

Elementi di Teoria delle Categorie

Seminario PEM di F. Troncana, sotto la supervisione del prof. R. Zunino

A.A. 2025/2026

Sommario

La Teoria delle Categorie è un formalismo nato in seno alla Topologia e Geometria Algebrica per descrivere in modo generale la struttura delle varie teorie matematiche: laddove la Teoria degli Insiemi si fonda sui concetti primitivi di "insieme" e "elemento", quello della Teoria delle Categorie è un punto di vista più strutturale, basato sui concetti di "oggetto" e "morfismo", ovvero una relazione astratta tra due oggetti.

In questa trattazione forniremo un'elementare esposizione del linguaggio e di alcune costruzioni e risultati fondamentali nella Teoria delle Categorie in modo propedeutico alla pratica matematica generale ed evidenziando alcuni aspetti di tipo fondativo.

Estensioni di ZFC

Trattando strutture molto "grandi" in un senso che renderemo preciso in seguito, per fondare propriamente la Teoria delle Categorie è necessario estendere la Teoria degli Insiemi di Zermelo-Fraenkel più l'assioma della scelta (che assumeremo sempre). L'approccio che seguiremo è un approccio che in qualche modo "limiti" la grandezza delle nostre strutture, supponendo l'esistenza di un insieme "universo" che si sostituisca alla classe di tutti gli insiemi.

Definizione 0.1: Universo di Grothendieck

Sia \mathcal{G} un insieme non vuoto. Questo si dice *universo di Grothendieck* se:

- Se $x \in y$ e $y \in \mathcal{G}$ allora $x \in \mathcal{G}$, ovvero \mathcal{G} è un insieme *transitivo*.
- Se $x, y \in \mathcal{G}$ allora $\{x, y\} \in \mathcal{G}$.
- Se $x \in \mathcal{G}$ allora $2^x \in \mathcal{G}$.
- Se $I \in \mathcal{G}$, per ogni $f : I \rightarrow \mathcal{G}$ vale $\bigcup_{i \in I} f(i) \in \mathcal{G}$, ovvero \mathcal{G} è chiuso per unioni indicizzate da un suo elemento.

Si dimostrano immediatamente le seguenti proprietà:

Proposizione 0.1: Proprietà degli universi di Grothendieck più che numerabili

Sia \mathcal{G} un universo di Grothendieck più che numerabile. Allora questo contiene:

- Tutti i sottoinsiemi di ogni suo elemento (in particolare dunque l'insieme vuoto).
- Tutti i singoletti contenenti i suoi elementi.
- Tutti i prodotti, le unioni disgiunte e le intersezioni di famiglie di suoi elementi indicizzate da un suo elemento.
- Tutte le funzioni tra due suoi elementi.
- Tutte le cardinalità strettamente minori della sua.
- Tutti i suoi sottoinsiemi la cui cardinalità è un suo elemento.

Da queste proprietà seguono due fatti strettamente correlati, ovvero che un universo di Grothendieck più che numerabile è un *modello* per ZFC e che l'esistenza di un universo di Grothendieck più che numerabile è indipendente da ZFC. Intuitivamente, il seguente assioma ci permette di trattare un universo di Grothendieck come "sostituto" della classe di tutti gli insiemi, sicuri del fatto che questo "limiti" tutta la pratica matematica "usuale".

Assioma 0.1: Assioma di Universo debole

Esiste un universo di Grothendieck più che numerabile \mathcal{G} . Tutti gli elementi di \mathcal{G} si dicono *piccoli*, mentre gli altri insiemi si dicono *grandi*. I sottoinsiemi di \mathcal{G} , piccoli o grandi che siano, si dicono *moderati*.

Osservazione 0.1: Sull'assioma di Universo debole

In realtà l'assioma 0.1 è^a più spesso assunto in una sua versione più forte, ovvero:

Assioma 0.2: Assioma di Universo

Per ogni insieme x esiste un universo di Grothendieck U tale che $x \in U$

Questo implica l'esistenza di tutta una gerarchia di è utile per trattare la Teoria delle Categorie Superiori, ma per una trattazione più elementare è sufficiente assumere l'esistenza di un solo universo, si veda [5].

^aCome si potrebbe intuire dal nome

1 Nozioni fondamentali

Definizione 1.1: Categoria e dualità

Una *categoria* \mathcal{C} è una struttura munita di due insiemi: $\text{ob } \mathcal{C}$ e $\text{hom } \mathcal{C}$, detti rispettivamente *oggetti* (o elementi) e *morfismi* (o mappe o frecce) tali che

- Ogni morfismo $f \in \text{hom } \mathcal{C}$ abbia associati due oggetti $A, B \in \text{ob } \mathcal{C}$ detti rispettivamente *dominio* e *codominio* di f , che verrà indicato come $f : A \rightarrow B$.
- Per ogni coppia di morfismi $f : A \rightarrow B$ e $g : B \rightarrow C$ sia definita la loro *composizione*, ovvero un morfismo $g \circ f : A \rightarrow C$ (spesso indicato solo con gf).
- Per ogni oggetto $X \in \text{ob } \mathcal{C}$ esista un morfismo $\text{id}_X \in \text{hom } \mathcal{C}$ detto *identità* di X tale che per ogni morfismo $f : A \rightarrow B$ valga $\text{id}_B f = f \text{id}_A = f$.
- Per ogni terna di morfismi componibili $f, g, h \in \text{hom } \mathcal{C}$, valga $h(gf) = (hg)f =: hgf$, ovvero la composizione sia *associativa*.

Fissati due oggetti $A, B \in \text{ob } \mathcal{C}$ denoteremo con $\text{hom}(A, B)$ o $\mathcal{C}(A, B)$ l'insieme dei morfismi $A \rightarrow B$ di $\text{hom } \mathcal{C}$. Per ogni categoria \mathcal{C} è definita la sua *duale* (o opposta) \mathcal{C}^{op} , i cui oggetti sono gli stessi di \mathcal{C} e i cui morfismi sono quelli di \mathcal{C} ma invertiti di direzione, ovvero ad ogni $f : A \rightarrow B$ in \mathcal{C} corrisponde un $f^{\text{op}} : B \rightarrow A$ in \mathcal{C}^{op} .

Una categoria \mathcal{C} si dice:

- *Piccola* se gli insiemi $\text{hom } \mathcal{C}$ e $\text{ob } \mathcal{C}$ (anche se vedremo sotto che la grandezza del secondo è sempre limitata dal primo) sono insiemi piccoli.
- *Grande* se non è piccola.
- *Localmente piccola* se, una volta fissati due oggetti $X, Y \in \text{ob } \mathcal{C}$, l'insieme $\text{hom}(X, Y)$ è un insieme piccolo.
- *Finita* se è piccola e l'insieme dei morfismi è un insieme finito.

Osservazione 1.1: Sulle categorie

Banalmente:

- Le identità sono uniche.
- La categoria duale è essenzialmente^a unica e vale $(\mathcal{C}^{\text{op}})^{\text{op}} = \mathcal{C}$.
- Dato che $\text{ob } \mathcal{C}$ inietta sempre in $\text{hom } \mathcal{C}$ con la mappa $X \mapsto \text{id}_X$, in generale l'insieme dei morfismi può essere arbitrariamente più grande di quello degli oggetti, dunque la grandezza di una categoria è in generale indipendente dal suo insieme degli oggetti.

Dimostrazione

Dimostriamo solo l'ultimo punto con un esempio, gli altri sono banali. Sia \mathcal{V} la categoria formata da un unico oggetto \bullet e il cui insieme dei morfismi corrisponde all'insieme dei cardinali appartenenti a \mathcal{G} , dove la composizione di due morfismi è data dalla loro somma come cardinali. Nonostante $\text{ob } \mathcal{V}$ sia il più piccolo possibile (al di là della categoria vuota), $\text{hom } \mathcal{V}$ è (dimostrabilmente) un insieme grande, dunque \mathcal{V} non solo è grande, ma non è nemmeno localmente piccola.

□

^aA meno di equivalenza come definita in 1.8

Da ora in avanti, assumeremo sempre (anche senza specificarlo) che le nostre categorie siano almeno localmente piccole per evitare problemi di fondazione.

Inoltre quando faremo riferimento ad alcune categorie specifiche, ad esempio **Set**, assumeremo sempre di intendere non la categoria di tutti gli insiemi con le funzioni tra di loro¹ ma della categoria di tutti gli insiemi piccoli con le funzioni tra di loro², e allo stesso modo intenderemo per esempio gli spazi topologici piccoli, o i gruppi piccoli e così via.

Definizione 1.2: Sottocategoria

Siano \mathcal{C} e \mathcal{D} due categorie tali che $\text{ob } \mathcal{C} \subset \text{ob } \mathcal{D}$, $\text{hom } \mathcal{C} \subset \text{hom } \mathcal{D}$ e per ogni $f, g, h \in \text{hom } \mathcal{C}$ valga

$$h = f \circ_{\mathcal{C}} g = f \circ_{\mathcal{D}} g.$$

Allora \mathcal{C} si dice una **sottocategoria** di \mathcal{D} .

Se per ogni coppia di oggetti $X, Y \in \mathcal{C}$ vale $\mathcal{C}(X, Y) = \mathcal{D}(X, Y)$, allora \mathcal{C} si dice **piena**.

Definizione 1.3: Sapori di morfismi

Sia \mathcal{C} una categoria e sia $f : A \rightarrow B$ un morfismo. Esso può dirsi:

- **Monomorfismo** (o monico o mono) se la precomposizione è iniettiva, ovvero per ogni coppia di morfismi $g_1, g_2 : C \rightarrow A$ e ogni morfismo postcomponibile f vale $fg_1 = fg_2 \Rightarrow g_1 = g_2$.
- **Epimorfismo** (o epico o epi) se la postcomposizione è iniettiva, ovvero se per ogni coppia di morfismi $g_1, g_2 : B \rightarrow C$ e ogni morfismo precomponibile f vale $g_1f = g_2f \Rightarrow g_1 = g_2$.
- **Endomorfismo** (o endo) se $A = B$.
- **Sezione** (o split mono) se ha un'inversa sinistra, ovvero se esiste un morfismo $g : B \rightarrow A$ tale che $gf = \text{id}_A$.
- **Retrazione** (o split epi) se ha un'inversa destra, ovvero se esiste un morfismo $g : B \rightarrow A$ tale che $fg = \text{id}_B$.
- **Isomorfismo** (o iso) se ha un'inversa destra e sinistra. In particolare, A e B si dicono **isomorfi** (attraverso f) e li indicheremo con $f : A \cong_{\mathcal{C}} B$ omettendo usualmente $f \circ \mathcal{C}$.
- **Automorfismo** (o auto) se è iso e endo.

Osservazione 1.2: Sui morfismi

Valgono le seguenti:

- Le sezioni sono mono.
- Le retrazioni sono epi.
- $\text{iso} \Leftrightarrow (\text{split mono} \wedge \text{epi}) \Leftrightarrow (\text{mono} \wedge \text{split epi}) \Rightarrow (\text{epi} \wedge \text{mono})$, ma nell'ultimo caso non vale l'implicazione inversa.
- Tutte le inverse sono uniche quando esistono.
- Un mono è un epi nella categoria opposta e viceversa.

Dimostrazione

¹Che non sarebbe affatto una categoria per come le abbiamo definite

²Possiamo farlo in quanto \mathcal{G} contiene automaticamente tutti gli insiemi costruiti a partire dall'insieme vuoto e iterando operazioni di unione, intersezione e passaggio alle parti, dunque di fatto tutti gli insiemi che si usano nella normale pratica matematica

Forniamo solo due esempi di morfismi che sono epici e monici ma non isomorfismi (le altre verifiche sono assolutamente automatiche):

- Consideriamo in \mathbf{Haus}^a l'inclusione $\iota : [0, 1] \cap \mathbb{Q} \hookrightarrow [0, 1]$ (entrambi con la topologia euclidea); questa è chiaramente monica in quanto iniettiva, ed è epica in quanto una funzione continua in \mathbf{Haus} è completamente determinata dal suo valore su un sottospazio denso, ma non è iso dato che non è suriettiva.
- Consideriamo la categoria

$$\text{id} \circlearrowleft \bullet \xrightarrow{f} \bullet \circlearrowright \text{id}$$

Dato che a destra o sinistra possiamo comporre solo con l'identità, f è sia monico che epico, ma non è iso in quanto non ha inversa.

□

^aCategoria degli spazi topologici di Hausdorff, ovvero T_2 , e delle funzioni continue

Definizione 1.4: Oggetti iniziali e finali

Sia \mathcal{C} una categoria e sia I un oggetto.

I si dice **oggetto iniziale** se per ogni oggetto X di \mathcal{C} esiste un unico morfismo $\iota_X : I \rightarrow X$

I si dice **oggetto finale** se è l'oggetto iniziale di \mathcal{C}^{op} , o equivalentemente se per ogni oggetto X di \mathcal{C} esiste un unico morfismo $\zeta_X : X \rightarrow I$.

Se I è sia finale che iniziale, si dice **oggetto zero**.

Proposizione 1.1: Unicità di oggetti iniziali e finali

Se una categoria \mathcal{C} ammette un oggetto iniziale (o finale o zero), questo è essenzialmente unico.

Definizione 1.5: Funtore

Siano \mathcal{C} e \mathcal{D} due categorie. Un **funtore covariante** $F : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$ consiste in due mappe $F : \text{ob } \mathcal{C} \rightarrow \text{ob } \mathcal{D}$ e $F : \text{hom } \mathcal{C} \rightarrow \text{hom } \mathcal{D}$ che rispettino la composizione, ovvero:

- Per ogni morfismo $f : X \rightarrow Y$ vale $Ff : FX \rightarrow FY$.
- Per ogni oggetto $X \in \text{ob } \mathcal{C}$ vale $F \text{id}_X = \text{id}_{FX}$.
- Per ogni coppia di morfismi componibili f, g in $\text{hom } \mathcal{C}$ vale $F(gf) = FgFf$.

Un **funtore controvariante** da \mathcal{C} a \mathcal{D} è un funtore covariante $F : \mathcal{C}^{\text{op}} \rightarrow \mathcal{D}$. Anche se l'espressione "un funtore controvariante $\mathcal{C}^{\text{op}} \rightarrow \mathcal{D}$ " tecnicamente indicherebbe un funtore covariante $\mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$, la useremo quasi sempre per indicare un funtore controvariante $\mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$, ovvero una controvarianza specificata due volte non farà una covarianza.

Un funtore si dice:

- **Fedele** se per ogni $X, Y \in \text{ob } \mathcal{C}$ la sua restrizione $F_{X,Y} : \mathcal{C}(X, Y) \rightarrow \mathcal{D}(FX, FY)$ è iniettiva.
- **Pieno** se per ogni $X, Y \in \text{ob } \mathcal{C}$ la sua restrizione $F_{X,Y} : \mathcal{C}(X, Y) \rightarrow \mathcal{D}(FX, FY)$ è suriettiva.
- **Pienamente fedele** se è pieno e fedele.
- **Essenzialmente suriettivo sugli oggetti** se per ogni oggetto $Y \in \mathcal{D}$ esiste un oggetto $X \in \mathcal{C}$ tale che $FX \cong_{\mathcal{D}} Y$

Se $F : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$ e $G : \mathcal{D} \rightarrow \mathcal{E}$ sono due funtori, la loro composizione $GF : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{E}$ è un funtore

Proposizione 1.2: Riflessione di isomorfismi

Sia $F : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$ un funtore. Se $f : X \cong Y$, allora $Ff : FX \cong FY$.

Se F è pienamente fedele e $g : FX \cong FY$, allora $X \cong Y$.

Dimostrazione

La prima implicazione è banale, dunque assumiamo che F sia pienamente fedele e $g : FX \cong FY$ sia un isomorfismo; dato che la mappa $\varphi := F_{X,Y} : \mathcal{C}(X,Y) \rightarrow \mathcal{D}(FX,FY)$ è una biezione, esiste $f : X \rightarrow Y$ tale che $\varphi(f) = g$, dunque definiamo $f' := \varphi^{-1}(g^{-1})$ e dimostriamo che è un'inversa sinistra (dimostrare che è un'inversa destra è analogo). Dato che F è un funtore, vale

$$f'f = \varphi^{-1}(\varphi(f'f)) = \varphi^{-1}(\varphi(f')\varphi(f)) = \varphi^{-1}(g^{-1}g) = \varphi^{-1}(\text{id}_{FX}) = \text{id}_X$$

□

Adesso faremo una cosa un po' buffa, ovvero definiremo il prodotto di categorie come definiremmo normalmente il prodotto cartesiano di insiemi e più tardi lo useremo per definire il prodotto in categorie generali.

Definizione 1.6: Categoria prodotto e bifuntore

Siano \mathcal{C} e \mathcal{D} due categorie. Definiamo la **categoria prodotto** $\mathcal{C} \times \mathcal{D}$ di \mathcal{C} e \mathcal{D} come la categoria i cui oggetti sono le coppie ordinate di un oggetto di \mathcal{C} e uno di \mathcal{D} e dove

$$\text{hom}((A,B), (C,D)) = \{(f,g) : f \in \mathcal{C}(A,C), g \in \mathcal{D}(B,D)\}.$$

Una categoria prodotto è naturalmente munita di due funtori $P_I : \mathcal{C} \times \mathcal{D} \rightarrow I$ con $I = \mathcal{C}, \mathcal{D}$, detti **proiezioni**, tali che

$$P_{\mathcal{C}}((f,g) : (A,B) \rightarrow (C,D)) = (f : A \rightarrow C) \quad \text{e} \quad P_{\mathcal{D}}((f,g) : (A,B) \rightarrow (C,D)) = (g : B \rightarrow D).$$

Un funtore $F : \mathcal{C} \times \mathcal{D} \rightarrow \mathbb{E}$ si dice **bifuntore**.

Perchè "spostiamo" il prodotto cartesiano alle categorie? Perchè spesso quando lavoriamo in qualche categoria ci risulta più agevole una definizione più "intrinseca" di prodotto, oppure abbiamo prodotti diversi: in **Rel**³ il prodotto "categorico" è dato dall'unione disgiunta, nonostante **Set** sia una sua sottocategoria e in questa il prodotto sia l'usuale prodotto cartesiano.

Abbiamo visto che i morfismi sono trasformazioni tra oggetti, mentre i funtori sono trasformazioni tra morfismi. Introduciamo ora un ulteriore "livello" di frecce, le trasformazioni naturali, ovvero trasformazioni tra funtori.

Definizione 1.7: Trasformazione naturale

Siano \mathcal{C}, \mathcal{D} categorie e siano $F, G : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$ due funtori.

Una **trasformazione naturale** $\Phi : F \Rightarrow G$ è un insieme di morfismi $\{\Phi_X : F(X) \rightarrow G(X)\}_{X \in \text{ob } \mathcal{C}}$ tali che per ogni $f : X \rightarrow Y$ in \mathcal{C} il seguente diagramma commuti:

$$\begin{array}{ccccc} X & & F(X) & \xrightarrow{\Phi_X} & G(X) \\ \downarrow f & & \downarrow F(f) & & \downarrow G(f) \\ Y & & F(Y) & \xrightarrow{\Phi_Y} & G(Y) \end{array}$$

Una trasformazione naturale tale per cui tutti i morfismi Φ_X so isomorfismi si dice **isomorfismo naturale**.

Definizione 1.8: Equivalenza di categorie

Siano \mathcal{C} e \mathcal{D} due categorie e siano $F : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$ e $G : \mathcal{D} \rightarrow \mathcal{C}$ due funtori.

La coppia (F, G) si dice **equivalenza di categorie** tra F e G se esistono due isomorfismi naturali

$$\text{id}_{\mathcal{C}} \cong GF \quad \text{e} \quad \text{id}_{\mathcal{D}} \cong FG.$$

Proposizione 1.3: Caratterizzazione per un'equivalenza di categorie

Sia $F : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$ un funtore. Questo definisce un'equivalenza di categorie se e solo se è pienamente fedele ed essenzialmente suriettivo sugli oggetti.

³Categoria degli insiemi e delle relazioni

Definizione 1.9: Funtori aggiunti

Siano $F : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$ e $G : \mathcal{D} \rightarrow \mathcal{C}$ due funtori. Questi si dicono **aggiunti** (rispettivamente sinistro e destro all'altro) se esiste un isomorfismo:

$$\mathcal{D}(Fc, d) \cong \mathcal{C}(c, Gd)$$

Naturale per ogni $c \in \mathcal{C}$ e $d \in \mathcal{D}$. Scriveremo $F \dashv G$ per indicare che F è aggiunto sinistro a G e che G è aggiunto destro a F .

2 Lemma di Yoneda e conseguenze

Un risultato assolutamente centrale in Teoria delle Categorie è il lemma di Yoneda, una versione "categoriale" del teorema di Cayley in Teoria dei Gruppi⁴.

Definizione 2.1: Categoria dei funtori

Siano \mathcal{C}, \mathcal{D} due categorie.

Definiamo la categoria $\mathcal{D}^{\mathcal{C}}$, che spesso denoteremo con $[\mathcal{C}, \mathcal{D}]$, la **categoria dei funtori** da \mathcal{C} a \mathcal{D} , i cui oggetti sono i funtori covarianti e i cui morfismi sono le trasformazioni naturali con la **composizione verticale**: definiamo per $\mu : F \rightarrow G$ e $\nu : G \rightarrow H$ la loro composizione verticale $\nu\mu : F \rightarrow H$ col seguente diagramma:

$$\begin{array}{ccccc} X & & F(X) & \xrightarrow{\mu_X} & G(X) & \xrightarrow{\nu_X} & H(X) \\ \downarrow f & & \downarrow Ff & & \downarrow Gf & & \downarrow Hf \\ Y & & F(Y) & \xrightarrow{\mu_Y} & G(Y) & \xrightarrow{\nu_Y} & H(Y) \end{array}$$

$(\nu\mu)_X$ (curved arrow from $F(X)$ to $H(X)$)
 $(\nu\mu)_Y$ (curved arrow from $F(Y)$ to $H(Y)$)

Spesso invece di scrivere $[\mathcal{C}, \mathcal{D}](F, G)$ o $\text{hom}_{[\mathcal{C}, \mathcal{D}]}(F, G)$ scriveremo $\text{Nat}(F, G)$.

Definizione 2.2: hom-funtore covariante e controvariante

Sia \mathcal{C} una categoria localmente piccola^a e sia A un oggetto di \mathcal{C} . Definiamo due funtori $h_A : \mathcal{C} \rightarrow \mathbf{Set}$ e $h^A : \mathcal{C}^{\text{op}} \rightarrow \mathbf{Set}$, detti **hom-funtori** (rispettivamente covariante e controvariante) nel seguente modo:

$$\begin{array}{ccccc} \text{hom}(A, X) & \xleftarrow{h_A} & X & \xrightarrow{h^A} & \text{hom}(X, A) \\ \downarrow h_A(f)=f \circ - & & \downarrow f & & \uparrow h^A(f)=- \circ f \\ \text{hom}(A, Y) & \xleftarrow{h_A} & Y & \xrightarrow{h^A} & \text{hom}(Y, A) \end{array}$$

Inoltre possiamo interpretare $\text{hom}(-, -)$ come un bifuntore $\mathcal{C}^{\text{op}} \times \mathcal{C} \rightarrow \mathbf{Set}$.

^aÈ vero che abbiamo detto che lo avremmo sempre assunto, ma è importante specificarlo in questo caso.

Teorema 2.1: Lemma di Yoneda covariante

Sia \mathcal{C} una categoria localmente piccola e sia $F : \mathcal{C} \rightarrow \mathbf{Set}$ un funtore covariante. Allora esiste una biezione di insiemi:

$$\text{Nat}(h_A, F) \cong F(A)$$

e questa è naturale in A e F .

Dimostrazione

Diamo uno sketch della dimostrazione, mancano alcuni dettagli come la dimostrazione della naturalità in A e F ma l'importante è lo spirito della cosa.

⁴E in effetti, il teorema di Cayley può essere ridotto ad un caso particolare del lemma di Yoneda

Sia $\Phi \in \text{Nat}(h_A, F)$. Dato che questa è naturale, il seguente diagramma commuta:

$$\begin{array}{ccccc}
 A & & h_A(A) & \xrightarrow{\quad \Phi_A \quad} & F(A) \\
 \downarrow f & & \downarrow h_A(f) & & \downarrow F(f) \\
 & & & \text{id}_A \xrightarrow{\quad \text{blu} \quad} u & \\
 & & \downarrow & \downarrow & \\
 & & f \circ \text{id}_A = f & \xrightarrow{\quad} & (Ff)(u) = \Phi_X(f) \\
 & & \downarrow & & \downarrow \\
 X & & h_A(X) & \xrightarrow{\quad \Phi_X \quad} & F(X)
 \end{array}$$

Vediamo che ci basta specificare l'assegnazione blu per determinare univocamente tutto il resto:

- Partendo da $\Phi \in \text{Nat}(h_A, F)$ ci basta specificare $\Phi \mapsto u := \Phi_A(\text{id}_A)$ elemento di $F(A)$.
- Partendo da $u \in F(A)$ costruiamo la trasformazione naturale Φ definendo per ogni $X \in \text{ob } \mathcal{C}$ il morfismo $\Phi_X(f : A \rightarrow X) := Ff(u)$.

□

Abbiamo dualmente la versione controvariante:

Corollario 2.1: Lemma di Yoneda controvariante

Sia $F : \mathcal{C}^{\text{op}} \rightarrow \mathbf{Set}$ un funtore controvariante. Allora esiste una biezione di insiemi

$$\text{Nat}(h^A, F) \cong F(A)$$

e questa è naturale in A e F .

Osservazione 2.1: Lemma di Yoneda e grandezza

In generale la biezione data da 2.1 non è una biezione tra insiemi piccoli, in quanto gli elementi di $\text{Nat}(h_A, F)$ non sono in generale insiemi piccoli. Prendiamo ad esempio il funtore dimenticante U da \mathbf{Grp}^a a \mathbf{Set} , che ad un gruppo (G, \cdot) associa l'insieme G : noi abbiamo che $\text{Nat}(h_G, U)$ è in biezione con G , ma gli elementi di $\text{Nat}(h_G, U)$ sono indicizzati dall'insieme di tutti i gruppi (piccoli), che non è un insieme piccolo e dunque questi non sono insiemi piccoli, nonostante l'insieme che li contenga sia in biezione con un insieme piccolo.

^aCategoria dei gruppi con gli omomorfismi di gruppo

Una delle più naturali applicazioni del lemma di Yoneda è l'embedding di Yoneda, fondamentale in gran parte della topologia e della geometria moderna: esso permette di identificare una categoria \mathcal{C} con una sottocategoria della cosiddetta *categoria dei prefasci su \mathcal{C}* , che è solo un altro nome per $[\mathcal{C}^{\text{op}}, \mathbf{Set}]$. Ad esempio se interpretiamo la topologia τ di uno spazio (X, τ) come una categoria, dove i morfismi sono dati dall'inclusione insiemistica, questa è completamente determinata dalle classi delle funzioni continue entranti nei (o uscenti dai) suoi aperti.

Teorema 2.2: Embedding di Yoneda covariante

Sia \mathcal{C} una categoria. Questa è equivalente ad una sottocategoria piena di $[\mathcal{C}^{\text{op}}, \mathbf{Set}]$ tramite la mappa $\mathcal{Y} : \mathcal{C} \rightarrow$

$[\mathcal{C}^{\text{op}}, \mathbf{Set}]$ definita da questo diagramma (dove abbiamo morfismi $f : A \rightarrow B$ e $g : X \rightarrow Y$ di \mathcal{C}):

$$\begin{array}{ccccc}
 \mathcal{Y}(A)(X) = h^A(X) & \xrightarrow{\quad \mathcal{Y}(f)(X) = f \circ - \quad} & & \xrightarrow{\quad} & \mathcal{Y}(B)(X) = h^B(X) \\
 \uparrow \mathcal{Y}(A)(g) = - \circ g & & (X \xrightarrow{m \circ g} A) \hookrightarrow (X \xrightarrow{f \circ m \circ g} B) & & \uparrow \mathcal{Y}(B)(g) = - \circ g \\
 & & \uparrow & & \uparrow \\
 & & (Y \xrightarrow{m} A) \hookrightarrow (Y \xrightarrow{f \circ m} B) & & \\
 \mathcal{Y}(A)(Y) = h^A(Y) & \xrightarrow{\quad \mathcal{Y}(f)(Y) = f \circ - \quad} & & \xrightarrow{\quad} & \mathcal{Y}(B)(Y) = h^B(Y)
 \end{array}$$

Dove un oggetto A di \mathcal{C} viene mandato nel funtore $h^A : \mathcal{C}^{\text{op}} \rightarrow \mathbf{Set}$ definito sopra e un morfismo $f : A \rightarrow B$ viene mandato nella sua postcomposizione, che è una trasformazione naturale da h^A a h^B come si vede nel diagramma.

Dimostrazione

Applicando il corollario 2.1 con $F = h^B$ scorrendo su $B \in \text{ob } \mathcal{C}$ otteniamo

$$\text{Nat}(h^A, h^B) \cong h^B(A), \text{ o equivalentemente, } \text{Nat}(h^A, h^B) \cong \text{hom}(A, B).$$

Vediamo che dunque l'assegnazione $A \mapsto h^A$ definisce un funtore covariante $h^\bullet : \mathcal{C} \rightarrow [\mathcal{C}^{\text{op}}, \mathbf{Set}]$ pienamente fedele (ma non essenzialmente suriettivo sugli oggetti). Restringendo h^\bullet all'immagine di \mathcal{C} in $[\mathcal{C}^{\text{op}}, \mathbf{Set}]$, otteniamo un'equivalenza di categorie (dato che la restrizione all'immagine è tautologicamente suriettiva) per la proposizione 1.3.

□

Abbiamo dualmente la versione controvariante:

Corollario 2.2: Embedding di Yoneda controvariante

Sia \mathcal{C} una categoria. Allora la sua categoria opposta \mathcal{C}^{op} è equivalente ad una sottocategoria piena di $[\mathcal{C}, \mathbf{Set}]$ tramite la mappa $\mathcal{Y}' : \mathcal{C}^{\text{op}} \rightarrow [\mathcal{C}, \mathbf{Set}]$ definita da questo diagramma (dove abbiamo morfismi $f : A \rightarrow B$ e $g : X \rightarrow Y$ di \mathcal{C}):

$$\begin{array}{ccccc}
 \mathcal{Y}'(A)(X) = h_A(X) & \xleftarrow{\quad \mathcal{Y}'(f)(X) = - \circ f \quad} & & \xleftarrow{\quad} & \mathcal{Y}'(B)(X) = h_B(X) \\
 \downarrow \mathcal{Y}'(A)(g) = g \circ - & & (A \xrightarrow{m \circ f} X) \hookleftarrow (B \xrightarrow{m} X) & & \downarrow \mathcal{Y}'(B)(g) = g \circ - \\
 & & \downarrow & & \downarrow \\
 & & (A \xrightarrow{g \circ m \circ f} Y) \hookleftarrow (B \xrightarrow{g \circ m} Y) & & \\
 \mathcal{Y}'(A)(Y) = h_A(Y) & \xleftarrow{\quad \mathcal{Y}'(f)(Y) = - \circ f \quad} & & \xleftarrow{\quad} & \mathcal{Y}'(B)(Y) = h_B(Y)
 \end{array}$$

□

Ora grazie al lemma di Yoneda possiamo dimostrare un fatto che ci servirà più tardi:

Lemma 2.1: Essenziale unicità degli aggiunti

Siano \mathcal{C}, \mathcal{D} due categorie e siano $F : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$ e $G_1, G_2 : \mathcal{D} \rightarrow \mathcal{C}$ funtori tali che $F \dashv G_1$ e $F \dashv G_2$ oppure $G_1 \dashv F$ e $G_2 \dashv F$. Allora $G_1 \cong G_2$.

Dimostrazione

Scriviamo le aggiunzioni in termini degli hom-funtori:

$$h^d(Fc) \cong h^{G_1 d}(c) \cong h^{G_2 d}(c)$$

Ottenendo dunque $\mathcal{Y} \circ G_1 \cong \mathcal{Y} \circ G_2$: dal teorema 2.2, ovvero la piena fedeltà dell'embedding di Yoneda, segue la tesi. \square

3 Limiti

Uno dei concetti più importanti in Teoria delle Categorie è quello di limite. Per definire il concetto di limite dobbiamo dare la definizione formale di diagramma in una categoria, che generalizza il concetto di famiglia indicizzata in **Set**.

Definizione 3.1: Diagramma commutativo

Siano \mathcal{J}, \mathcal{C} due categorie.

Si dice **diagramma (commutativo)** in \mathcal{C} di forma \mathcal{J} un funtore $F : \mathcal{J} \rightarrow \mathcal{C}$; \mathcal{J} si dice **forma** o **indice** del diagramma: se \mathcal{J} è finita o piccola, il diagramma F si dirà rispettivamente **finito** o **piccolo**.

La **categoria dei diagrammi** in \mathcal{C} di forma \mathcal{J} è la categoria dei funtori $[\mathcal{J}, \mathcal{C}]$.

Se in Teoria degli Insiemi definiamo una famiglia di sottoinsiemi di un insieme X indicizzata dall'insieme J come un'applicazione $J \rightarrow \mathcal{P}(X)$, qui abbiamo bisogno di un'applicazione che rispetti la struttura di categoria, ovvero un funtore: intuitivamente oltre a indicizzare gli oggetti indicizziamo anche i morfismi in modo che la composizione sia rispettata. Per la prossima definizione ci servirà di considerare un diagramma particolare, il diagramma costante $K_N : \mathcal{J} \rightarrow \mathcal{C}$ (dove N è un oggetto di \mathcal{C}) che manda ogni oggetto di \mathcal{J} in N e ogni morfismo in id_N .

Definizione 3.2: Cono e cocono

Sia \mathcal{C} una categoria, sia $F : \mathcal{J} \rightarrow \mathcal{C}$ un diagramma e sia N un oggetto di \mathcal{C} .

Si dice **cono** in \mathcal{C} su F con punta N un morfismo $\psi : K_N \rightarrow F$ di $[\mathcal{J}, \mathcal{C}]$, ovvero una famiglia di morfismi

$$\{\psi_X : N \rightarrow F(X)\}_{X \in \text{ob } \mathcal{J}} \subset \text{hom } \mathcal{C}$$

Tali che per ogni morfismo $f : X \rightarrow Y$ in \mathcal{J} il seguente diagramma commuti:

$$\begin{array}{ccc} & N & \\ \psi_X \swarrow & & \searrow \psi_Y \\ F(X) & \xrightarrow{F(f)} & F(Y) \end{array}$$

Dualmente, si dice **cocono** su F con punta N un morfismo $\psi : F \rightarrow K_N$, o equivalentemente un cono in \mathcal{C}^{op} .

Definiamo la **categoria dei coni** in \mathcal{C} su F come la categoria i cui oggetti sono i coni intesi come coppia $(N, \psi^N : K_N \rightarrow F)$ e i cui morfismi sono i cosiddetti morfismi **medianti**, ovvero i morfismi $\alpha : N \rightarrow M$ di \mathcal{C} tali per cui per ogni oggetto X di \mathcal{J} valga:

$$\psi_X^M \circ \alpha = \psi_X^N,$$

Denoteremo questa categoria come **Cone**(\mathcal{C}, F).

Ed eccoci pronti a definire i limiti.

Definizione 3.3: Limite e colimite

Sia $F : \mathcal{J} \rightarrow \mathcal{C}$ un diagramma.

Si dice **limite** (o limite proiettivo) di F in \mathcal{C} l'oggetto terminale di **Cone**(\mathcal{C}, F).

Si dice **colimite** (o limite induttivo) di F in \mathcal{C} il limite di F in \mathcal{C}^{op} , o equivalentemente l'oggetto iniziale di **Cone**(\mathcal{C}, F).

Indichiamo rispettivamente limiti e colimiti di F in \mathcal{C} come

$$\lim_{\leftarrow} F \quad \text{e} \quad \lim_{\rightarrow} F.$$

Un limite si dice rispettivamente piccolo o finito se lo è F come diagramma.

Una categoria che ammette tutti i (co)limiti piccoli si dice **(co)completa**.

Più esplicitamente⁵, possiamo definire il limite di F in \mathcal{C} come il cono (L, ψ^L) tale che per ogni altro cono (N, ψ^N) esista un unico morfismo $\lambda_N : N \rightarrow L$ tale che il seguente diagramma commuti:

$$\begin{array}{ccccc}
 & & N & & \\
 & \swarrow & \downarrow \lambda_N & \searrow & \\
 & \psi_X^N & L & \psi_Y^N & \\
 & \swarrow & \downarrow \psi_X^L & \searrow & \\
 F(X) & & F(f) & & F(Y)
 \end{array}$$

Diremo che una tale proprietà è detta **universalità**.

Il concetto di limite è uno dei concetti centrali della Teoria delle Categorie: analogamente a come sia possibile definire equivalentemente aperti, chiusi, intorno, chiusura, interno e così via in Topologia Generale, è possibile definire i funtori aggiunti in termini di limiti, i limiti in termini di funtori aggiunti ed equivalentemente tante altre costruzioni in Teoria delle Categorie.

Talvolta diremo che una categoria "ammette/ha tutti i..." facendo riferimento a dei limiti definiti su una qualche classe di diagrammi: questo significa che ogni diagramma di quella classe ammette un limite in \mathcal{C} .

Osservazione 3.1: Limiti e oggetti iniziali

Sia $F : \mathcal{J} \rightarrow \mathcal{C}$ un diagramma.

- Se \mathcal{J} ammette un oggetto iniziale I , allora $\lim_{\leftarrow} F = F(I)$.
- Dualmente, se \mathcal{J} ammette un oggetto finale Z , allora $\lim_{\rightarrow} F = F(Z)$.
- Infine, se \mathcal{J} ammette un oggetto zero 0 , allora $\lim_{\leftarrow} F = \lim_{\rightarrow} F = F(0)$.

3.1 Limiti notevoli

Presentiamo alcuni limiti di particolare importanza (in effetti delle classi di limiti) nella pratica matematica; in questa sezione, assumeremo per semplicità che \mathcal{J} sia una sottocategoria (di forma opportunamente specificata) di \mathcal{C} e $F : \mathcal{J} \hookrightarrow \mathcal{C}$ sia il funtore di inclusione: questo ci permetterà di dire semplicemente "Sia \mathcal{J} un diagramma" o parlare di $\lim_{\leftarrow} \mathcal{J}$.

Definizione 3.4: Prodotto

Sia \mathcal{C} una categoria e sia \mathcal{J} un diagramma discreto (ovvero i cui unici morfismi sono le identità). Si dice **prodotto** di \mathcal{J} in \mathcal{C} il limite di \mathcal{J} in \mathcal{C} , che indicheremo come

$$\prod_{X \in \text{ob } \mathcal{J}} X \quad \text{oppure, più semplicemente,} \quad \prod \mathcal{J}.$$

Un prodotto in \mathcal{C}^{op} si dice **coprodotto** in \mathcal{C} e lo indicheremo come $\coprod \mathcal{J}$. I morfismi $\pi_X : \prod \mathcal{J} \rightarrow X$ si dicono **proiezioni ai fattori**.

Osservazione 3.2: Sui prodotti

- Il prodotto sul diagramma vuoto è (se esiste) l'oggetto terminale di \mathcal{C} .
- Sotto gli assiomi di ZF, **Set** ammette tutti i prodotti piccoli^a se e solo se vale l'assioma della scelta.

^aOvvero quelli indicizzati da una categoria piccola

⁵Ovvero scrivendo per esteso la definizione di oggetto terminale

Definizione 3.5: Pullback o prodotto fibrato

Sia \mathcal{C} una categoria, e sia \mathcal{J} il diagramma $\{X \xrightarrow{f} Z \xleftarrow{g} Y\}$, detto *cospan*^a.

Il limite di \mathcal{J} in \mathcal{C} si dice **pullback** di \mathcal{J} , o anche **prodotto fibrato** di X e Y lungo (o su) Z .

Un pullback in \mathcal{C}^{op} si dice **pushout**.

^aE ovviamente \mathcal{J}^{op} si dirà *span*

Il pullback è una sorta di analogo categoriale delle equazioni: in molte categorie concrete⁶ il pullback di $\{X \xrightarrow{f} Z \xleftarrow{g} Y\}$ è il sottoinsieme $\{(x, y) | f(x) = g(y)\}$ di $X \times Y$ e i morfismi che lo accompagnano sono la restrizione delle proiezioni. Un altro esempio è quello del grafico di una funzione, che è il pullback del diagramma $\{X \xrightarrow{f} Y \xleftarrow{\text{id}_Y} Y\}$

Definizione 3.6: Equalizzatore

Sia \mathcal{C} una categoria e sia \mathcal{J} il diagramma

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

Si dice **equalizzatore** di f e g il limite di \mathcal{J} in \mathcal{C} , e lo indichiamo con $\text{eq}(f, g)$, come indichiamo l'unico morfismo "primitivo" del cono con $e_{f,g} : \text{eq}(f, g) \rightarrow X$.

Un equalizzatore in \mathcal{C}^{op} si dice **coequalizzatore**.

3.2 Esistenza dei limiti

Considerando l'ubiquità del concetto di (co)limite, è importante essere in grado di dimostrare che le categorie in cui si sta lavorando siano (co)complete, ma può sembrare difficile dimostrare l'esistenza del (co)limite per diagrammi piccoli di forma arbitraria. Fortunatamente il prossimo risultato ci dà una condizione necessaria e sufficiente per la (co)completezza di una categoria e ci mostra che in realtà ogni limite si può costruire "facendo prodotti e risolvendo equazioni".

Teorema 3.1: Esistenza dei limiti

Sia \mathcal{C} una categoria.

\mathcal{C} ammette tutti i prodotti piccoli ed equalizzatori per ogni coppia di morfismi se e solo se \mathcal{C} è una categoria completa.

Dimostrazione

Se \mathcal{C} è una categoria completa allora ammette ovviamente tutti i prodotti piccoli e tutti gli equalizzatori, in quanto questi sono casi di limite piccolo, dunque supponiamo che \mathcal{C} ammetta tutti i prodotti piccoli e gli equalizzatori di coppie di morfismi.

Sia $F : \mathcal{J} \rightarrow \mathcal{C}$ un diagramma piccolo e consideriamo i seguenti prodotti:

$$S := \prod_{X \in \text{ob } \mathcal{J}} F(X) \quad \text{e} \quad T := \prod_{u \in \text{hom } \mathcal{J}} F(\text{cod}(u))$$

Le cui proiezioni indicheremo rispettivamente con σ_i e τ_i .

Dato che per ogni $u \in \text{hom } \mathcal{J}$ abbiamo ovviamente $\text{cod}(u) \in \text{ob } \mathcal{J}$, S ammette mappe (precisamente le sue proiezioni) verso ogni $F(\text{cod}(u))$, dunque per la proprietà universale del prodotto esiste ed è unica $f : S \rightarrow T$ tale che il seguente diagramma commuti per ogni $u \in \text{hom } \mathcal{J}$:

$$\begin{array}{ccc} & F(\text{cod}(u)) & \\ \sigma_{F(\text{cod}(u))} \nearrow & & \nwarrow \tau_{F(\text{cod}(u))} \\ S & \xrightarrow{\quad f \quad} & T \end{array}$$

⁶Informalmente, quelle i cui oggetti sono insiemi dotati di una qualche struttura e i cui morfismi sono funzioni insiemistiche che rispettano tale struttura.

Analogamente, deve esistere ed essere unica una mappa $g : S \rightarrow T$ tale che il seguente diagramma commuti:

$$\begin{array}{ccc} S & \xrightarrow{\quad g \quad} & T \\ \downarrow \sigma_{F(\text{dom}(u))} & & \downarrow \tau_{F(\text{cod}(u))} \\ F(\text{dom}(u)) & \xrightarrow{F(u)} & F(\text{cod}(u)) \end{array}$$

Consideriamo dunque $L := \text{eq}(f, g)$ e la mappa $e_{f,g} : L \rightarrow S$ che equalizza f e g : questo è il nostro candidato limite, dobbiamo prima controllare che sia un cono definendo le proiezioni su F , ma vediamo che basta definirle nel seguente modo dato qualsiasi $u : X \rightarrow Y$ di \mathcal{J} :

$$\begin{array}{c} L \xrightarrow{\quad e_{f,g} \quad} S \xrightarrow{\quad f \quad} T \xrightarrow{\quad \tau_{F(\text{cod}(u))} \quad} F(Y) = F(\text{cod}(u)) \\ \downarrow \sigma_{F(X)} \quad \quad \quad \downarrow \sigma_{F(X)} \quad \quad \quad \downarrow \sigma_{F(X)} \\ F(X) \xrightarrow{\quad u \quad} F(Y) \end{array}$$

$\psi_{F(Y)} := \tau_{F(\text{cod}(u))} \circ f \circ e_{f,g} = \tau_{F(\text{cod}(u))} \circ g \circ e_{f,g}$
 $\psi_{F(X)} := \sigma_{F(X)} \circ e_{f,g}$

Ora dobbiamo dimostrare che è effettivamente universale: considerando un altro cono (N, φ) , le sue φ definiscono un'unica $h : N \rightarrow S$, ma dato che è un cono deve anche valere $f \circ h = g \circ h$, dunque h è una mappa equalizzante e dunque deve esistere un'unica mappa $\eta : N \rightarrow L$ tale che $h = e_{f,g} \circ \eta$.

□

Corollario 3.1: Esistenza dei colimiti

Sia \mathcal{C} una categoria.

\mathcal{C} ammette tutti i coprodotti piccoli e coequalizzatori per ogni coppia di morfismi se e solo \mathcal{C} è una categoria cocompleta.

3.3 Prodotti

Chiudiamo con una discussione di una diversa caratterizzazione del prodotto di due oggetti in una categoria.

La definizione che abbiamo dato in 3.4 è evidentemente utile quando si parla di lavorare coi prodotti nell'usuale pratica matematica, ad esempio è una definizione meno "pesante" di quella che si dà dei prodotti in **Top**⁷ o **Mble**⁸ nella maggior parte dei corsi introduttivi di Topologia Generale o Teoria della Misura. Allo stesso modo non dipende da scelte arbitrarie, come di una norma prodotto in **NormVecK**⁹ o di una misura prodotto in **Meas**¹⁰.

Tuttavia in altre applicazioni della Teoria delle Categorie, ad esempio in Topologia Algebrica o informatica teorica, può essere agevole considerare il prodotto di due oggetti non come definito intrinsecamente tramite proprietà universale, ma come un bifuntore.

Teorema 3.2: Caratterizzazione del prodotto binario

Sia \mathcal{C} una categoria localmente piccola e sia $\Delta : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{C} \times \mathcal{C}$ il funtore diagonale, ovvero l'applicazione

$$\Delta(f : X \rightarrow Y) = ((f, f) : (X, X) \rightarrow (Y, Y)).$$

Se \mathcal{C} ammette i prodotti binari, l'applicazione $\Pi : \mathcal{C} \times \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{C}$ definita da

$$\Pi((f, g) : (X, Y) \rightarrow (W, Z)) := (f \times g : X \times Y \rightarrow W \times Z)$$

definisce un funtore aggiunto destro a Δ .

Dimostrazione

⁷Categoria degli spazi topologici e delle funzioni continue

⁸Categoria di spazi e funzioni misurabili

⁹Categoria dei \mathbb{K} -spazi vettoriali normati e delle mappe lineari continue

¹⁰Categoria degli spazi con misura e delle funzioni misurabili

Osserviamo che dalle definizioni di categoria prodotto (definizione 1.6), di prodotto nella definizione 3.4 e assumendo che il prodotto in **Set** sia l'usuale prodotto cartesiano^a, la seguente catena di biezioni è verificata in **Set** per ogni A, B e C oggetti in \mathcal{C} :

$$\begin{aligned} \mathrm{hom}_{\mathcal{C}^2}(\Delta A, (B, C)) &\cong_{\mathbf{Set}} \mathrm{hom}_{\mathcal{C}^2}((A, A), (B, C)) \\ &\cong_{\mathbf{Set}} \mathrm{hom}_{\mathcal{C}}(A, B) \times \mathrm{hom}_{\mathcal{C}}(A, C) \\ &\cong_{\mathbf{Set}} \underbrace{\mathrm{hom}_{\mathcal{C}}(A, B \times C)}_{\mathcal{C}^{\mathrm{op}} \times (\mathcal{C} \times \mathcal{C}) \rightarrow \mathbf{Set}} \end{aligned}$$

Abbiamo dimostrato che Π è effettivamente un aggiunto destro^b, essenzialmente unico per il lemma 2.1, a Δ .

^aDimostrazione lasciata per esercizio al lettore

^bDovremmo dimostrare la funtorialità, ma è banale e consiste semplicemente nell'applicare le proprietà universali dei prodotti

Riferimenti bibliografici

- [1] T.-D. B. et al, *Topology: a Categorical Approach*. The MIT Press, 2020, ISBN: 9780262539357.
- [2] E. Riehl, *Category theory in context* (Aurora: Dover modern math originals). Dover Publications, 2017, ISBN: 978-0-486-82080-4.
- [3] S. Awodey, *Category Theory*, 2nd. USA: Oxford University Press, Inc., 2010, ISBN: 0199237182.
- [4] S. MacLane, *Categories for the Working Mathematician (2nd ed)* (Graduate Texts in Mathematics). Springer, 1978, ISBN: 0-387-98403-8.
- [5] S. Mac Lane, «One universe as a foundation for category theory,» in *Reports of the Midwest Category Seminar III*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1969, pp. 192–200, ISBN: 978-3-540-36150-3.