infatti anelli  $A$  non banali tali che  $A \cong_A A^n$  per ogni  $n \in \mathbb{N}$ .

**Esempio 46.** Sia  $A = \text{End}_{\mathbb{K}}(V)$  con  $\mathbb{K}$  campo e  $\dim_{\mathbb{K}}(V) = +\infty$

Si dimostra che se  $A \rightarrow B$  è omomorfismo di anelli e il rango dei  $B$ -moduli liberi è ben definito allora anche il rango degli  $A$ -moduli liberi è ben definito. Di conseguenza se  $A \neq 0$  è commutativo allora il rango degli  $A$ -moduli liberi è ben definito ( $\exists I \subseteq A$  ideale massimale e  $\pi : A \rightarrow A/I$  omomorfismo con  $A/I$  campo)

## 1.2.2 restrizione degli scalari

Siano  $A, B$  anelli, con  $f : A \rightarrow B$  omomorfismo di anelli. Allora se  $M$  è un  $B$ -modulo allora  $M$  è anche un  $A$ -modulo con  $ax := f(a)x$ . Si dice allora che  ${}_A M$  è ottenuto da  ${}_B M$  per **restrizione degli scalari** attraverso  $f$ .

Inoltre se  $M' \subseteq M$  è  $B$ -sottomodulo allora è anche un  $A$ -sottomodulo e se  $g : M \rightarrow N$  è  $B$ -lineare allora  $g$  è anche  $A$ -lineare.

Prima della prossima definizione ricordiamo che il **centro** di un anello è sottoanello, con il centro l'insieme degli elementi che commutano con tutti gli altri elementi e indicato con  $Z(A)$ ,

$$Z(A) := \{z \in A : za = az \ \forall a \in A\}$$

### Definizione 47

Sia  $A$  commutativo. Allora una  $A$ -algebra è un omomorfismo di anelli  $f : A \rightarrow B$  tale che  $\text{im} f \subseteq Z(B)$

Se  $f$  è evidente si dice che  $B$  è una  $A$ -algebra

**Esempio 48.**  $M_n(A)$  è una  $A$ -algebra con  $a \mapsto \begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & a \end{pmatrix}$

**Esempio 49.** Se  $A = \mathbb{Z}$  per ogni  $B$  anello l'unico omomorfismo di anelli  $\mathbb{Z} \rightarrow B$  è una  $\mathbb{Z}$ -algebra. Infatti l'omomorfismo unico  $\mathbb{Z} \rightarrow Z(B)$  deve essere lo stesso di  $\mathbb{Z} \rightarrow B$

### Definizione 50: Morfismo di $A$ -algre

Siano  $f : A \rightarrow B$ ,  $g : A \rightarrow C$   $A$ -algre. Un (omo/iso/...)morfismo di  $A$ -algre da  $f$  a  $g$  è  $h : B \rightarrow C$  (omo/iso/...)morfismo di anelli tale che  $h \circ f = g$

$$\begin{array}{ccc} A & & \\ f \downarrow & \searrow g & \\ B & \xrightarrow{h} & C \end{array}$$

**Esempio 51.** Ogni omomorfismo di anelli è omomorfismo di  $\mathbb{Z}$ -algebre.

**Esempio 52.** Sia  $f : A \rightarrow B$  una  $A$ -algebra. Allora  $\forall I \subseteq B$  ideale  $B/I$  è  $A$ -algebra con  $\pi \circ f$

*Osservazione (motivazione della definizione).* Se  $f : A \rightarrow B$   $A$ -algebra, allora  $B$  è un anello e  $A$ -modulo (per restrizione degli scalari) tale che

$$a(bb') = (ab)b' = b(ab')$$

**Lemma 53.** Sia  $0 \rightarrow M' \xrightarrow{i} M \xrightarrow{p} M''$  una successione esatta di  $A$ -moduli. Siano  $f' : A^m \rightarrow M'$  e  $f'' : A^n \rightarrow M''$  omomorfismi. Allora esiste un diagramma commutativo con righe esatte

$$\begin{array}{ccccccccc} 0 & \longrightarrow & A^m & \longrightarrow & A^{m+n} & \longrightarrow & A^n & \longrightarrow & 0 \\ & & \downarrow f' & & \downarrow f & & \downarrow f'' & & \\ 0 & \longrightarrow & M' & \xrightarrow{i} & M & \xrightarrow{p} & M'' & \longrightarrow & 0 \end{array}$$

*Dimostrazione.* □

**Proposizione 54.** Sia  $0 \rightarrow M' \xrightarrow{i} M \xrightarrow{p} M''$  esatta di  $A$ -moduli. Allora

1.  $Mf.g. \implies M''f.g.$
2.  $M', M''f.g. \implies Mf.g.$
3.  $M', M''f.p. \implies Mf.p.$
4.  $Mf.g., M''f.p. \implies M'f.g.$
5.  $M'f.g., Mf.p. \implies M''f.g.$

*Dimostrazione.*

1. già visto
2. In esercizio la dimostrazione diretta. In alternativa possiamo applicare il lemma 53. Infatti esistono  $f' : A^m \rightarrow M'$  e  $f'' : A^n \rightarrow M''$  omomorfismi suriettivi e per il lemma 53 il diagramma

$$\begin{array}{ccccccccc} 0 & \longrightarrow & A^m & \longrightarrow & A^{m+n} & \longrightarrow & A^n & \longrightarrow & 0 \\ & & \downarrow f' & & \downarrow f & & \downarrow f'' & & \\ 0 & \longrightarrow & M' & \xrightarrow{i} & M & \xrightarrow{p} & M'' & \longrightarrow & 0 \end{array}$$

commuta. Applicando ora il lemma del serpente otteniamo la successione esatta

$$\text{coKer } f' = 0 \rightarrow \text{coKer } f \rightarrow 0 = \text{coKer } f'' \implies \text{coKer } f = 0 \implies Mf.g.$$

3. Si può fare una dimostrazione simile a quella precedente e applicando il lemma del serpente troviamo la successione esatta

$$0 \rightarrow \text{Ker } f' \rightarrow \text{Ker } f \rightarrow \text{Ker } f'' \rightarrow 0 = \text{coKer } f'$$

per il punto 1.  $M$  è finitamente generato e dunque  $M$  è finitamente presentato.

4.  $M'' \text{ f.p.} \implies \exists$  successione esatta  $A^m \xrightarrow{g} A^n \xrightarrow{h} M'' \rightarrow 0$ . Esiste dunque il diagramma commutativo

$$\begin{array}{ccccccc} A^m & \xrightarrow{g} & A^n & \xrightarrow{h} & M'' & \longrightarrow & 0 \\ \downarrow f' & & \downarrow f & & \downarrow \text{id} & & \\ 0 & \longrightarrow & M' & \xrightarrow{i} & M & \xrightarrow{p} & M'' \longrightarrow 0 \end{array}$$

infatti voglio  $f$  tale che  $p \circ f = h$  e posso come prima (esercizio). allora per il lemma del serpente trovo che

$$0 \rightarrow \text{coKer } f' \rightarrow \text{coKer } f \rightarrow 0 = \text{coKer}_{\text{id}_{M''}}$$

è una successione esatta, e dunque  $\text{coKer } f' \cong \text{coKer } f = M/\text{Im } f$  per cui

$$0 \rightarrow \text{Im } f' \rightarrow M' \rightarrow \text{coKer } f' \rightarrow 0$$

è esatta. Concludiamo che  $\text{Im } f' \cong A^m/\text{Ker } f'$  e dunque è f.g., da cui anche  $M'$  è finitamente generato per il punto 1.

5.  $M$  è finitamente generato, dunque  $M''$  è finitamente generato per il punto 0. Come prima  $\exists A^m \rightarrow A^n, A^n \rightarrow M''$  omomorfismi suriettivi e trovo il diagramma del lemma 53 e applicando il lemma del serpente ottengo la successione esatta

$$\text{Ker } f \rightarrow \text{Ker } f'' \rightarrow 0 = \text{coKer } f'$$

Sia ora  $f : A^{m+n} \rightarrow M$  suriettiva, allora

$$0 \rightarrow \text{Ker } f \rightarrow A^{m+n} \rightarrow M \rightarrow 0$$

è esatta,  $A^{m+n}$  è finitamente generata,  $M$  è finitamente presentato, dunque  $\text{Ker } f$  è f.g., quindi per il punto 3.  $\text{Ker } f''$  è f.g. e per il punto 0.  $M$  è f.p.

□

### Esercizio 55

Dimostrare il punto 1. della dimostrazione precedente direttamente.

**Corollario 56.** Sia  $M = \bigoplus_{i=1}^n M_i$ . Allora  $M$  è f.g. / f.p. se e solo se  $M_i$  è f.g. / f.p. per ogni  $i$ .

*Dimostrazione.* La successione  $0 \rightarrow \bigoplus_{i=1}^{n-1} M_i \rightarrow M \rightarrow M_n \rightarrow 0$  è esatta, dunque

$\implies$  usando induzione su  $n$  e i punti 1. e 2. della proposizione precedente

$\Leftarrow M_n$  è f.g. per il punto 0., ed è f.p. per il punto 4.

□

*Osservazione.* per il punto 3., se  $M$  è f.p. allora ogni  $A^n \xrightarrow{p} M \rightarrow 0$  esatta si estende a

$$A^m \rightarrow A^n \xrightarrow{p} M \rightarrow 0$$

*Osservazione.* Sia  $A$  non noetheriano. Allora  $\exists M$   $A$ -modulo f.g. non noetheriano, ad esempio  $M = A$ , ossia  $\exists M' \subseteq M$  sottomodulo non f.g. e in tal caso anche quando  $M$  è finitamente presentato, ad esempio nel caso  $M = A$ ,  $M/M'$  non è f.p. perché contraddirebbe il punto 3.

Uno può chiedersi dato un modulo se i suoi sottomoduli finitamente generati siano anche moduli finitamente presentati. Questo non è in generale vero ma motiva la seguente definizione

### Definizione 57: Modulo coerente

Uno modulo  $M$  è detto **coerente** se è finitamente generato e tutti i suoi sottomoduli finitamente generati sono finitamente presentati.

*Osservazione.* Chiaramente essendo  $M \subseteq M$  un sottomodulo, se è coerente è anche f.p.

### Definizione 58: Anello coerente

Un anello  $A$  è **coerente** (a sinistra) se  ${}_A A$  è  $A$ -modulo coerente (ossia tutti gli ideali sinistri f.g. di  $A$  sono f.p.)

*Osservazione.* Se  $A$  è noetheriano e  $M$  è un  $A$ -modulo, allora

$$M \text{ coerente} \iff M \text{ f.p.} \iff M \text{ f.g.} \iff M \text{ noetheriano}$$

in particolare  $A$  è coerente.

*Dimostrazione.* Sappiamo già che  $M$  noetheriano se e solo se  $M$  f.g. Resta da dimostrare dunque che  $M$  noetheriano se e solo se  $M$  è coerente. So che  $M' \subseteq M$  f.g. è noetheriano (perché  $M$  lo è). Allora esiste la successione esatta

$$0 \rightarrow \text{Ker } p \rightarrow A^n \xrightarrow{p} M' \rightarrow 0$$

Ora poiché  $A$  è noetheriano, anche  $A^n$  lo è, e dunque  $\text{Ker } p$  è noetheriano, dunque  $\text{Ker } p$  è f.g. e infine  $M'$  è f.p.  $\square$

*Osservazione.* Sia  $A$  coerente non noetheriano, allora  ${}_A A$  è coerente non noetheriano

**Esempio 59.** Sia  $A$  non noetheriano,  $I \subseteq A$  ideale sinistro non f.g., allora  $A/I$  è f.g. non f.p. e  $A/I$  può anche essere noetheriano.

Un esempio è  $A = \mathbb{K}[X_n | n \in \mathbb{N}]$ ,  $I = (X_n | n \in \mathbb{N})$ ,  $A/I = \mathbb{K}$

*Osservazione.* Sia  $f : M \rightarrow N$   $A$ -lineare, con  $M, N$  finitamente generati. Allora  $\text{Im } f \cong M/\text{Ker } f$  e  $\text{coKer } f \cong N/\text{Im } f$  sono finitamente generati (punto 0. della proposizione) ma non necessariamente anche  $\text{Ker } f$  se  $A$  è non noetheriano.

**Proposizione 60.** Sia  $0 \rightarrow M' \xrightarrow{i} M \xrightarrow{p} M'' \rightarrow 0$  esatta di  $A$ -moduli.

1.  $M'$  f.g. e  $M$  coerente, allora  $M''$  è coerente
2.  $M', M''$  coerenti, allora  $M$  è coerente
3.  $M$  è coerente,  $M''$  è f.p., allora  $M'$  è coerente

in particolare  $M', M, M''$  sono coerenti se due di essi lo sono.

*Dimostrazione.* 1.  $M''$  è f.g. per il punto 0. della proposizione 54.  $N'' \subseteq M''$  è f.g., allora c'è una successione esatta

$$0 \rightarrow M' \rightarrow N := p^{-1}(N'') \rightarrow N'' \rightarrow 0$$

Allora  $N$  è f.g. per 1. di 54 e dunque  $N$  è f.p. perché  $M$  è coerente, da cui  $N''$  è f.p. per 4. di 54

2.  $M$  è f.g. per 1. di 54, se  $N \subseteq M$  sottomodulo finitamente generato, allora esiste la successione esatta

$$0 \rightarrow N' := i^{-1}(N) \rightarrow N \rightarrow N'' := p(N) \rightarrow 0$$

Allora  $N''$  è f.g. per 0. di 54 da cui  $N''$  è f.p. per la coerenza di  $M$ , dunque  $N'$  è f.g. per 3. di 54. Segue dalla coerenza di  $M'$  che  $N'$  è f.p. e dunque  $N$  lo è per 2. di 54

3.  $M'$  è f.g. per 3. di 54 dunque  $M'$  è coerente perché  $M' \cong i(M') \subseteq M$  sottomodulo è f.g. e  $M$  è coerente.  $\square$

### Esercizio 61

mostrare che

$$\bigoplus_{i=1}^n M_i \text{ coerente} \iff M_i \text{ coerente } \forall i$$

**Corollario 62.** Sia  $f : M \rightarrow N$   $A$ -lineare,  $M, N$  coerenti, allora  $\text{Ker} f, \text{Im} f, \text{coKer} f$  sono coerenti.

*Dimostrazione.*  $\text{Im} f \cong M/\text{Ker} f$  è f.g. per 0. di 54  $\square$

**Corollario 63.** Se  $A$  è coerente e  $M$  è un  $A$ -modulo f.p., allora  $M$  è coerente.

*Dimostrazione.* Basta osservare che per definizione esiste una successione esatta

$$A^m \xrightarrow{f} A^n \rightarrow M \rightarrow 0$$

e in particolare dunque  $M \cong \text{coKer} f$  e poiché  $A^m$  e  $A^n$  sono coerenti, lo è pure  $M$   $\square$

**Esempio 64.** Sia  $A$  commutativo tale che  $A[X_1, \dots, X_n]$  sia coerente  $\forall n \in \mathbb{N}$  (ad esempio  $A$  noetheriano, per il teorema della base di Hilbert) Allora  $A[X_\lambda | \lambda \in \Lambda]$  è coerente  $\forall \Lambda$ , anche se non è noetheriano per  $\#\Lambda = +\infty$  e  $A \neq 0$ .

*Idea della dimostrazione.* Sia  $I \subseteq B$  ideale f.g., ossia  $I = (f_1, \dots, f_n)$ . Allora  $\exists \Lambda_0 \subseteq \Lambda$  finito tale che  $f_1 \in B_0 := A[X_\lambda | \lambda \in \Lambda_0]$   $\square$

**Esempio 65** (Anello non coerente). Presi  $A$  e  $B$  come prima, ma supponiamo che  $A = \mathbb{K}$  campo. Prendiamo dunque  $J := (X_\lambda | \lambda \in \Lambda)$ , con  $\#\Lambda = +\infty$ . Allora preso

$$C = B/J^2$$

non è coerente. Preso infatti ad esempio

$$I = C\overline{X_\lambda} \text{ con } \lambda \in \Lambda$$

è f.g. ma non f.p. perché c'è la successione esatta

$$0 \rightarrow J/J^2 \rightarrow C \rightarrow I \rightarrow 0$$

e  $J/J^2$  è  $C$ -modulo annullato da  $J/J^2$  e come  $C/(J/J^2) \cong B/J \cong \mathbb{K}$ -modulo ha dimensione  $\infty$  con base  $\{\overline{x_\lambda} | \lambda \in \Lambda\}$

## Capitolo 2

# Categorie

### Definizione 66: Categoria

Una **categoria**  $C$  è data da una classe di oggetti  $\text{Ob}(C)$  e  $\forall X, Y \in \text{Ob}(C)$  da un insieme di morfismi da  $X$  a  $Y$  indicato con  $\text{Hom}(X, Y) = \text{Hom}_C(X, Y) = C(X, Y)$  e da una azione composizione di morfismi, cioè  $\forall X, Y, Z \in \text{Ob}(C)$  (anche scritto  $X, Y, Z \in C$ ) un'operazione

$$C(X, Y) \times C(Y, Z) \rightarrow C(X, Z)(f, g) \mapsto g \circ f$$

tale che

$$0. C(X, Y) \cap C(X', Y') \neq \emptyset \implies X = X' \text{ e } Y = Y'$$

1.  $\circ$  è associativa, cioè  $\forall X, Y, Z, W \in C$  e  $\forall f \in C(X, Y)$  e  $\forall g \in C(Y, Z)$  e  $\forall h \in C(Z, W)$  allora

$$h \circ (g \circ f) = (h \circ g) \circ f$$

2.  $\forall X \in C$  esiste  $1_X = \text{id}_X \in C(X, X)$  che è elemento neutro di  $X$  cioè  $\forall Y \in C$  e  $\forall f \in C(X, Y)$ ,

$$f \circ 1_X = f \quad , \quad 1_Y \circ f = f$$

**Esempio 67.** La categoria degli insiemi **Set** che ha come oggetti tutti gli insiemi e  $\forall X, Y \in \text{Set}$  i morfismi  $\text{Set}(X, Y) = \{f : X \rightarrow Y\}$  le funzioni e  $\circ$  la composizione di funzioni

*Osservazione.* Se ho  $C$  tale che valgano solo 1. e 2. e non necessariamente 0. posso ottenere la categoria  $C'$  che soddisfa anche 0. ponendo  $\text{Ob}(C') := \text{Ob}(C)$  e

$$C'(X, Y) := \{X\} \times C(X, Y) \times \{Y\}$$

**Esempio 68.** Le categorie concrete, in cui gli oggetti sono insiemi con qualche struttura e i morfismi sono funzioni tra insiemi che preservano la struttura (con  $\circ$  sempre la composizione di funzioni). In particolare:

- La categoria **Grp** dei gruppi, dove gli oggetti sono i gruppi e i morfismi gli omomorfismi di gruppi
- La categoria **Rng** degli anelli
- Dato un anello  $A$ , la categoria  $\mathbf{A} - \text{Mod} / \text{Mod} - \mathbf{A}$  degli  $A$ -moduli sinistri / destri

- Dato un anello commutativo  $A$ , la categoria  $\mathbf{A-Alg}$  delle  $A$ -algebre
- La categoria  $\mathbf{Top}$  degli spazi topologici (con funzioni continue come morfismi)

*Nota.* Dato  $f \in C(X, Y)$  si può indicare con  $f : X \rightarrow Y$  “come fosse una funzione”

**Esempio 69.** Le categorie discrete, cioè tali che gli unici morfismi sono  $1_X$  per ogni  $X \in C$ .

**Esempio 70.**  $C$  tale che  $\forall X, Y \in C, \#C(X, Y) = 1$ , ottengo una relazione  $\preccurlyeq$  su  $\text{Ob}(C)$  in cui

$$X \preccurlyeq Y \iff C(X, Y) \neq \emptyset$$

e  $\preccurlyeq$  è riflessivo (perché  $\exists 1_X \in C(X, X) \forall X \in C$ ) e transitivo, perché  $\exists \circ$ . Ne consegue che  $\preccurlyeq$  è un *preordine*

Viceversa, data una relazione di preordine  $\preccurlyeq$  su un insieme (o una classe)  $S$ , ottengo una categoria  $C$  con  $\text{Ob}(C) := S$  e  $\forall X, Y \in S$ ,

$$C(X, Y) := \begin{cases} \{f_{X,Y}\} & \text{se } X \preccurlyeq Y \\ \emptyset & \text{altrimenti} \end{cases}$$

con l'unica composizione possibile

**Esempio 71** (Categoria Vuota). Prendendo  $\text{Ob}(C) = \emptyset$

*Osservazione.*  $\forall X \in C$  con  $C$  una categoria,  $\text{End}_C(X) := C(X, X)$  è un monoide con  $\circ$ , ne consegue il prossimo esempio

**Esempio 72** (Monoide). Una categoria con un solo oggetto è un monoide. Viceversa ogni monoide può essere visto come categoria di un solo oggetto.

**Esempio 73** (Diagrammi). Possiamo definire categorie date da diagrammi, in cui si rappresentano i morfismi (non l'identità). Ad esempio:

$$\bullet \longrightarrow \bullet \qquad \bullet \rightrightarrows \bullet \qquad \bullet \longrightarrow \bullet \longleftarrow \bullet$$

sono tre categorie diverse, rispettivamente con 2, 2, e 3 oggetti

#### Definizione 74: Categoria opposta

La **categoria opposta** di  $C$  è denotata  $C^{op}$  ed è definita da

$$\text{Ob}(C^{op}) := \text{Ob}(C) \quad C^{op}(X, Y) := C(Y, X)$$

con composizione in  $\circ^{op}$  data da  $f \circ^{op} g := g \circ f$

*Osservazione.*

$$(C^{op})^{op} = C$$

**Esempio 75** (Categoria Prodotto). Siano  $C_\lambda$  per  $\lambda \in \Lambda$  delle categorie. Allora la categoria prodotto

$$C := \prod_{\lambda \in \Lambda} C_\lambda$$

è definita da

$$\begin{aligned} \text{Ob}(C) &:= \prod_{\lambda \in \Lambda} \text{Ob}(C_\lambda) \\ C((X_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}, (Y_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}) &:= \prod_{\lambda \in \Lambda} C_\lambda(X_\lambda, Y_\lambda) \\ (g_\lambda)_{\lambda \in \Lambda} \circ (f_\lambda)_{\lambda \in \Lambda} &:= (g_\lambda \circ f_\lambda)_{\lambda \in \Lambda} \end{aligned}$$



**Esempio 76** (Categoria Coprodotto). La categoria coprodotto

$$C := \coprod_{\lambda \in \Lambda} C_\lambda$$

è definita con  $\text{Ob}(C) := \coprod_{\lambda \in \Lambda} \text{Ob}(C_\lambda)$  l'unione disgiunta.

$$\forall X, Y \in C \quad C(X, Y) := \begin{cases} C_\lambda(X, Y) & \text{se } X, Y \in C_\lambda \text{ per qualche } \lambda \in \Lambda \\ \emptyset & \text{altrimenti} \end{cases}$$

con  $\circ$  ovvia.

#### Definizione 77: Sottocategoria

Sia  $C$  una categoria. Allora una sottocategoria  $C'$  di  $C$  è data da una sottoclasse  $\text{Ob}(C') \subseteq \text{Ob}(C)$  e  $\forall X, Y \in C'$  da un sottoinsieme  $C'(X, Y) \subseteq C(X, Y)$  tale che  $\circ$  si restringe a  $C'$  e  $1_X \in C'(X, X)$  per ogni  $X \in C'$ . In particolare  $C'$  è una categoria.

**Esempio 78.** Se  $C$  è un monoide (categoria di un oggetto), allora le sottocategorie non vuote di  $C$  sono i sottomonoidi.

#### Definizione 79: Sottocategoria Piena

Una sottocategoria  $C'$  di  $C$  si dice **piena** se  $C'(X, Y) = C(X, Y)$  per ogni  $X, Y \in C'$

*Osservazione.* Una sottocategoria piena di  $C$  equivale a dare una sottoclasse di  $\text{Ob}(C)$

**Esempio 80** (Gruppi Abeliani).  $\mathbf{Ab} \subseteq \mathbf{Grp}$  sottocategoria piena dei gruppi abeliani. Similmente anche  $\mathbf{CRng} \subseteq \mathbf{Rng}$  sottocategoria piena degli anelli commutativi.

Oltre alle sotto-strutture sono anche importanti i quozienti, e anche qui possiamo dare una definizione astratta

#### Definizione 81: Congruenza

Una congruenza  $\sim$  su una categoria  $C$  è data da una relazione di equivalenza  $\sim$  su  $C(X, Y) \forall X, Y \in C$  tale che

$$\forall X, Y, Z \in C, \forall f, f' \in C(X, Y) \forall g, g' \in C(Y, Z) \quad f \sim f', g \sim g' \implies g \circ f \sim g' \circ f'$$

$$\text{equivalentemente } g \sim g' \implies g \circ f \sim g' \circ f \text{ e } h \circ g \sim h \circ g'$$

#### Definizione 82: Quoziente

Sia  $\sim$  una congruenza su  $C$ , allora possiamo definire la categoria quoziente  $C/\sim$  definita da

$$\text{Ob}(C/\sim) = \text{Ob}(C) \quad (C/\sim)(X, Y) := C(X, Y)/\sim \quad \forall X, Y \in C$$

e  $\circ$  è indotta da quella di  $C$ , ossia

$$\bar{g} \circ \bar{f} := \overline{g \circ f}$$

**Esempio 83** (Omotopia). Sia  $C = \mathbf{Top}$  e  $\sim_h$  l'omotopia, ossia  $f, g : X \rightarrow Y$  sono omotope se  $\exists H : X \times [0, 1] \rightarrow Y$  continue tali che

$$f(x) = H(x, 0), \quad g(x) = H(x, 1) \quad \forall x \in X$$

e si ottiene  $\mathbf{Toph} := \mathbf{Top} / \sim_h$

**Esempio 84** (Gruppo quoziente). Sia  $G$  un gruppo (visto come monoide, ossia categoria di un oggetto) e sia  $H \triangleleft G$  e  $\sim$  su  $G$  data da  $a \sim b \iff aH = bH$ . Allora  $G/N$  è la categoria quoziente  $G / \sim$ . Viceversa ogni  $\sim$  congruenza su  $G$  si può scrivere in tal modo prendendo  $H = \{a \in G : a \sim 1\} \triangleleft G$  (esercizio).

#### Definizione 85: morfismo invertibile

Sia  $f : X \rightarrow Y$  un morfismo in una categoria  $C$ . Allora esso è invertibile a sinistra (destra) se  $\exists f' : Y \rightarrow X$  tale che  $f' \circ f = 1_X$  ( $f \circ f' = 1_Y$ ).

*Osservazione.*  $f$  è invertibile a sinistra (destra) in  $C$ , allora  $f$  è invertibile a destra (sinistra) in  $C^{op}$

#### Definizione 86: Isomorfismo

$f : X \rightarrow Y$  è un **isomorfismo** se  $\exists f' : Y \rightarrow X$  tale che  $f' \circ f = 1_X$  e  $f \circ f' = 1_Y$

*Osservazione.*  $f$  è isomorfismo se e solo se  $f$  è invertibile a destra e a sinistra.

*Dimostrazione.*

$\implies$  ovvio

$\impliedby$   $\exists f', f''$  tale che  $f' \circ f = 1_X$  e  $f \circ f'' = 1_Y$ , allora

$$f' \circ (f \circ f'') = f' = f'' = (f' \circ f) \circ f''$$

e dunque  $f$  è invertibile.

In particolare dunque la  $f'$  della definizione di isomorfismo è unica e viene denotata  $f^{-1}$  □

#### Definizione 87

Siano  $X, Y \in C$ . Allora  $X$  e  $Y$  sono isomorfe ( $X \cong Y$ ) se esiste un  $f : X \rightarrow Y$  isomorfismo.

*Osservazione.*  $1_X$  è isomorfismo e  $1_X^{-1} = 1_X$ . Se  $f$  isomorfismo allora  $f^{-1}$  isomorfismo e  $(f^{-1})^{-1} = f$ . Se  $f, g$  isomorfismi componibili, allora  $g \circ f$  è isomorfismo e  $(g \circ f)^{-1} = f^{-1} \circ g^{-1}$

Ne segue che  $\cong$  è una relazione di equivalenza su  $\mathbf{Ob}(C)$

#### Definizione 88

Un morfismo  $f : X \rightarrow Y$  in  $C$  è detto **monomorfismo** se  $\forall Z \in C$  la funzione

$$\begin{aligned} f_* : C(Z, X) &\longrightarrow C(Z, Y) \\ g &\longmapsto f_*(g) = f \circ g \end{aligned}$$

è iniettiva

**Definizione 89: Epimorfismo**

$f$  è un **epimorfismo** in  $C$  se è monomorfismo in  $C^{op}$ , ossia  $\forall Z \in C$  la funzione

$$\begin{aligned} f^* : C(Y, Z) &\longrightarrow C(X, Z) \\ g &\longmapsto f^*(g) = g \circ f \end{aligned}$$

è iniettiva.

**Proposizione 90.**  $f$  è invertibile a sinistra (destra), allora  $f$  è monomorfismo (epimorfismo)

*Dimostrazione.* Basta dimostrare che se  $f$  è invertibile a sinistra, allora è mono.

Sappiamo che  $\exists f' : Y \rightarrow X$  tale che  $f' \circ f = 1_X$ . Dobbiamo dimostrare che  $f_*$  è iniettiva. Siano  $g, h \in C(Z, X)$  tali che  $f_*(g) = f_*(h)$ . Allora  $f \circ g = f \circ h$ , da cui  $f' \circ f \circ g = f' \circ f \circ h$  e dunque  $g = h$   $\square$

**Proposizione 91.** Sia  $C$  concreta. Allora

$$f \text{ invertibile a sinistra/destra} \implies f \text{ iniettiva/suriettiva} \implies f \text{ mono/epi}$$

*Dimostrazione.* Non possiamo usare il trick della categoria opposta, perché non è detto che  $C^{op}$  sia ancora concreta.

Sia  $f'$  tale che  $f' \circ f = 1_X$  ( $f \circ f' = 1_Y$ ), allora chiaramente  $f$  iniettiva (suriettiva) perché le composizioni  $1_X$  e  $1_Y$  sono biunivoche.

Se  $f$  è iniettiva, allora siano  $g_1, g_2 : Z \rightarrow X$ . Dunque  $\forall x \in X$

$$f(g_1(x)) = f(g_2(x)) \xrightarrow{f \text{ inj.}} g_1(x) = g_2(x)$$

ossia  $f_*$  è iniettiva, ossia  $f$  è monomorfismo.

se  $f$  è suriettiva, allora siano  $g_1, g_2 : Y \rightarrow Z$ . Sappiamo che  $\forall y \in Y$  esiste  $x_y \in X$  tale che  $f(x_y) = y$ . Allora abbiamo che, assumendo che  $g_1 \circ f = g_2 \circ f$

$$g_1(y) = g_1(f(x_y)) = g_2(f(x_y)) = g_2(y) \quad \forall y \in Y$$

ossia  $f^*$  è iniettiva e dunque  $f$  è epimorfismo  $\square$

In generale non vale nessuna delle  $\Leftarrow$ .

**Esempio 92.** In **Set** se  $f : X \rightarrow Y$  è suriettiva, allora  $f$  è invertibile a sinistra. Infatti basta scegliere (AOC)  $f'(y) \in f^{-1}\{y\}$  per ogni  $y \in Y$ . Inoltre se  $X \neq \emptyset$  e  $f : X \rightarrow Y$  è iniettiva, allora  $f$  è invertibile a sinistra.

**Esercizio 93**

In **A-Mod**, mostrare che  $f : M \rightarrow N$  iniettiva è invertibile a sinistra se e solo se  $\text{Im}(f) \subseteq N$  è addendo diretto.

Mostrare che  $f : M \rightarrow N$  suriettiva è invertibile a destra se e solo se  $\text{Ker}(f) \subseteq M$  è addendo diretto

Concludere che valgono sempre entrambe le implicazioni se e solo se  $A$  è semisemplice.

**Esempio 94.** In **Set**, se  $f$  è mono (epi), allora  $f$  è iniettiva (suriettiva).

Infatti, poniamo per assurdo  $f : X \rightarrow Y$  non iniettiva, dunque siano  $x, y \in X$  tali che  $f(x) = f(y)$ . Allora preso  $Z = \{z\}$  e  $g, h : Z \rightarrow X$  tali che  $g(z) = x$  e  $h(z) = y$  abbiamo che  $f \circ g = f \circ h$  da cui  $g = h$  e dunque  $x = y$

Supponiamo  $f$  non suriettiva, mostrare per esercizio  $\exists g, h : Y \rightarrow Z$  tali che  $g \neq h$  ma  $g \circ f = h \circ f$

**Esempio 95.** In  $\mathbf{A} - \mathbf{Mod}$   $f : M \rightarrow N$  è mono (epi), allora  $f$  è iniettiva (suriettiva).

Infatti  $i : \text{Ker} f \rightarrow M$  inclusione tale che  $f \circ i = 0$  e anche  $0 : \text{Ker} f \rightarrow M$  è tale che  $f \circ 0 = 0$ . Concludiamo che  $i = 0$  e dunque  $\text{Ker} f = 0$ .

Similmente  $\pi : N \rightarrow \text{coKer} f$  è tale che  $\pi \circ f = 0$  e se  $f$  è epi allora  $0 = \pi$  e dunque  $\text{coKer} f = 0$  e dunque  $f$  è suriettiva.

**Esempio 96.** In  $\mathbf{Grp}$   $f$  mono (epi), allora  $f$  iniettiva (suriettiva)

Per mono  $\implies$  iniettiva si può usare la stessa dei moduli, mentre per l'altra è un po' più complicato, ma si dimostra che è vero lo stesso

**Esempio 97.** In  $\mathbf{Rng}$   $f : A \rightarrow B$  mono, allora  $f$  iniettiva.

Tuttavia  $f$  epi **non implica**  $f$  suriettiva. Ad esempio preso  $i : \mathbb{Z} \hookrightarrow \mathbb{Q}$  è epi, infatti  $\forall A$  anello esiste al più un omomorfismo  $\mathbb{Q} \rightarrow A$  ( $f : \mathbb{Q} \rightarrow A$  sia omomorfismo, allora  $f|_{\mathbb{Z}}$  è l'unico omomorfismo e  $f(\frac{a}{b}) = f(a)f(b)^{-1}$ ). Chiaramente però non è suriettiva.

### Definizione 98: Funtore

Un funtore  $F : C \rightarrow D$  tra 2 categorie è dato da una funzione  $F : \text{Ob}(C) \rightarrow \text{Ob}(D)$  e  $\forall X, X' \in C$  una funzione  $F = F_{X, X'} : C(X, X') \rightarrow D(F(X), F(X'))$  tale che

$$F(g \circ f) = F(g) \circ F(f)$$

(se  $f$  e  $g$  sono componibili in  $C$ ) e  $F(1_X) = 1_{F(X)}$  per ogni  $X \in C$

**Proposizione 99.** Sia  $F$  un funtore e  $f$  invertibile a sinistra (destra). Allora  $F(f)$  è invertibile a sinistra (destra)

*Dimostrazione.*  $\exists f'$  tale che  $f' \circ f = 1_X$ , allora  $F(f') \circ F(f) = F(f' \circ f) = F(1_X) = 1_{F(X)}$ .  $\square$

*Osservazione.* Segue che  $f$  iso, allora  $F(f)$  iso e  $F(f)^{-1} = F(f^{-1})$

**Esempio 100.** Sia  $C' \subseteq C$  sottocategoria. Allora  $C' \rightarrow C$ ,  $X \mapsto X$  e  $f \mapsto f$  è un funtore

**Esempio 101.** Se  $\sim$  è una congruenza, allora  $C \rightarrow C/\sim$  è un funtore, con  $X \mapsto X$  e  $f \mapsto \bar{f}$

**Esempio 102** (Funtore dimenticante).  $C \rightarrow \mathbf{Set}$  con  $C$  categoria discreta e  $X \mapsto X$ ,  $f \mapsto f$  è un funtore, che “dimentica” la struttura aggiunta.

Analogamente anche  $\mathbf{Rng} \rightarrow \mathbf{Ab}$ , con  $(A, +, \cdot) \rightarrow (A, +)$  è un funtore dimenticante.

*Osservazione.* Notare che il secondo funtore dimenticante non preserva gli epimorfismi. Sarebbe infatti  $i : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Q}$  l'inclusione è un'epimorfismo in  $\mathbf{Rng}$  ma non in  $\mathbf{Ab}$

**Esempio 103.** Sia  $A \rightarrow B$  un omomorfismo di anelli. Allora la restrizione degli scalari è un funtore  $\mathbf{B} - \mathbf{Mod} \rightarrow \mathbf{A} - \mathbf{Mod}$

**Esempio 104.** Funtore tra 2 categorie discrete  $C$  e  $D$  è una funzione  $\text{Ob}(C) \rightarrow \text{Ob}(D)$

**Esempio 105.** Un funtore tra 2 preordini  $C$  e  $D$  è una funzione  $\text{Ob}(C) \rightarrow \text{Ob}(D)$  che preserva la relazione di preordine.

**Esempio 106.** Un funtore tra 2 monoidi è un omomorfismo di monoidi.

Più in generale dato  $G$  un monoide e una categoria  $C$ , un funtore  $G \rightarrow C$  è dato da  $X \in C$  e da un omomorfismo di monoidi  $G \rightarrow \text{End}_C(X)$

Se  $G$  è un gruppo un funtore  $G \rightarrow C$  è dato da  $X \in C$  e un omomorfismo di gruppi  $G \rightarrow \text{Aut}_C(X)$ . Ad esempio se  $C = \mathbf{Set}$  il funtore dà un'azione di un gruppo su un insieme. Similmente se  $C = \mathbb{K}$ -spazi vettoriali ho una rappresentazione di  $G$ .

**Esempio 107** (Funtore costante). Date  $C, D$  categorie preso  $Y \subseteq D$  si può considerare il funtore costante di valore  $Y$ ,  $C \rightarrow D$ ,  $X \mapsto Y$  e  $f \mapsto 1_Y$

**Esempio 108.** Presa  $\text{Top}_*$  la categoria degli spazi topologici puntati, il gruppo fondamentale

$$\pi_1 : \text{Top}_* \rightarrow \mathbf{Grp}$$

è un funtore

**Esempio 109.**  $\forall n \in \mathbb{N}$  ci sono funtori di omologia (singolare)

$$H_n : \text{Top} \rightarrow \mathbf{Ab}$$

#### Teorema 110: Omomorfismo

Sia  $\sim$  una congruenza su  $C$  e  $F : C \rightarrow D$  un funtore tale che se  $f \sim f'$  in  $C$  allora  $F(f) = F(f')$ . Allora esiste un unico funtore  $\bar{F} : C/\sim \rightarrow D$  tale che  $\bar{F}(f) = F(f)$  per ogni  $f$  morfismo di  $C$

**Esempio 111.** Negli esempi precedenti se  $f$  e  $f'$  sono omotope, allora  $\pi_1(f) = \pi_1(f')$  e  $H_n(f) = H_n(f')$ , dunque inducono funtori

$$\pi_1 : \text{Toph}_* \rightarrow \mathbf{Grp} \quad H_n : \text{Toph} \rightarrow \mathbf{Ab}$$

*Nota.* I funtori che abbiamo definito si dicono anche funtori covarianti

#### Definizione 112: funtore controvariante

Un funtore **controvariante**  $C \rightarrow D$  è un funtore (covariante)  $C^{op} \rightarrow D$ .

**Esempio 113.**  $\forall n \in \mathbb{N}$  i funtori di coomologia (singolare) sono funtori controvarianti  $H^n : \text{Top}(\mathbf{h})^{op} \rightarrow \mathbf{Ab}$

**Esempio 114.** Sia  $C$  una categoria,  $X \in C$

$$\begin{aligned} C(X, -) : C &\rightarrow \mathbf{Set} \\ Y &\mapsto C(X, Y) \quad (f : Y \rightarrow Y') \mapsto (f_* : C(X, Y) \rightarrow C(X, Y')) \\ g &\mapsto f \circ g \end{aligned}$$

è un funtore perché  $(f' \circ f)_* = f'_* \circ f_*$

Analogamente

$$\begin{aligned} C(-, Y) : C^{op} &\rightarrow \mathbf{Set} \\ X &\mapsto C(X, Y) \quad (f : X \rightarrow X') \mapsto (f^* : C(X', Y) \rightarrow C(X, Y)) \\ g &\mapsto g \circ f \end{aligned}$$

*Osservazione.*  $C$  è anche un funtore

$$\begin{aligned} C(-, =) : C^{op} \times C &\rightarrow \mathbf{Set} \\ (X, Y) &\mapsto C(X, Y) \\ (f : X \rightarrow X', g : Y \rightarrow Y') &\mapsto (f^* : C(X', Y) \rightarrow C(X, Y), g_* : C(X, Y) \rightarrow C(X, Y')) \end{aligned}$$

**Esempio 115.** Per ogni gruppo  $G$ , preso il sottogruppo dei commutatori  $[G, G]$ , allora per ogni  $f : G \rightarrow H$  omomorfismo di gruppi,  $f([G, G]) \subseteq [H, H]$  quindi si ottiene un funtore

$$\begin{aligned} \mathbf{Grp} &\rightarrow \mathbf{Grp} \\ G &\mapsto [G, G] \\ (f : G \rightarrow H) &\mapsto (f|_{[G, G]} : [G, G] \rightarrow [H, H]) \end{aligned}$$

e anche

$$\begin{aligned} \mathbf{Abel} : \mathbf{Grp} &\rightarrow \mathbf{Ab} \\ G &\mapsto \frac{G}{[G, G]} \text{ (abelianizzato di } G \text{ )} \\ (f : G \rightarrow H) &\mapsto \left( \bar{f} : \frac{G}{[G, G]} \rightarrow \frac{H}{[H, H]} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{array}{ccc} G & \xrightarrow{f} & H \\ \downarrow p & & \downarrow q \\ \frac{G}{[G, G]} & \xrightarrow{\bar{f}} & \frac{H}{[H, H]} \end{array}$$

### Esercizio 116

Indicando con  $Z(X)$  il centro di  $X$ ,

- Mostrare che non esiste un funtore  $F : \mathbf{Rng} \rightarrow \mathbf{Rng}$  tale che  $\forall A \in \mathbf{Rng} \ F(A) = Z(A)$ .
- Mostrare che non esiste un funtore  $F : \mathbf{Grp} \rightarrow \mathbf{Ab}$  tale che  $\forall G \in \mathbf{Grp} \ F(G) = Z(G)$ .

Supponiamo l'esistenza di  $F$ .

- Se prendo  $i : \mathbb{C} \hookrightarrow \mathbb{H}$ , allora  $F(\mathbb{C}) = \mathbb{C}$  e  $F(\mathbb{H}) = \mathbb{R}$ . A tal punto però  $F(i) : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{R}$  che non esiste perché altrimenti

$$-1 = F(i)(-1) = F(i)(i^2) = F(i)(i)^2$$

- Consideriamo

$$\{(1), (12)\} \xrightarrow{i} S_3 \xrightarrow{\varepsilon} \{\pm 1\}$$

Allora  $\varepsilon \circ i = \text{Id}_{C_2}$ . Allora avremmo

$$0_{\text{End}(C_2)} = F(\varepsilon) \circ F(i) = F(\varepsilon \circ i) = F(\text{id}_{C_2}) = \text{id}_{C_2}$$

L'identità

$$\text{id}_C : C \rightarrow C \quad X \mapsto X \quad f \mapsto f$$

è un funtore Si possono comporre i funtori. Dati ad esempio

$$C \xrightarrow{F} D \xrightarrow{G} E$$

funtori, possiamo definire  $G \circ F : C \rightarrow E$  come  $X \mapsto G(F(X))$  e  $f \mapsto G(F(f))$  è un funtore.

La composizione è associativa e  $F \circ \text{id}_C = F = \text{id}_C \circ F$

In tal modo otteniamo una categoria  $\mathbf{Cat}$  delle categorie (piccole<sup>1</sup>)

#### Definizione 117

Un funtore  $F : C \rightarrow D$  è un isomorfismo se lo è in  $\mathbf{Cat}$ , cioè se  $\exists G : D \rightarrow C$  funtore tale che  $G \circ F = \text{id}_C = F \circ G$

#### Definizione 118: iniettivo e suriettivo

Un funtore  $F : C \rightarrow D$  è *iniettivo/suriettivo* se  $F : \text{Ob}(C) \rightarrow \text{Ob}(D)$  è *iniettivo/suriettivo*.

Nel caso in cui  $F$  sia sia iniettivo che suriettivo, è **biunivoco**.

#### Definizione 119: Fedele e pieno

$F$  è detto **fedele (pieno)** se  $\forall X, Y \in C, F : C(X, Y) \rightarrow D(F(X), F(Y))$  è iniettivo (suriettivo).

Nel caso in cui  $F$  sia sia fedele che pieno, si dice che è **pienamente fedele**

#### Esercizio 120

$F$  funtore è isomorfismo se e solo se  $F$  è pienamente fedele e biunivoco.

**Esempio 121.** Se  $C' \subseteq C$  è una sottocategoria, allora il funtore di inclusione  $i : C' \rightarrow C$  è iniettivo e fedele ed è pieno se e solo se  $C' \subseteq C$  è piena.

Ad esempio se  $\sim$  è una congruenza in  $C$ , allora il funtore quoziente  $C \rightarrow C/\sim$  è biunivoco e pieno.

**Esempio 122.** Un omomorfismo di monoidi (categorie di un oggetto) è iniettivo (suriettivo) se e solo se come funtore è fedele (pieno). In ogni caso è biunivoco.

**Esempio 123.** I funtori dimenticanti  $\mathbb{Z} - \text{Mod} \rightarrow \mathbf{Ab}$  e  $\mathbb{Z} - \mathbf{Alg} \rightarrow \mathbf{Rng}$  sono isomorfismi.

**Esempio 124.** Anche  $\text{Mod} - \mathbf{A} \cong \mathbf{A}^{\text{op}} - \text{Mod}$  ed esiste un isomorfismo (anche se non sono categorie piccole).

#### Definizione 125

Un funtore  $F : C \rightarrow D$  è **essenzialmente iniettivo/suriettivo** se la funzione ridotta

$$\text{Ob}(C)/\cong \rightarrow \text{Ob}(D)/\cong$$

è *iniettivo/suriettivo*

*Osservazione.* Se  $F$  è suriettivo allora  $F$  è essenzialmente suriettivo. L'altra implicazione non vale. Ad esempio

$$(\bullet) \longrightarrow (\bullet \rightrightarrows \bullet)$$

Nessuna delle implicazioni tra iniettiva e essenzialmente iniettiva è vera. Basti considerare

$$(\bullet) \longleftarrow (\bullet \rightrightarrows \bullet)$$

<sup>1</sup>si potrebbe anche fare di tutte le categorie, ma per motivi insiemistici/logici dovremmo introdurre gli universi di Grothendieck e fare le cose per bene. Al fine di evitare questo inutile sforzo, ci limitiamo a considerare le categorie piccole.

per essenzialmente iniettiva  $\not\Rightarrow$  iniettiva e

$$(\bullet \quad \bullet) \longrightarrow (\bullet \xleftarrow{\quad} \bullet)$$

per iniettiva  $\not\Rightarrow$  essenzialmente iniettiva.

**Proposizione 126.** Sia  $F : C \rightarrow D$  un funtore pienamente fedele. Allora  $F$  è essenzialmente iniettivo

*Dimostrazione.* Siano  $X, Y \in C$  tali che  $F(X) \cong F(Y)$  in  $D$ . Devo dimostrare che  $X \cong Y$  in  $C$ .

Sappiamo che esiste  $g : F(X) \rightarrow F(Y)$  isomorfismo in  $D$ . Poiché  $F$  è pieno esiste  $f \in C(X, Y)$  tale che  $F(f) = g$ . Analogamente  $\exists f' \in C(Y, X)$  tale che  $F(f') = g^{-1}$ .

$$F(f' \circ f) = F(f') \circ F(f) = g^{-1} \circ g = 1_{F(X)=F(1_X)}$$

Se  $F$  è fedele, allora  $f' \circ f = 1_X$  e analogamente  $f \circ f' = 1_Y$  da cui  $f$  è isomorfismo e dunque  $X \cong Y$   $\square$

### Definizione 127: Trasformazione naturale

Siano  $F, F' : C \rightarrow D$  funtori.

Una **trasformazione naturale**  $\alpha : F \rightarrow F'$  (si può anche scrivere  $\alpha : F \Rightarrow F'$ ) è il dato di un morfismo

$$\alpha_X : F(X) \rightarrow F'(X) \text{ in } D \quad \forall X \in C$$

tale che  $\forall f : X \rightarrow Y$  morfismo di  $C$  il diagramma

$$\begin{array}{ccc} F(X) & \xrightarrow{F(f)} & F(Y) \\ \downarrow \alpha_X & & \downarrow \alpha_Y \\ F'(X) & \xrightarrow{F'(f)} & F'(Y) \end{array}$$

commuta in  $D$ , cioè  $\alpha_Y \circ F(f) = F'(f) \circ \alpha_X$

**Esempio 128.** Consideriamo i due funtori  $\text{Abel} : \mathbf{Grp} \rightarrow \mathbf{Grp}$  e  $\text{id} : \mathbf{Grp} \rightarrow \mathbf{Grp}$ . C'è una trasformazione naturale  $\alpha : \text{id} \rightarrow \text{Abel}$  definita per ogni  $G \in \mathbf{Grp}$  da

$$\begin{aligned} \alpha_G : G &\longrightarrow \overline{[G, G]} \\ a &\longmapsto \alpha_G(a) = a[G, G] \end{aligned}$$

è naturale perché  $\forall f : G \rightarrow H$  in  $\mathbf{Grp}$  il diagramma

$$\begin{array}{ccc} G & \xrightarrow{f} & H \\ \downarrow \alpha_G & & \downarrow \alpha_H \\ \overline{[G, G]} & \xrightarrow{\overline{f}} & \overline{[H, H]} \end{array}$$

**Esempio 129.** Supponendo di avere  $F, F' : G \rightarrow \mathbf{Set}$  funtori ( $G$  gruppo visto come categoria con un oggetto), cioè  $G$ -insiemi (azioni di  $G$  su insiemi). Allora una trasformazione naturale  $\alpha : F \rightarrow F'$  è un morfismo di  $G$ -insiemi cioè una funzione  $\alpha : F(G) \rightarrow F'(G)$  tale che  $\alpha(gx) = g\alpha(x)$  per ogni  $g \in G$  e per ogni  $x \in F(G)$ .

*Osservazione.*  $\forall F : C \rightarrow D$ ,  $\text{id}_F : F \rightarrow F$  data da  $(\text{id}_F)_X = \text{id}_{F(X)}$  per ogni  $X \in C$  è una trasformazione naturale.



### Esercizio 130

Dati  $F, F', F'' : C \rightarrow D$  funtori,  $\alpha : F \rightarrow F'$  e  $\beta : F' \rightarrow F''$  trasformazioni naturali, allora la composizione  $\beta \circ \alpha : F \rightarrow F''$  è definita da

$$\beta_X \circ \alpha_X =: (\beta \circ \alpha)_X : F(X) \rightarrow F''(X)$$

Mostrare che  $\alpha \circ \beta$  è una trasformazione naturale

La composizione dell'esercizio precedente è anche detta composizione verticale di trasformazioni naturali, per via di questo disegno esplicativo:

$$\begin{array}{ccc} & F & \\ & \downarrow \alpha & \\ C & \xrightarrow{F} & D \\ & \downarrow \beta & \\ & F'' & \end{array}$$

Considerando funtori e trasformazioni naturali, si ottiene (assumiamo sempre  $C$  piccola) la categoria  $\mathbf{Fun}(C, D)$  (anche denotata  $D^C$ ) con oggetti i funtori  $C \rightarrow D$ , morfismi le trasformazioni naturali e composizione la composizione verticale.

### Definizione 131

Data una categoria  $C$ , la categoria dei morfismi di  $C$  è

$$\mathbf{Mor}(C) := \mathbf{Fun}(\cdot \rightarrow \cdot, C)$$

che ha come oggetti esattamente  $\{f : X \rightarrow Y : f \text{ morfismo di } C\}$  e trasformazioni naturali date da  $(X \xrightarrow{f} Y) \rightarrow (X' \xrightarrow{f'} Y')$  è data da  $(g : X \rightarrow X', h : Y \rightarrow Y')$  tale che

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{f} & Y \\ \downarrow g & & \downarrow h \\ X' & \xrightarrow{f'} & Y' \end{array}$$

### Definizione 132

Date  $F, G : C \rightarrow D$  funtori,  $\alpha : F \rightarrow G$  trasformazione naturale, allora  $\alpha$  è *isomorfismo* (naturale o di funtori) se è isomorfismo in  $\mathbf{Fun}(C, D)$  cioè se  $\exists \beta : G \rightarrow F$  trasformazione naturale tale che  $\beta \circ \alpha = \text{id}_F$ ,  $\alpha \circ \beta = \text{id}_G$ .

In tal caso  $F$  e  $G$  si dicono *isomorfi* (denotato  $F \cong G$ ).

*Osservazione.*  $\cong$  di funtori è una relazione di equivalenza

**Esempio 133.** Il primo gruppo di omologia si può vedere come l'abelianizzato del gruppo fondamentale. In linguaggio categorico abbiamo

$$\begin{array}{ccc} \mathbf{Top}_* & \xrightarrow{\pi_1} \mathbf{Grp} & \xrightarrow{\text{Abel}} \mathbf{Ab} \\ & e & \\ \mathbf{Top}_* & \rightarrow \mathbf{Top} & \xrightarrow{H_1} \mathbf{Ab} \\ (X, x_0) & \mapsto \text{comp. c.p.a. a } x_0 & \end{array}$$

sono funtori isomorfi

*Osservazione.*  $F \cong F'$  allora  $F$  e  $F'$  inducono la stessa funzione  $\text{Ob}(C)/\cong \rightarrow \text{Ob}(D)/\cong$  quindi  $F$  è essenzialmente *iniettiva* / *suriettiva* se e solo se  $F'$  lo è.

### Esercizio 134

Mostrare che non necessariamente la precedente osservazione vale per le proprietà di iniettività e suriettività.

**Proposizione 135.** *Se  $F \cong F'$  allora  $F$  è fedele/pieno se e solo se  $F'$  è fedele/pieno.*

*Dimostrazione.* Sia  $\alpha : F \rightarrow F'$  l'isomorfismo. Definiamo  $\bar{\alpha} = (g \mapsto \alpha_Y \circ F(F) \circ \alpha_X^{-1})$  Per ogni  $X, Y \in C$ ,

$$\begin{array}{ccc} & D(F(X), F(Y)) & \\ & \downarrow \bar{\alpha} & \\ C(X, Y) & \begin{array}{c} \xrightarrow{F} \\ \xrightarrow{F'} \end{array} & D(F'(X), F'(Y)) \end{array}$$

□

**Proposizione 136.**  $\alpha, \beta$  trasformazioni naturali inducono una trasformazione naturale  $\beta * \alpha : G \circ F \rightarrow G' \circ F'$

$$\begin{array}{ccc} G(F(X)) & \xrightarrow{G(\alpha_X)} & G(F'(X)) \\ \downarrow \beta_{F(X)} & & \downarrow \beta_{F'(X)} \\ G'(F(X)) & \xrightarrow{G'(\alpha_X)} & G'(F'(X)) \end{array}$$

dunque  $(\beta * \alpha)_X := \beta_{F'(X)} \circ G(\alpha_X) = G'(\alpha_X) \circ \beta_{F(X)}$ .

*Dimostrazione che è una trasformazione naturale.* Vogliamo mostrare che  $b * a$  è naturale, cioè  $\forall f : X \rightarrow Y$  in  $C$  il diagramma

$$\begin{array}{ccc} G(F(X)) & \xrightarrow{G(F(f))} & G(F(Y)) \\ \downarrow (\beta * \alpha)_X & & \downarrow (\beta * \alpha)_Y \\ G'(F(X)) & \xrightarrow{G'(F(f))} & G'(F(Y)) \end{array}$$

commuta. Ma questo è vero perché

$$\begin{aligned} G'(F'(f)) \circ (\beta * \alpha)_X &= G'(F'(f)) \circ G'(\alpha_X) \circ \beta_{F(X)} = G'(F'(f) \circ \alpha_X) \circ \beta_{F(X)} = \\ &\stackrel{\alpha \text{ nat.}}{=} G'(\alpha_Y \circ F(f)) \circ \beta_{F(X)} = G'(\alpha_Y) \circ G'(F(f) \circ \beta_{F(X)}) = \\ &\stackrel{\beta \text{ nat.}}{=} G'(\alpha_Y) \circ \beta_{F(Y)} \circ G(F(f)) = (\beta * \alpha)_Y \circ G(F(f)) \end{aligned}$$

□

Ovviamente è chiaro che si potrebbe definire allora la categoria delle trasformazioni naturali eccetera e andare avanti all'infinito. Per assiomatizzare queste cose in realtà bisognerebbe esplicitare che abbiamo definito le “2-frecce” e che quindi siamo in una *2-categoria*

*Nota (zione).* Se  $\beta = \text{id}_G$  invece di  $\text{id}_G * \alpha$  si scrive  $G \circ \alpha$  (dunque con  $(G \circ \alpha)_X = G(\alpha_X)$ ). Se  $\alpha = \text{id}_F$  invece di  $\beta * \text{id}_F$  si scrive  $\beta \circ F$  (con  $(\beta \circ F)_X = \beta_{F(X)}$ ). In generale

$$\beta * \alpha = (\beta \circ F') \circ (G \circ \alpha) = (G' \circ \alpha) \circ (\beta \circ F)$$

*Osservazione.* Se  $\alpha, \beta$  sono isomorfismi, allora  $\beta * \alpha$  è isomorfismo. Questo significa che se

$$F \cong F', \quad G \cong G' \implies G \circ F \cong G' \circ F'$$

cioè l'isomorfismo di funtori è una congruenza su  $\mathbf{Cat}$  e quindi si ottiene la categoria  $\mathbf{Cat}/\cong$

### Definizione 137: Equivalenza

Un funtore  $F : C \rightarrow D$  è un'equivalenza se  $\exists G : D \rightarrow C$  funtore tale che  $G \circ F \cong \text{id}_C$  e  $F \circ G \cong \text{id}_D$ .

Un tale  $G$  si dice un *quasi-inverso* di  $F$ .

*Osservazione.*  $F$  è un'equivalenza se e solo se  $\bar{F}$  in  $\mathbf{Cat}/\cong$  è un isomorfismo.

Segue che se  $F \cong F'$ , allora  $F$  è un'equivalenza se e solo se  $F'$  è un'equivalenza e un quasi-inverso di  $F$  è unico a meno di isomorfismo e l'equivalente di categorie è una relazione di equivalenza su  $\mathbf{Cat}$

### Definizione 138: Scheletro

Una sottocategoria piena  $C' \subseteq C$  è detta *scheletro* se  $\forall X \in C, \exists ! X' \in C'$  tale che  $X \cong X'$

**Lemma 139.** Sia  $F : C \rightarrow D$  un funtore, e si supponga che  $\forall X \in C, \alpha_X : F(X) \rightarrow F'(X)$  sia un isomorfismo in  $D$ . Allora  $F' : \text{Ob}(C) \rightarrow \text{Ob}(D)$  Si estende in modo unico a un funtore  $F' : C \rightarrow D$  tale che  $\alpha : F \rightarrow F'$  è isomorfismo.

### Teorema 140: Finalmente un teorema

Un funtore  $F : C \rightarrow D$  è un'equivalenza se e solo se  $F$  è pienamente fedele e essenzialmente suriettivo

*Osservazione.* Non è necessario aggiungere l'ipotesi che  $F$  sia essenzialmente iniettivo perché come mostrato prima pienamente fedele implica essenzialmente iniettivo (ma non essenzialmente suriettivo).

**Esempio 141.** Supponiamo che  $C' \subseteq C$  sia una sottocategoria piena. Allora il funtore di inclusione  $C' \hookrightarrow C$  è pienamente fedele ed è essenzialmente suriettivo (quindi è un'equivalenza) se e solo se  $\forall X \in C$  esiste  $X' \in C'$  tale che  $X \cong X'$ .

*Dimostrazione.*

$\implies$  Sia  $G : D \rightarrow C$  un quasi-inverso di  $F$ . Allora  $F \circ G \cong \text{id}_D$  che è essenzialmente suriettivo, e dunque  $F$  è essenzialmente suriettivo. D'altra parte lo stesso  $F \circ G$  è fedele, e dunque  $G$  è fedele.

Ora, per ogni  $X, Y \in C$ ,

$$C(X, Y) \xrightarrow{F_{X,Y}} D(F(X), F(Y)) \xrightarrow{G_{F(X), F(Y)}}^{\text{inj}} C(G(F(X)), G(F(Y)))$$

poiché la composizione è biunivoca e  $G$  è fedele, allora entrambi devono essere biunivoci, ossia in particolare  $F$  è pienamente fedele.

$\Leftarrow$  Consideriamo prima il caso di un'inclusione  $C' \subseteq C$  sottocategoria piena tale che  $\forall X \in C$  esista  $X' \in C'$  tale che  $X \cong X'$ . Sia  $I : C' \rightarrow C$  il funtore di inclusione (pienamente fedele e essenzialmente suriettivo).

Allora  $\forall X \in C$  scelto (AoC) un isomorfismo  $\alpha_X : X \rightarrow \tilde{P}(X) \in C'$  e se  $X \in C'$  in particolare prendiamo  $\alpha_X = 1_X$ . Applico ora il lemma 139 con  $F = \text{id}_C$  e dunque  $\exists!$  estensione di  $\tilde{P}$  a un funtore  $\tilde{P} : C \rightarrow C'$  tale che  $\alpha : \text{id}_C \rightarrow \tilde{P}$  è isomorfismo. Allora  $\exists! P : C \rightarrow C'$  funtore tale che  $\tilde{P} = I \circ P$  e  $P$  è un quasi-inverso di  $I$  poiché  $I \circ P = \tilde{P} \cong \text{id}_C$  e  $P \circ I = \text{id}_{C'}$ .

In generale, dato  $F : C \rightarrow D$  pienamente fedele. Siano allora  $I : C' \rightarrow C$  e  $J : D' \rightarrow D$  due scheletri. Per il caso qui fatto  $I, J$  sono equivalenze e siano  $P : C \rightarrow C'$  quasi-inverso di  $I$  e  $Q : D \rightarrow D'$  quasi-inverso di  $J$ .

$$\begin{array}{ccc} C & \xrightarrow{F} & D \\ P \downarrow \uparrow I & & J \downarrow \uparrow Q \\ C' & \xrightarrow{F'} & D' \end{array}$$

Sia  $F' := Q \circ F \circ I : C' \rightarrow D'$  come nel diagramma. Allora  $I, F, Q$  sono pienamente fedeli e essenzialmente suriettivi ( $I$  per definizione,  $F$  per ipotesi e  $Q$  perché è un'equivalenza e vale il punto ( $\Rightarrow$ )) dunque  $F'$  è pienamente fedele e essenzialmente suriettivo.

$F'$  è essenzialmente biunivoco,  $C'$  e  $D'$  sono scheletri, dunque  $F'$  è biunivoco, quindi isomorfismo e quindi equivalenza.

$$F = \text{id}_D \circ F \circ \text{id}_C \cong J \circ Q \circ F \circ I \circ P = J \circ F' \circ P$$

equivalenza perché lo sono  $J, F'$  e  $P$

□

**Esempio 142.** Sia  $\sim$  una relazione d'equivalenza su un insieme  $X$  che vedo come categoria  $C$  con  $\text{Ob}(C) = X$  e  $C(x, y) \neq \emptyset \iff x \sim y$ .

Il funtore  $C \rightarrow X/\sim$  (categoria discreta) definito da  $x \mapsto \bar{x}$  è un'equivalenza poiché pienamente fedele e essenzialmente suriettiva.

### Esercizio 143

Mostrare che ogni categoria equivalente a una categoria discreta è una relazione di equivalenza, ossia una categoria dove  $\forall X, Y \in C, C(X, Y) \neq \emptyset \iff x \sim y$  per una qualche  $\sim$  relazione di equivalenza.

## 2.1 Categorie preaddittive

### Definizione 144: Categoria preadditiva

Una categoria *preadditiva* è una categoria  $\mathcal{A}$  con una struttura di gruppo abeliano (notazione: additivo) su  $\mathcal{A}(X, Y)$  per ogni  $X, Y \in \mathcal{A}$  ed è tale che la composizione di morfismi sia  $\mathbb{Z}$ -bilineare, ossia

$$g \circ (f + f') = g \circ f + g \circ f' \quad \text{e} \quad (g + g') \circ f = g \circ f + g' \circ f$$

per ogni  $X, Y, Z \in \mathcal{A}$ ,  $f, f' \in \mathcal{A}(X, Y)$  e  $g, g' \in \mathcal{A}(Y, Z)$ .

*Osservazione.* Si dice anche che  $\mathcal{A}$  è una **Ab-Categoria**. Si può studiare quando si può generare una categoria simile partendo da altre categorie invece di **Ab** ma non è argomento di questo corso.

Si può anche dire che  $\mathcal{A}$  è  $\mathbb{Z}$ -lineare. Più in generale  $\forall^2$  anello commutativo  $A$  una categoria  $A$ -lineare è una categoria  $\mathcal{A}$  con una struttura di  $A$ -modulo su  $\mathcal{A}(X, Y)$  tale che la composizione sia  $A$ -bilinare.

**Proposizione 145.** *Se  $A$  è non commutativo, allora  $\forall a, b \in A$  e  $\forall f : X \rightarrow Y$  morfismo di  $\mathcal{A}$ ,*

$$(ab)f = (ba)f$$

*Dimostrazione.*

$$(ab)f = a(bf) = a((bf) \circ 1_X) = (bf) \circ (a1_X) = f \circ (b(a1_X)) = f \circ (ba)1_X = (ba)f$$

□

**Esempio 146.** Sia  $A$  un anello, allora  $A\text{-Mod}$  è preadditiva. Infatti per ogni  $M, N \in (A\text{-Mod})$ ,  $A\text{-Mod}(M, N) = \text{Hom}_A(M, N)$  è un gruppo abeliano e  $\circ$  è  $\mathbb{Z}$ -bilinare. Se  $A$  è commutativo, allora  $A\text{-Mod}$  è anche  $A$ -lineare. Più in generale se  $B$  è una  $A$ -algebra allora  $B\text{-Mod}$  è  $A$ -lineare.

*Osservazione.* Sia  $X \in \mathcal{A}$  categoria  $A$ -lineare (quindi  $A$  commutativo). Allora  $\text{End}_{\mathcal{A}}(X)$  è una  $A$ -algebra. Infatti  $(\text{End}_{\mathcal{A}}(X), \circ)$  è un monoide e  $\text{End}_{\mathcal{A}}$  è  $A$ -modulo e  $\circ$  è  $A$ -lineare.

Quindi le categorie  $A$ -lineari con un solo oggetto sono  $A$ -algebre. In particolare **le categorie preadditive con un solo oggetto sono anelli.**

*Osservazione.* Sia  $\mathcal{A}$  preadditiva, allora  $\mathcal{A}^{op}$  è preadditiva con la stessa struttura di gruppo abeliano su  $\mathcal{A}^{op}(X, Y) = \mathcal{A}(Y, X)$  per ogni  $X, Y \in \mathcal{A}$ .

*Osservazione.* Se  $\mathcal{A}$  è preadditiva, allora  $\mathcal{A}' \subseteq \mathcal{A}$  sottocategoria tale che  $\mathcal{A}'(X, Y) < \mathcal{A}(X, Y)$  per ogni  $X, Y \in \mathcal{A}'$ , allora  $\mathcal{A}'$  è preadditiva. In particolare la condizione è sempre verificata per le categorie piene.

Sia  $\mathcal{A}$  preadditiva,  $\sim$  una congruenza tale che  $\forall X, Y \in \mathcal{A}, \forall f, f', g \in \mathcal{A}(X, Y)$  allora  $f \sim f' \implies f + g \sim f' + g$ . In tale ipotesi  $\mathcal{A}/\sim$  è preadditiva con  $\bar{f} + \bar{g} = \overline{f + g}$ .

Data una tale congruenza, sia  $\forall X, Y \in \mathcal{A}$

$$\mathfrak{I}(X, Y) = \{f \in \mathcal{A}(X, Y) : f \sim 0\}$$

e indichiamo con  $\mathfrak{I} \subseteq \mathcal{A}$  la collezione di tutti gli  $\mathfrak{I}(X, Y)$ . Allora vale la proprietà di ideale, cioè dati  $f, g$  morfismi di  $\mathcal{A}$  componibili,

$$f \circ \mathfrak{I} \circ g \in \mathfrak{I} \implies g \circ f \in \mathfrak{I}$$

Se per esempio  $f \in \mathfrak{I}$  ossia  $f \sim 0$ , allora  $g \circ f \sim g \circ 0 = 0$  e dunque  $g \circ f \in \mathfrak{I}$ .

Arriviamo dunque alla seguente definizione

#### Definizione 147

Definiamo un ideale  $\mathfrak{I}$  in una categoria preadditiva  $\mathcal{A}$  come  $\mathfrak{I}(X, Y) < \mathcal{A}(X, Y)$  per ogni  $X, Y \in \mathcal{A}$  tale che

$$f \in \mathfrak{I} \circ g \in \mathfrak{I} \implies g \circ f \in \mathfrak{I}$$

<sup>2</sup>normalmente in mezzo alla frase così avrei scritto esplicitamente “per ogni” ma trovavo divertente la quantità di  $\mathcal{A}$  e di  $A$  nella frase quindi ho valutato simpatico aggiungere anche un  $\forall$

Viceversa, dato  $\mathfrak{I} \subseteq \mathcal{A}$  ideale, si ottiene una congruenza  $\sim$  su  $\mathcal{A}$  definito da

$$f \sim f' \iff f' - f \in \mathfrak{I}(X, Y) \quad \forall X, Y \in \mathcal{A} \quad \forall f, f' \in \mathcal{A}(X, Y)$$

ed è tale che  $f \sim f' \implies f + g \sim f' + g$ .

In tali ipotesi si può anche denotare  $\mathcal{A}/\mathfrak{I}$  invece di  $\mathcal{A}/\sim$ .

Una categoria  $\mathcal{C}$  può non avere nessuna struttura di categoria preadditiva (ad esempio se  $\exists X, Y \in \mathcal{C}$  tale che  $\mathcal{C}(X, Y) = \emptyset$  o averne più di una.

**Esempio 148.** G Possiamo pensare ad anelli  $A$  e  $B$  tali che  $(A, \cdot) \cong (B, \cdot)$  e  $(A, +) \not\cong (B, +)$ .

Ad esempio possiamo prendere  $A = \mathbb{Z}/4\mathbb{Z}$  e  $B = \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}[X]/(X^2)$ . Allora evidentemente

$$(A, +) \cong C_4 \not\cong C_2 \times C_2 \cong B$$

ma gli elementi diversi da 0 e 1 di  $A$  sono  $\bar{2}$  e  $\bar{3}$  e sono tali che  $\bar{2}^2 = \bar{0}$ ,  $\bar{3}^2 = \bar{1}$  e  $\bar{2} \cdot \bar{3} = \bar{2}$ . Similmente in  $B$  abbiamo che  $\bar{X}^2 = \bar{0}$ ,  $\bar{1} + \bar{X}^2 = \bar{1}$  e  $\bar{X} \cdot \bar{1} + \bar{X} = \bar{X}$

### Definizione 149

Un funtore  $F : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$  tra categorie preadditive è additivo se

$$F_{X,Y} : \mathcal{A}(X, Y) \rightarrow \mathcal{B}(F(X), F(Y))$$

è omomorfismo di gruppi  $\forall X, Y \in \mathcal{A}$ .

Più in generale  $F : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$  tra categorie  $A$ -lineari è detto  $A$ -lineare se  $F_{X,Y}$  è  $A$ -lineare  $\forall X, Y \in \mathcal{A}$ .

**Esempio 150.** Sia  $\mathcal{A}' \subseteq \mathcal{A}$  sottocategoria tale che  $\mathcal{A}'(X, Y) \subseteq \mathcal{A}(X, Y)$  per ogni  $X, Y \in \mathcal{A}'$ . Allora l'inclusione  $\mathcal{A}' \rightarrow \mathcal{A}$  è additivo.

**Esempio 151.** Se  $\mathcal{A}$  è preadditiva e  $\mathfrak{I} \subseteq \mathcal{A}$  ideale, allora il funtore  $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}/\mathfrak{I}$  definito da  $X \mapsto X$  e  $f \mapsto \bar{f}$  è additivo.

### Esercizio 152

Sia  $F : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$  additivo tale che “ $\mathfrak{I} = \ker F$ ” cioè  $F(f) = 0$ ,  $\forall f \in \mathfrak{I}$ , allora mostrare che esiste un unico  $\bar{F} : \mathcal{A}/\mathfrak{I} \rightarrow \mathcal{B}$  funtore additivo tale che  $F = \bar{F} \circ P$

**Esempio 153.** Siano  $A, B$  anelli (categorie preadditive con un solo oggetto), allora un funtore additivo  $A \rightarrow B$  è un omomorfismo di anelli.

Più in generale per ogni anello  $A$  e per ogni  $\mathcal{A}$  categoria preadditiva un funtore additivo  $A \rightarrow \mathcal{A}$  è dato da un oggetto  $X \in \mathcal{A}$  e un omomorfismo di anelli  $A \rightarrow \text{End}_{\mathcal{A}}(X)$ . Quindi un  $A$ -modulo è un funtore additivo  $A \rightarrow \mathbf{Ab}$

**Esempio 154.** Sia  $A \rightarrow B$  un omomorfismo di anelli. Allora il funtore di restrizione degli scalari  $B\text{-Mod} \rightarrow A\text{-Mod}$  è additivo.

**Esempio 155.** Se  $\mathcal{A}$  preadditiva, allora  $\forall X \in \mathcal{A}$  ci sono funtori additivi

$$\mathcal{A}(X, -) : \mathcal{A} \rightarrow \mathbf{Ab} \quad , \quad \mathcal{A}(-, X) : \mathcal{A}^{op} \rightarrow \mathbf{Ab}$$

e in generale se  $\mathcal{A}$  è  $A$ -lineare, allora i due funtori hanno codominio  $A\text{-Mod}$  e sono  $A$ -lineari

Notare che se  $\mathcal{A} \xrightarrow{F} \mathcal{B} \xrightarrow{G} \mathcal{C}$  sono funtori additivi, allora  $G \circ F$  è additivo. Inoltre  $\text{id}_{\mathcal{A}}$  è additivo. Dunque si ottiene una categoria contenente le **categorie preadditive** (piccole) e morfismi i funtori additivi.

Sia  $\mathcal{C}$  una categoria (piccola) e  $\mathcal{A}$  una categoria preadditiva. Allora  $\text{Fun}(\mathcal{C}, \mathcal{A})$  è preadditiva (in modo naturale) con la seguente struttura

$\forall F, G \in \text{Fun}(\mathcal{C}, \mathcal{A})$  e  $\forall \alpha, \beta : F \rightarrow G$  trasformazioni naturali allora  $\alpha + \beta : F \rightarrow G$  trasformazione naturale definita  $\forall X \in \mathcal{C}$  da

$$(\alpha + \beta)_X := \alpha_X + \beta_X : F(X) \rightarrow G(X) \text{ in } \mathcal{A}$$

è naturale perché  $\forall f : X \rightarrow Y$ ,

$$\begin{array}{ccc} F(X) & \xrightarrow{F(f)} & F(Y) \\ \downarrow \alpha_X + \beta_X & & \downarrow \alpha_Y + \beta_Y \\ G(X) & \xrightarrow{G(f)} & G(Y) \end{array}$$

commuta

Se anche  $\mathcal{C}$  è preadditiva sia

$$\text{AddFun}(\mathcal{C}, \mathcal{A})$$

la sottocategoria piena di  $\text{Fun}(\mathcal{C}, \mathcal{A})$  con oggetti i funtori additivi. Allora tale categoria è preadditiva.

**Esempio 156.** Se  $A$  è anello, allora gli  $A$ -moduli sono gli oggetti di  $\text{AddFun}(A, \mathbf{Ab})$  (già visto) e in effetti  $A\text{-Mod} \cong \text{AddFun}(A, \mathbf{Ab})$ , poiché dati  $M, N : A \rightarrow \mathbf{Ab}$  funtori (cioè  $A \rightarrow \text{End}(M)$  e  $A \rightarrow \text{End}(N)$  omomorfismi di anelli) la trasformazione naturale  $\alpha : M \rightarrow N$  è data da  $\alpha : M \rightarrow N$  in  $\mathbf{Ab}$  tale che  $\forall a \in A$

$$\begin{array}{ccc} M & \xrightarrow{a} & N \\ \downarrow \alpha & & \downarrow \alpha \\ N & \xrightarrow{a} & N \end{array}$$

commuta, cioè  $a\alpha(x) = \alpha(ax)$  per ogni  $x \in M$ , ossia  $\alpha$  è omomorfismo di  $A$ -moduli.

*Osservazione.*  $\forall \mathcal{A}$  preadditiva (piccola) si può definire la categoria (preadditiva)  $\mathcal{A}\text{-Mod} := \text{AddFun}(\mathcal{A}, \mathbf{Ab})$ .

**Proposizione 157.** Siano  $\mathcal{A}, \mathcal{B}$  preadditive,  $F, G : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$  funtori tali che  $F \cong G$  e  $F$  additivo. Allora  $G$  è additivo

*Dimostrazione.* Sia  $\alpha : F \rightarrow G$  isomorfismo. Allora  $\forall f : X \rightarrow Y$  in  $\mathcal{A}$ ,  $G(f) = \alpha_Y \circ F(f) \circ \alpha_X^{-1}$ . Inoltre  $\forall f, f' : X \rightarrow Y$ ,

$$\begin{aligned} G(f + f') &= \alpha_Y \circ F(f + f') \circ \alpha_X^{-1} = \alpha_Y \circ (F(f) + F(f')) \circ \alpha_X^{-1} = \\ &= \alpha_Y \circ F(f) \circ \alpha_X^{-1} + \alpha_Y \circ F(f') \circ \alpha_X^{-1} = G(f) + G(f') \end{aligned}$$

□

*Osservazione.* Sia  $F : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$  un funtore pienamente fedele con  $\mathcal{B}$  preadditiva. Allora esiste un'unica struttura preadditiva su  $\mathcal{A}$  tale che  $F$  sia additivo

*Dimostrazione.*  $\forall X, Y \in \mathcal{A}$  voglio che  $F_{X,Y} : \mathcal{A}(X, Y) \rightarrow \mathcal{B}(F(X), F(Y))$  sia isomorfismo di gruppi, che è vero se e solo se  $\forall f, f' \in \mathcal{A}(X, Y)$

$$f + f' = F^{-1}(F(f) + F(f'))$$

(verifica lasciata in esercizio)

□

## 2.1.1 Prodotti, coprodotti, proprietà universali

### Definizione 158: Prodotto

Sia  $\mathcal{C}$  una categoria, siano  $X_\lambda \in \mathcal{C}$  con  $\lambda \in \Lambda$  insieme. Un prodotto degli  $X_\lambda$  è dato da  $X \in \mathcal{C}$  con morfismi  $p_\lambda \in \mathcal{C}(X, X_\lambda)$  per ogni  $\lambda \in \Lambda$  tale che vale la seguente proprietà universale:

$$\forall Y \in \mathcal{C}, \forall \lambda \in \Lambda, \forall f_\lambda \in \mathcal{C}(Y, X_\lambda) \quad \exists! f \in \mathcal{C}(Y, X) : f_\lambda = p_\lambda \circ f$$

o equivalentemente il seguente diagramma commuta:

$$\begin{array}{ccc} Y & & \\ f_\mu \downarrow & \searrow \exists! f & \\ X_\mu & \xleftarrow{p_\mu} & X \end{array}$$

**Proposizione 159.** Siano  $(X, \{p_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda})$  e  $(X', \{p'_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda})$  due prodotti in  $\mathcal{C}$  degli  $X_\lambda$ . Allora  $\exists! f \in \mathcal{C}(X', X)$  tale che  $p'_\lambda = p_\lambda \circ f$  per ogni  $\lambda$  e  $f$  è isomorfismo.

Viceversa se  $(X, \{p_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda})$  è un prodotto degli  $X_\lambda$  e  $f : X' \rightarrow X$  è isomorfismo, anche  $(X', \{p_\lambda \circ f\}_{\lambda \in \Lambda})$  è un prodotto degli  $X_\lambda$

*Osservazione.* Si dice che il prodotto è unico a meno di unico isomorfismo

*Dimostrazione.* (Prima parte) Esiste unico  $f$  per la proprietà universale, analogamente  $\exists! f' \in \mathcal{C}(X, X')$  tale che  $p_\lambda = p'_\lambda \circ f, \forall \lambda \in \Lambda$ . Dunque  $p_\lambda = p'_\lambda \circ f' = p_\lambda \circ f \circ f' = p_\lambda \circ 1_X$ . Ne consegue che  $1_X = f \circ f'$  per la proprietà universale e analogamente  $1_Y = f' \circ f$ .

(Seconda parte) Dati  $Y \in \mathcal{C}$  e  $g_\lambda : Y \rightarrow X'_\lambda$  devo dimostrare che  $\exists! g : Y \rightarrow X$  tale che  $g_\lambda = f_\lambda \circ f \circ g$  per ogni  $\lambda \in \Lambda$ . Ora per la proposizione universale di  $X$   $\exists! g : Y \rightarrow X$  tale che  $g_\lambda = p_\lambda \circ g$ . Voglio  $g = f \circ g'$  cioè  $g' = f^{-1} \circ g$   $\square$

*Nota (zione).* L'oggetto prodotto  $X$  si indica con

$$X =: \prod_{\lambda \in \Lambda} X_\lambda$$

**Esempio 160.** In **Set** il prodotto di insiemi  $X_\lambda$  per  $\lambda \in \Lambda$  è dato dall'usuale prodotto cartesiano con le proiezioni.

In categorie concrete come **Grp**, **Rng**, **A-Mod** un prodotto si ottiene dal prodotto in **Set** mettendo la struttura disgiuntiva componente per componente.

**Esempio 161.** In **FinSet** (la sottocategoria piena di **Set**) con oggetti insiemi finiti, non esiste  $\prod_{\lambda \in \Lambda} X_\lambda$  se  $\#\Lambda = \infty$  e  $\#X_\lambda > 1$  per ogni  $\lambda \in \Lambda$

Infatti se per assurdo supponiamo il prodotto essere  $X$  per la proprietà universale  $\forall Y \in \mathbf{FinSet}, \infty > \#\mathbf{Set}(Y, X) = \prod_{\lambda \in \Lambda} \#\mathbf{Set}(Y, X_\lambda) = \infty$

*Osservazione.* Se  $\#\Lambda = 1$  allora un prodotto di  $X_1$  è  $p_1 : X \rightarrow X_1$  in  $\mathcal{C}$  tale che  $\forall Y \in \mathcal{C}$  e  $\forall f_1 : Y \rightarrow X_1$   $\exists! f : Y \rightarrow X$  tale che  $f_1 = p_1 \circ f$

Questo è vero se  $p_1$  è isomorfismo ( $f = p_1^{-1} \circ f_1$ ). D'altra parte se  $p_1$  non è isomorfismo non fattorizza unicamente ogni altro morfismo. Quindi un prodotto di  $X \in \mathcal{C}$  è qualunque isomorfismo  $X' \rightarrow X$  (in particolare  $1_X$ ).

### Definizione 162: Oggetto terminale

Un oggetto terminale di una categoria  $\mathcal{C}$  è un prodotto vuoto in  $\mathcal{C}$ , cioè  $X \in \mathcal{C}$  tale che  $\forall Y \in \mathcal{C}$  esiste un unico  $Y \rightarrow X$  morfismo di  $\mathcal{C}$ , cioè  $\#\mathcal{C}(Y, X) = 1$



**Esempio 163.** In **Set**  $X$  è terminale se e solo se  $\#X = 1$ . Analogamente in **Grp**, **Rng**, **A-Mod** è ogni gruppo anello o **A-Mod** banale.

**Esempio 164.** Se  $G$  è un monoide non banale, allora  $G$  (come categoria con un solo oggetto) non ha oggetto terminale.

**Proposizione 165.** Una categoria  $\mathcal{C}$  ha tutti i prodotti finiti se e solo se ha oggetto terminale e i prodotti di coppie di oggetti.

*Dimostrazione.* Dimostro solo per induzione l'implicazione non ovvia.

Il passo base è dato dalla presenza dell'oggetto terminale. Per induzione supponiamo che esista il prodotto di  $n - 1$  oggetti  $X' = \prod_{i=1}^{n-1} X_i$  con  $p'_i : X' \rightarrow X_i$  per ogni  $i$ . Sia ora un elemento  $X_n$  e per ipotesi esiste  $X = X' \times X_n$  con  $p_n : X \rightarrow X_n, p' : X \rightarrow X'$ . Allora  $X$  è prodotto di tutti gli  $\{X_i\}_{i=1}^n$  con  $p_i := p'_i \circ p'$  per ogni  $i < n$ .  $\square$

### Definizione 166: Coprodotto

Un coprodotto di  $X_\lambda$  ( $\lambda \in \Lambda$ ) in una categoria  $\mathcal{C}$  è un prodotto degli  $X_\lambda$  in  $\mathcal{C}^{op}$ , cioè è dato da  $X \in \mathcal{C}$  e da morfismi  $i_\lambda \in \mathcal{C}(X_\lambda, X)$  tali che vale la proprietà universale (duale di quella del prodotto)

$$\forall Y \in \mathcal{C}, \forall \lambda \in \Lambda, \forall f_\lambda \in \mathcal{C}(X_\lambda, Y), \quad \exists! f \in \mathcal{C}(X, Y) : f_\lambda = f \circ i_\lambda$$

e viene denotato

$$X =: \coprod_{\lambda \in \Lambda} X_\lambda$$

Diagrammaticamente, il diagramma

$$\begin{array}{ccc} & Y & \\ f_\lambda \uparrow & \nwarrow \exists! f & \\ X_\lambda & \xrightarrow{i_\lambda} & \coprod_{\lambda \in \Lambda} X_\lambda \end{array}$$

commuta

Nelle categorie preaddittive si può parlare di **somma diretta** invece di coprodotto e usare  $\oplus$  invece di  $\coprod$ .

**Esempio 167.** In **Set** il coprodotto è l'unione disgiunta. In **A-Mod** è la somma diretta usuale. In **Grp** i coprodotti sono i **prodotti liberi**.

### Definizione 168: Oggetto iniziale

Un *oggetto iniziale* di  $\mathcal{C}$  è un coprodotto vuoto in  $\mathcal{C}$ , ossia  $X \in \mathcal{C}$  tale che  $\forall Y \in \mathcal{C}, \# \mathcal{C}(X, Y) = 1$

Può succedere che uno stesso oggetto sia terminale che iniziale. In tal caso per entrambe le definizioni esiste un solo morfismo da uno all'altro. Se tale morfismo è un isomorfismo allora l'oggetto è sia iniziale che terminale.

### Definizione 169: Oggetto nullo

Un oggetto sia iniziale che terminale si dice *nullo*

**Esempio 170.** In **Set**,  $\emptyset$  è iniziale (non nullo). In **Grp/A-Mod** ogni *gruppo/modulo* banale è nullo. In **Rng**,  $\mathbb{Z}$  è iniziale (non nullo)

Se  $X \in \mathcal{C}$  è nullo allora  $\forall Y, Z \in \mathcal{C}$  esiste il morfismo  $0 \in \mathcal{C}(Y, Z)$  dato dalla composizione  $Y \xrightarrow{\exists!} X \xrightarrow{\exists!} Z$ . In tal caso abbiamo che effettivamente  $f \circ 0 = 0$  e  $0 \circ g = 0$  per ogni  $f, g$  componibili con  $0$ .

**Esempio 171.** In  $\mathcal{A}$  preadditiva (in cui esiste un oggetto nullo) il morfismo  $0$  di cui sopra coincide con  $0$  dello struttura preadditiva.

#### Definizione 172: Preservazione del prodotto

Un funtore  $F : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$  *preserva un prodotto*  $(X, \{p_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda})$  di  $\{X_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda} \subseteq \mathcal{C}$  se  $(F(X), \{F(p_\lambda)\}_{\lambda \in \Lambda})$  è un prodotto degli  $F(X_\lambda)$  in  $\mathcal{D}$ .

Diremo inoltre che  $F$  *preserva i prodotti* (o *prodotti finiti*) se preserva tutti i prodotti (o prodotti finiti) che esistono in  $\mathcal{C}$

*Osservazione.* Se  $F$  preserva un prodotto degli  $X_\lambda$ , allora li preserva tutti.

#### Definizione 173: Preservazione del coprodotto

$F : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$  preserva un coprodotto di  $\mathcal{C}$  se  $F^{op}$  preserva il corrispondente prodotto di  $\mathcal{C}^{op}$

**Esempio 174.** I funtori dimenticanti  $\mathbf{Grp}/\mathbf{Rng}/\mathbf{A-Mod} \rightarrow \mathbf{Set}$  preservano i prodotti ma non i coprodotti.