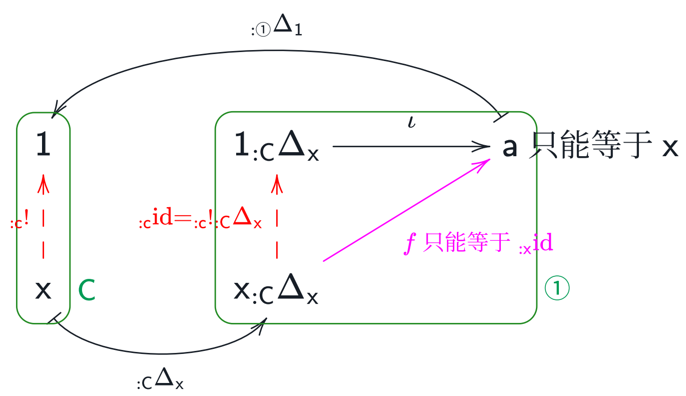
章节 01 - 03 基本概念

$\LaTeX$ Definitions are here.

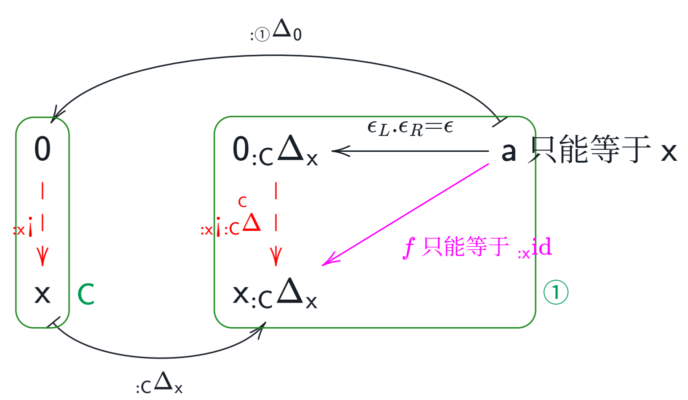
始终对象的泛性质

范畴由对象及其间箭头构成。本文重点分析**余积闭范畴** C。首先给出如下定义：

- 1 为**终对象**当且仅当对任意 C 中对象 x 都有且仅有唯一的箭头 ${}_{:x}! : x \xrightarrow{C} 1$:



- 0 为**始对象**当且仅当对任意 C 中对象 x 都有且仅有唯一的箭头 ${}_{:x}¡ : 0 \xrightarrow{C} x$:



> **Note**
>
> ${}_{:C}\Delta_x : C \xrightarrow{Cat} ①$ 为常值函子满足 ${}_{:C}\Delta_x : c \longmapsto x$。 另外还有一点：其他范畴中始终对象不一定存在。

如果范畴 C 中真的含有 0 和 1 分别作为始对象和终对象, 那么根据上述信息可知

- 形如 $1 \xrightarrow{C} 1$ 的箭头只有一个，即 ${}_{:1}\mathrm{id}$；
- 形如 $0 \xrightarrow{C} 0$ 的箭头只有一个，即 ${}_{:0}\mathrm{id}$；

元素与全局元素

对任意对象 $a, a_1, a_2, \mathrm{etc}$, $b, b_1, b_2, \mathrm{etc}$ 以及任意映射 i , 我们进行如下的规定：

- i 为 b 的**元素**当且仅当 $i\ \mathrm{tar} = b$;
- i 为 a 的**全局元素**当且仅当 $i\ \mathrm{tar} = a$ 且 $i\ \mathrm{src} = 1$
- i 不存在仅当 $i\ \mathrm{tar} = 0$ 。

> **Note**
>
> 其他范畴中刚才的断言未必成立。

箭头构成的集合

这里再给一个定义：

- $a \overset{C}{\to} b =$
  所有从 a 射向 b 的箭头构成的集 。

> ⓘ **Note**
>
> 上述断言仅对于**局部小范畴**成立，
> 在其他范畴里 $a \overset{C}{\to} b$ 未必构成集 。

箭头的复合运算

范畴 C 中特定的箭头可以进行复合运算：
对任意 C 中对象 c_1，c_2，c_3 我们都会有
$\overset{C}{\circ} : (c_1 \overset{C}{\to} c_2) \times (c_2 \overset{C}{\to} c_3) \xrightarrow{Set} (c_1 \overset{C}{\to} c_3)$
$\overset{C}{\circ} : (\quad i_1 \quad . \quad i_2 \quad) \longmapsto i_1 \overset{C}{\circ} i_2$

若我们还知道箭头 f_1，i_1，g_1 分别属于
$a_2 \overset{C}{\to} a_1$，$a_1 \overset{C}{\to} b_1$，$b_1 \overset{C}{\to} b_2$ 那么便有

- $(f_1 \overset{C}{\circ} i_1) \overset{C}{\circ} g_1 = f_1 \overset{C}{\circ} (i_1 \overset{C}{\circ} g_1)$
  说明箭头复合运算具有**结合律** 。

另外固定住一侧实参便获可得新的函数：

- $(f_1 \overset{C}{\circ} \_) : (a_1 \overset{C}{\to} \_) \xrightarrow{C \to Set} (a_2 \overset{C}{\to} \_)$
  $(f_1 \overset{C}{\circ} \_) : \quad i_1 \quad \longmapsto \quad f_1 \overset{C}{\circ} i_1$
  称作**前复合** 。下图有助于形象理解：

$$\begin{tikzcd}
a_1 \arrow[rr, bend left, "i_1 : a_1 \xrightarrow{C} b_1"] & {} \arrow[d, mapsto, "b_1^{(f_1 \overset{C}{\circ} _)}"] & b_1 \arrow[loop right, ":_{b_1} id"] \\
a_2 \arrow[u, "f_1"] \arrow[urr, bend right, "(f_1 \overset{C}{\circ} i_1) : a_2 \xrightarrow{C} b_3"'] & {} &
\end{tikzcd}$$

- $(\_ \overset{C}{\circ} g_1) : (\_ \overset{C}{\to} b_1) \xrightarrow{C \to Set} (\_ \overset{C}{\to} b_2)$
  $(\_ \overset{C}{\circ} g_1) : \quad i_1 \quad \longmapsto \quad i_1 \overset{C}{\circ} g_1$
  称作**后复合**；下图有助于形象理解：

$$\begin{tikzcd}
 & {} \arrow[dd, mapsto, "a_1^{(_ \overset{C}{\circ} g_1)}"] & b_1 \arrow[dd, "g_1"] \\
a_1 \arrow[loop left, ":_{a_1} id"] \arrow[urr, bend left, "i_1 : a_1 \xrightarrow{C} b_1"] \arrow[drr, bend right, "(i_1 \overset{C}{\circ} g_1) : a_1 \xrightarrow{C} b_2"'] & & \\
 & {} & b_2
\end{tikzcd}$$

根据上面的定义便不难得出下述结论

- $(f_1 \overset{C}{\circ} \_) \overset{C \to Set}{\circ} (\_ \overset{C}{\circ} g_1) = (\_ \overset{C}{\circ} g_1) \overset{C \to Set}{\circ} (f_1 \overset{C}{\circ} \_)$
  复合运算具有**结合律**，即后面会提到的**自然性**；
- $(\_ \overset{C}{\circ} i_1) \overset{C \to Set}{\circ} (\_ \overset{C}{\circ} g_1) = (\_ \overset{C}{\circ} (i_1 \overset{C}{\circ} g_1))$
  前复合与复合运算的关系
- $(i_1 \overset{C}{\circ} \_) \overset{C \to Set}{\circ} (f_1 \overset{C}{\circ} \_) = ((f_1 \overset{C}{\circ} i_1) \overset{C}{\circ} \_)$
  后复合与复合运算的关系

箭头对实参的应用

范畴论里函数的应用亦可视作复合 。
假如 a_1 为 a_1 的全局元素则可规定

- $a_1 i_1 = a_1 \overset{C}{\circ} i_1$

恒等箭头

范畴 C 内的每个对象都有恒等映射：

- ${}_{:\mathsf{a}_1}\mathrm{id} : \mathsf{a}_1 \overset{\mathsf{C}}{\to} \mathsf{a}_1$
  ${}_{:\mathsf{a}_1}\mathrm{id} : a_1 \mapsto a_1$

如此我们便可以得出下述重要等式：

- $\begin{aligned} {}_{:\mathsf{a}_1}\mathrm{id} \overset{\mathsf{C}}{\circ} i_1 &= i_1 \\ &= i_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} {}_{:\mathsf{b}_1}\mathrm{id} \end{aligned}$

此外还可以得知

- $({}_{:\mathsf{a}_1}\mathrm{id} \overset{\mathsf{C}}{\circ} \_) : (\mathsf{a}_1 \overset{\mathsf{C}}{\to} \_) \xrightarrow{\mathsf{C} \to \mathsf{Set}} (\mathsf{a}_1 \overset{\mathsf{C}}{\to} \_)$
  为恒等自然变换，可以记作是 ${}_{:(\mathsf{a}_1 \overset{\mathsf{C}}{\to} \_)}\mathrm{id}$；
- $(\_ \overset{\mathsf{C}}{\circ} {}_{:\mathsf{b}_1}\mathrm{id}) : (\_ \overset{\mathsf{C}}{\to} \mathsf{b}_1) \xrightarrow{\mathsf{C} \to \mathsf{Set}} (\_ \overset{\mathsf{C}}{\to} \mathsf{b}_1)$
  为恒等自然变换，可以记作是 ${}_{:(\_ \overset{\mathsf{C}}{\to} \mathsf{b}_1)}\mathrm{id}$；

单满态以及同构

接下来给出单 / 满态和同构的定义 。

- i_1 为**单态**当且仅当对任意 a_2 若有 $f_1, f_1' : \mathsf{a}_2 \overset{\mathsf{C}}{\to} \mathsf{a}_1$
  满足 $f_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} i_1 = f_1' \overset{\mathsf{C}}{\circ} i_1$ 则有 $f_1 = f_1'$ 。详情见下图：

$$\begin{tikzcd}
\mathsf{a}_1 \arrow[rrd, bend left, "i_1 : \mathsf{a}_1 \xrightarrow{\mathsf{C}} \mathsf{b}_1"] & \top \arrow[dd, dashed, mapsto, "\mathsf{b}_1{}^{(f_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} _)}"] & \\
 & & \mathsf{b}_1 \arrow[loop right, "{}_{:\mathsf{b}_1}\mathrm{id}"] \\
\mathsf{a}_2 \arrow[uu, shift right, "f_1"] \arrow[uu, shift left, "f_1'"'] \arrow[rru, bend right, "(f_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} i_1) : \mathsf{a}_2 \xrightarrow{\mathsf{C}} \mathsf{b}_3"'] & {} &
\end{tikzcd}$$

- i_1 为**满态**当且仅当对任意 b_2 若有 $g_1, g_1' : \mathsf{b}_1 \overset{\mathsf{C}}{\to} \mathsf{b}_2$
  满足 $i_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} g_1 = i_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} g_1'$ 则有 $g_1 = g_1'$ 。详情见下图：

$$\begin{tikzcd}
 & \top \arrow[dd, dashed, mapsto, "\mathsf{a}_1{}^{(_ \overset{\mathsf{C}}{\circ} g_1)}"] & \mathsf{b}_1 \arrow[dd, shift right, "g_1'"'] \arrow[dd, shift left, "g_1"] \\
\mathsf{a}_1 \arrow[loop left, "{}_{:\mathsf{a}_1}\mathrm{id}"] \arrow[rru, bend left, "i_1 : \mathsf{a}_1 \xrightarrow{\mathsf{C}} \mathsf{b}_1"] \arrow[rrd, bend right, "(i_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} g_1) : \mathsf{a}_1 \xrightarrow{\mathsf{C}} \mathsf{b}_2"'] & & \\
 & {} & \mathsf{b}_2
\end{tikzcd}$$

- i_1 为**同构**当且仅当存在 $i_1' : \mathsf{b}_1 \overset{\mathsf{C}}{\to} \mathsf{a}_1$
  使 $i_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} i_1' = {}_{:\mathsf{a}_1}\mathrm{id}$ 且 $i_1' \overset{\mathsf{C}}{\circ} i_1 = {}_{:\mathsf{b}_1}\mathrm{id}$ 。
  此时 a_1，b_1 间的关系可记作 $\mathsf{a}_1 \overset{\mathsf{C}}{\cong} \mathsf{b}_1$

若还提供 $j_1 : \mathsf{b}_1 \overset{\mathsf{C}}{\to} \mathsf{c}_1$ 则不难得知

- 若 i_1，j_1 为单态
  则 $i_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} j_1$ 为单态；
- 若 i_1，j_1 为满态
  则 $i_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} j_1$ 为满态；
- 若 i_1，j_1 为同构
  则 $i_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} j_1$ 为同构；
- 若 $i_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} j_1$ 为同构
  且 i_1，j_1 其中一个为同构
  则 i_1，j_1 两者皆构成同构 。

此外我们还可以得出下述结论：

- a_1 为单态，由
  ! 的唯一性可知 。
- ${}_{:0}! = {}_{:1}¡$为同构 —— 这是因为
  $0 \overset{\mathsf{C}}{\to} 0 = \{{}_{:0}\mathrm{id}\}$，$1 \overset{\mathsf{C}}{\to} 1 = \{{}_{:1}\mathrm{id}\}$

同构与自然性

下图即为自然性对应的形象解释 。
后面会将自然性进行进一步推广 。

$$
\begin{tikzcd}
a_1 \arrow[rr, red, "i_1"] \arrow[drr, red, dashed] & \arrow[d, phantom, "\downarrow (\_ \overset{c}{\circ} g_1)"] & b_1 \arrow[d, "g_1"] \\
a_2 \arrow[u, "f_1"] \arrow[rr, "i_2"'] & & b_2
\end{tikzcd}
$$

$$
\begin{tikzcd}
a_1 \arrow[rr, red, "i_1"] & \arrow[d, phantom, "(f_1 \overset{c}{\circ} \_) \downarrow"] & b_1 \arrow[d, "g_1"] \\
a_2 \arrow[u, "f_1"] \arrow[urr, red, dashed] \arrow[rr, "i_2"'] & & b_2
\end{tikzcd}
\qquad
\begin{tikzcd}
a_1 \arrow[rr, "i_1"] \arrow[drr, red] & \arrow[d, phantom, "(f_1 \overset{c}{\circ} \_) \downarrow"] & b_1 \arrow[d, "g_1"] \\
a_2 \arrow[u, "f_1"] \arrow[rr, red, dashed, "i_2"'] & & b_2
\end{tikzcd}
$$

$$
\begin{tikzcd}
a_1 \arrow[rr, "i_1"] & \arrow[d, phantom, "\downarrow (\_ \overset{c}{\circ} g_1)"] & b_1 \arrow[d, "g_1"] \\
a_2 \arrow[u, "f_1"] \arrow[urr, red, dashed] \arrow[rr, red, "i_2"'] & & b_2
\end{tikzcd}
$$

若提供自然变换 β 满足自然性 —— 即对任意
C 中对象 x_1 , x_2 及任意 C 中映射 $f_1 : x_2 \overset{C}{\to} x_1$
都会有 $(f_1 \overset{C}{\to} b_1) \overset{Set}{\circ} {x_2}^{\beta} = {x_1}^{\beta} \overset{Set}{\circ} (f_1 \overset{C}{\to} b_2)$
(即下图自西向南走向操作结果同自北向东) :

$$\begin{tikzcd}
x_1 \arrow[r, red, "i_1"] \arrow[dr, red, dashed, "\downarrow {x_1}^{\beta}"] & b_1 \\
x_2 \arrow[u, "f_1"] \arrow[r, "i_2"'] & b_2
\end{tikzcd}$$

$$\begin{tikzcd}
x_1 \arrow[r, red, "i_1"] & b_1 \\
x_2 \arrow[u, "f_1"] \arrow[ur, red, dashed, "(f_1 \overset{C}{\to} b_1) \downarrow"] \arrow[r, "i_2"'] & b_2
\end{tikzcd}
\qquad
\begin{tikzcd}
x_1 \arrow[r, "i_1"] \arrow[dr, red, "(f_1 \overset{C}{\to} b_2) \downarrow"'] & b_1 \\
x_2 \arrow[u, "f_1"] \arrow[r, red, dashed, "i_2"'] & b_2
\end{tikzcd}$$

$$\begin{tikzcd}
x_1 \arrow[r, "i_1"] & b_1 \\
x_2 \arrow[u, "f_1"] \arrow[ur, red, "\downarrow {x_2}^{\beta}"'] \arrow[r, red, dashed, "i_2"'] & b_2
\end{tikzcd}$$

那么我们便会有下述结论 :

- $b_1 \cong b_2$ 当且仅当对任意 C 中对象 x
  x^{β} 都是同构 。此时称 β 为**自然同构** 。

若提供自然变换 α 满足自然性 —— 即对任意
C 中对象 x_1 , x_2 及任意 C 中映射 $g_1 : x_1 \overset{C}{\to} x_2$
都会有 $(a_1 \overset{C}{\to} g_1) \overset{Set}{\circ} {x_2}^{\alpha} = {x_1}^{\alpha} \overset{Set}{\circ} (a_2 \overset{C}{\to} g_1)$
(即下图自西向南走向操作结果同自北向东) :

$$\begin{tikzcd}
a_1 \arrow[r, red, "i_1"] & x_1 \arrow[d, "g_1"] \\
a_2 \arrow[ur, red, dashed, "{x_1}^{\alpha} \downarrow"] \arrow[r, "i_2"'] & x_2
\end{tikzcd}$$

$$\begin{tikzcd}
a_1 \arrow[r, red, "i_1"] \arrow[dr, red, dashed, "\downarrow (a_1 \overset{C}{\to} g_1)"] & x_1 \arrow[d, "g_1"] \\
a_2 \arrow[r, "i_2"'] & x_2
\end{tikzcd}
\qquad
\begin{tikzcd}
a_1 \arrow[r, "i_1"] & x_1 \arrow[d, "g_1"] \\
a_2 \arrow[ur, red, "\downarrow (a_2 \overset{C}{\to} g_1)"'] \arrow[r, red, dashed, "i_2"'] & x_2
\end{tikzcd}$$

$$\begin{tikzcd}
a_1 \arrow[r, "i_1"] \arrow[dr, red, "{x_2}^{\alpha} \downarrow"'] & x_1 \arrow[d, "g_1"] \\
a_2 \arrow[r, red, dashed, "i_2"'] & x_2
\end{tikzcd}$$

那么我们便会有下述结论 :

- $a_1 \cong a_2$ 当且仅当对任意 C 中对象 x
  x^{α} 都是同构 。此时称 α 为**自然同构** 。

上一页的第一条定理若用交换图表示则应为

$$
\begin{tikzcd}
 & \mathsf{Set} & \\
x_1 \overset{C}{\to} b_1 \arrow[r, "{x_1}^{\beta}"] \arrow[d, "f_1 \overset{C}{\to} b_1"'] & & x_1 \overset{C}{\to} b_2 \arrow[d, "f_1 \overset{C}{\to} b_2"] \\
x_2 \overset{C}{\to} b_1 \arrow[rr, "{x_2}^{\beta}"'] & & x_2 \overset{C}{\to} b_2 \\
C \overset{C}{\to} b_1 & & C \overset{C}{\to} b_2
\end{tikzcd}
$$

$\Rightarrow$ 易证，$\Leftarrow$ 用到了米田技巧（考虑特殊情况）

$$
\begin{tikzcd}
b_1 \overset{C}{\to} b_1 \arrow[r, "{b_1}^{\beta}"] \arrow[d, "f_1 \overset{C}{\to} b_1"'] & b_1 \overset{C}{\to} b_2 \arrow[d, "f_1 \overset{C}{\to} b_2"] \\
x_2 \overset{C}{\to} b_1 \arrow[r, "{x_2}^{\beta}"'] & x_2 \overset{C}{\to} b_2
\end{tikzcd}
\qquad
\begin{tikzcd}
{:_{b_1}\mathrm{id}} \arrow[r, mapsto, "{b_1}^{\beta}"] \arrow[d, mapsto, "f_1 \overset{C}{\to} b_1"'] & {:_{b_1}\mathrm{id}(b_1^{\beta})} \arrow[d, mapsto, "f_1 \overset{C}{\to} b_2"] \\
f_1 \arrow[r, mapsto, "{x_2}^{\beta}"'] & f_1 \circ (\mathrm{etc})
\end{tikzcd}
$$

为了方便就用 (etc) 表示 $:_{b_1}\mathrm{id}(b_1^{\beta})$ 。 由上图可知 $f_1({x_2}^{\beta}) = f_1 \overset{C}{\circ} (\mathrm{etc})$，故 ${x_2}^{\beta} = x_2 \overset{C}{\to} (\mathrm{etc})$；而 ${x_2}^{\beta} = x_2 \overset{C}{\to} (\mathrm{etc}) = {x_2}^{(\_ \overset{C}{\circ} (\mathrm{etc}))}$ 是同构，从而知 $((\mathrm{etc}) \circ \_)$ 是同构，$(\mathrm{etc}) : b_1 \overset{C}{\to} b_2$ 也是 。

> 高亮部分省去了部分推理过程，
> 具体在米田嵌入处会详细介绍 。

上一页的第二条定理若用交换图表示则应为

$$
\begin{tikzcd}
 & \mathsf{Set} & \\
a_1 \overset{C}{\to} x_1 \arrow[rr, "{x_1}^{\alpha}"] \arrow[d, "a_1 \overset{C}{\to} g_1"'] & & a_2 \overset{C}{\to} x_1 \arrow[d, "a_1 \overset{C}{\to} g_1"] \\
a_1 \overset{C}{\to} x_2 \arrow[rr, "{x_2}^{\alpha}"'] & & a_2 \overset{C}{\to} x_2 \\
a_1 \overset{C}{\to} C & & a_2 \overset{C}{\to} C
\end{tikzcd}
$$

$\Rightarrow$ 易证，$\Leftarrow$ 用到了米田技巧（考虑特殊情况）

$$
\begin{tikzcd}
a_1 \overset{C}{\to} a_1 \arrow[r, "{x_1}^{\alpha}"] \arrow[d, "a_1 \overset{C}{\to} g_1"'] & a_2 \overset{C}{\to} a_1 \arrow[d, "a_1 \overset{C}{\to} g_1"] \\
a_1 \overset{C}{\to} x_2 \arrow[r, "{x_2}^{\alpha}"'] & a_2 \overset{C}{\to} x_2
\end{tikzcd}
\qquad
\begin{tikzcd}
{:_{b_1}\mathrm{id}} \arrow[r, mapsto, "{x_1}^{\alpha}"] \arrow[d, mapsto, "a_1 \overset{C}{\to} g_1"'] & {:_{a_1}\mathrm{id}(a_1^{\alpha})} \arrow[d, mapsto, "a_1 \overset{C}{\to} g_1"] \\
g_1 \arrow[r, mapsto, "{x_2}^{\alpha}"'] & (\mathrm{etc}) \circ g_1
\end{tikzcd}
$$

为了方便就用 (etc) 表示 $:_{a_1}\mathrm{id}(a_1^{\alpha})$ 。 由上图可知 $g_1({x_2}^{\alpha}) = (\mathrm{etc}) \overset{C}{\circ} g_1$，故 ${x_2}^{\alpha} = (\mathrm{etc}) \overset{C}{\to} x_2$；而 ${x_2}^{\alpha} = (\mathrm{etc}) \overset{C}{\to} x_2 = {x_2}^{((\mathrm{etc}) \overset{C}{\circ} \_)}$ 是同构，从而知 $(\_ \overset{C}{\circ} (\mathrm{etc}))$ 是同构，$(\mathrm{etc}) : a_1 \overset{C}{\to} a_2$ 也是 。

> 高亮部分省去了部分推理过程，
> 具体在米田嵌入处会详细介绍 。

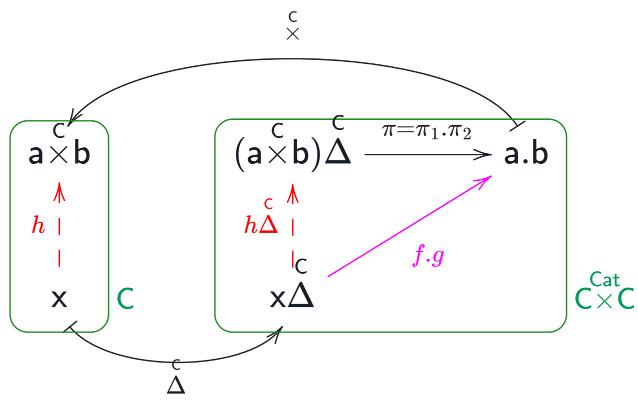
章节 04 - 05 类型的积与和

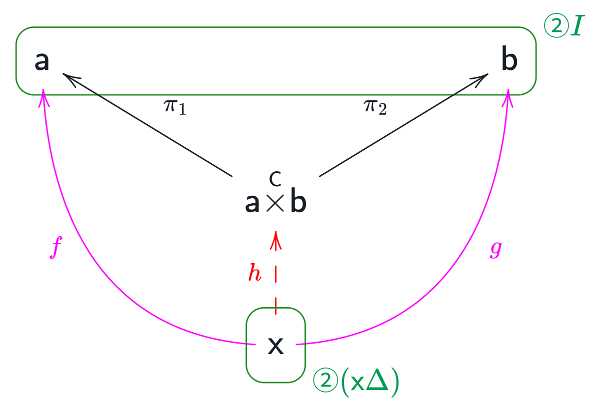
LaTeX Definitions are here.

泛性质

默认函子 $\overset{C}{\times} : C \overset{Cat}{\times} C \overset{Cat}{\longrightarrow} C$ 在范畴 C 中有下述性质：

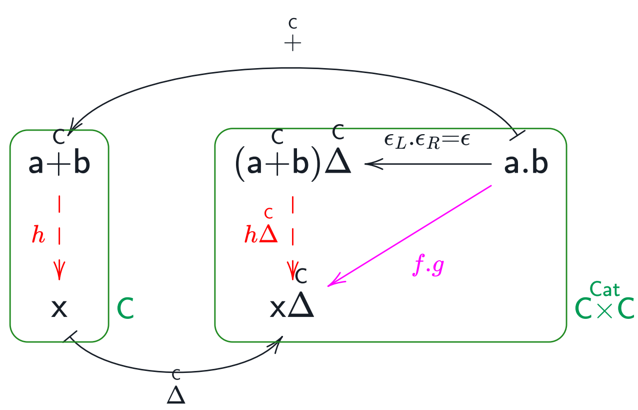
- $(x \overset{C}{\to} a) \overset{Set}{\times} (x \overset{C}{\to} b) \cong (x \overset{C}{\to} (a \overset{C}{\times} b))$, x 为任意 C 中对象 。
  —— **泛性质**，指数对乘法的分配律 。下图便于形象理解：

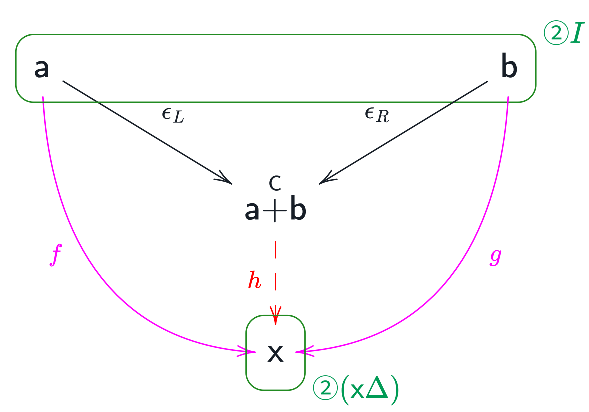




默认函子 $\overset{C}{+} : C \overset{Cat}{\times} C \overset{Cat}{\longrightarrow} C$ 在范畴 C 中有下述性质：

- $(a \overset{C}{\to} x) \overset{Set}{\times} (b \overset{C}{\to} x) \cong ((a \overset{C}{+} b) \overset{C}{\to} x)$, x 为任意 C 中对象 。
  —— **泛性质**，指数对加法的分配律 。下图便于形象理解：



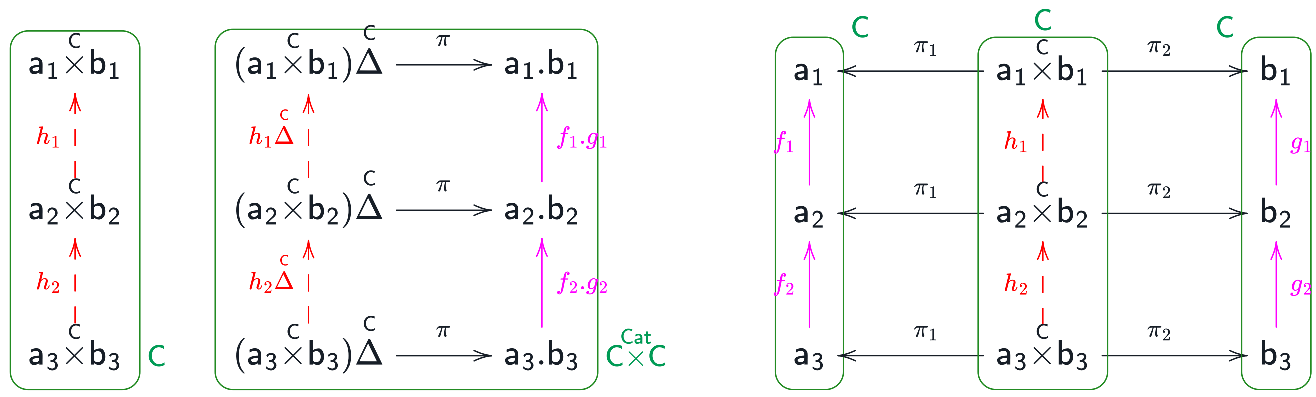


> **Note**
>
> 在上面的插图中：
>
> - $\overset{C}{\Delta} : C \overset{Cat}{\longrightarrow} C \overset{Cat}{\times} C$ 为对角函子，满足
> $\overset{C}{\Delta} : c \longmapsto c \,.\, c$
> - $I : ② \overset{Cat}{\longrightarrow} C$ 为函子，满足
> $I : 1 \longmapsto a$
> $\quad 2 \longmapsto b$
>   ② 为只有两个对象的范畴，
>   1 和 2 分别为其中的对象 。
>   这里 ② 充当一个指标范畴 。

函子性

如何证明 $\overset{C}{\times}$ 构成函子呢？请看

- $\overset{C}{\times} : ({}_{:a_2}\mathrm{id} \;.\; {}_{:b_2}\mathrm{id}) \longmapsto {}_{:a_2\overset{C}{\times}b_2}\mathrm{id}$
  —— 即函子 $\overset{C}{\times}$ **保持恒等箭头**；
- $\overset{C}{\times} : (f_2 \overset{C}{\circ} f_1 \;.\; g_2 \overset{C}{\circ} g_1) \mapsto h_2 \overset{C}{\circ} h_1$
  —— 即函子 $\overset{C}{\times}$ **保持箭头复合运算**。
  下图有助于形象理解证明的过程：

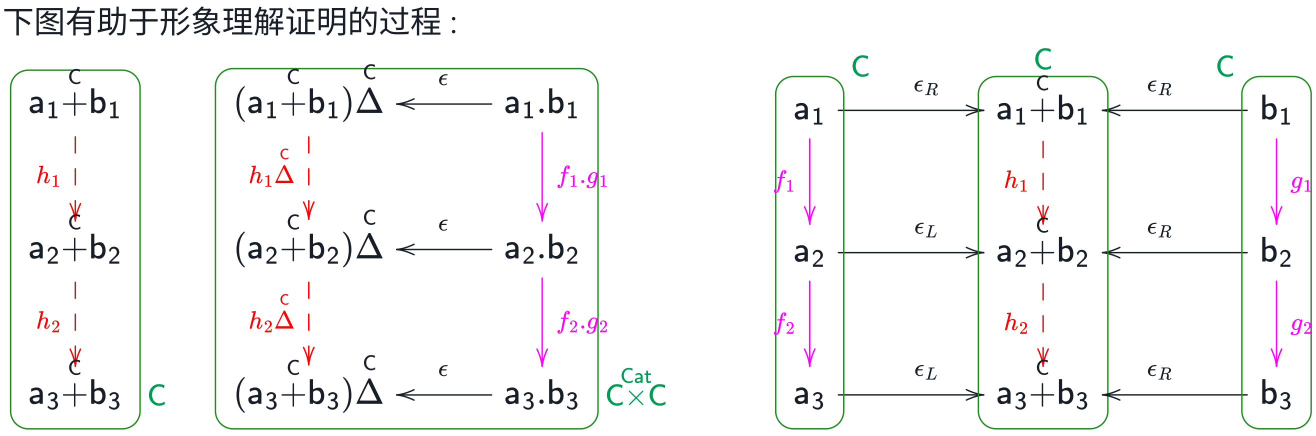


另外规定 $\overset{C}{\times}$ 在实参分别为箭头和对象时的输出：

- $\overset{C}{\times} : (f_1 \;.\; b_1) \longmapsto f_1 \overset{C}{\times} {}_{:b_1}\mathrm{id}$
  $\overset{C}{\times} : (a_1 \;.\; g_1) \longmapsto {}_{:a_1}\mathrm{id} \overset{C}{\times} g_1$

如何证明 $\overset{C}{+}$ 构成函子呢？请看

- $\overset{C}{+} : ({}_{:a_1}\mathrm{id} \;.\; {}_{:b_1}\mathrm{id}) \longmapsto {}_{:a_1\overset{C}{+}b_1}\mathrm{id}$
  —— 即函子 $\overset{C}{+}$ **保持恒等箭头**；
- $\overset{C}{+} : (f_1 \overset{C}{\circ} f_2 \;.\; g_1 \overset{C}{\circ} g_2) \mapsto h_1 \overset{C}{\circ} h_2$
  —— 即函子 $\overset{C}{+}$ **保持箭头复合运算**。
  下图有助于形象理解证明的过程：



同理规定 $\overset{C}{+}$ 在实参分别为箭头和对象时的输出：

- $\overset{C}{\times} : (f_1 \;.\; b_1) \longmapsto f_1 \overset{C}{+} {}_{:b_1}\mathrm{id}$
  $\overset{C}{\times} : (a_1 \;.\; g_1) \longmapsto {}_{:a_1}\mathrm{id} \overset{C}{+} g_1$

运算性质

对于函子 $\overset{\mathsf{C}}{\times}$ 我们不难得知

- $\mathsf{a} \overset{\mathsf{C}}{\times} 1 \cong 1 \overset{\mathsf{C}}{\times} \mathsf{a} \cong \mathsf{a}$ —— 乘法有**幺元** 1 。
  下图便于理解证明 : (f, g) 决定 h , h' 。

$$\begin{tikzcd}
(\mathsf{a}\overset{\mathsf{C}}{\times}1)\overset{\mathsf{C}}{\Delta} \arrow[r, "\pi=\pi_1.\pi_2"] & \mathsf{a}.1 \\
\mathsf{x}\overset{\mathsf{C}}{\Delta} \arrow[u, dashed, "h\overset{\mathsf{C}}{\Delta}"] \arrow[ur, "f.g=f.{:}_{\mathsf{x}}!"']
\end{tikzcd}
\qquad
\begin{tikzcd}
\mathsf{a}\overset{\mathsf{C}}{\Delta} \arrow[r, "{:}_{\mathsf{a}}\mathrm{id}.{:}_{\mathsf{a}}!"] & \mathsf{a}.1 \\
\mathsf{x}\overset{\mathsf{C}}{\Delta} \arrow[u, dashed, "f\overset{\mathsf{C}}{\Delta}=h'\overset{\mathsf{C}}{\Delta}"] \arrow[ur, "f.g=f.{:}_{\mathsf{x}}!"']
\end{tikzcd}$$

- $\mathsf{a} \overset{\mathsf{C}}{\times} \mathsf{b} \cong \mathsf{b} \overset{\mathsf{C}}{\times} \mathsf{a}$ —— 乘法运算有**交换律** 。
  下图便于理解证明 : (f, g) 决定 h , h' 。

$$\begin{tikzcd}
(\mathsf{a}\overset{\mathsf{C}}{\times}\mathsf{b})\overset{\mathsf{C}}{\Delta} \arrow[r, "\pi=\pi_1.\pi_2"] & \mathsf{a}.\mathsf{b} \\
\mathsf{x}\overset{\mathsf{C}}{\Delta} \arrow[u, dashed, "h\overset{\mathsf{C}}{\Delta}"] \arrow[ur, "f.g"']
\end{tikzcd}
\qquad
\begin{tikzcd}
(\mathsf{b}\overset{\mathsf{C}}{\times}\mathsf{a})\overset{\mathsf{C}}{\Delta} \arrow[r, "\pi=\pi_1.\pi_2"] & \mathsf{b}.\mathsf{a} \\
\mathsf{x}\overset{\mathsf{C}}{\Delta} \arrow[u, dashed, "h'\overset{\mathsf{C}}{\Delta}"] \arrow[ur, "g.f"']
\end{tikzcd}$$

- $(\mathsf{a} \times \mathsf{b}) \times \mathsf{c} \cong \mathsf{a} \times (\mathsf{b} \times \mathsf{c})$ —— 乘法运算具有**结合律** 。
  下图有助于形象理解证明 : $(f_{\mathsf{ax}}, f_{\mathsf{bx}}, f_{\mathsf{cx}})$ 决定 h , h' 。

$$\begin{tikzcd}
((\mathsf{a}\overset{\mathsf{C}}{\times}\mathsf{b})\overset{\mathsf{C}}{\times}\mathsf{c})\overset{\mathsf{C}}{\Delta} \arrow[r, "\pi"] & (\mathsf{a}\overset{\mathsf{C}}{\times}\mathsf{b}).\mathsf{c} \arrow[r, "\pi.{:}_{\mathsf{c}}\mathrm{id}"] & (\mathsf{a}.\mathsf{b}).\mathsf{c} \\
\mathsf{x}\overset{\mathsf{C}}{\Delta} \arrow[u, dashed, "h\overset{\mathsf{C}}{\Delta}"] \arrow[ur, dotted, "j.f_{\mathsf{cx}}"] \arrow[urr, "(f_a.f_b).f_{\mathsf{cx}}"']
\end{tikzcd}
\qquad
\begin{tikzcd}
(\mathsf{a}\overset{\mathsf{C}}{\times}(\mathsf{b}\overset{\mathsf{C}}{\times}\mathsf{c}))\overset{\mathsf{C}}{\Delta} \arrow[r, "\pi"] & \mathsf{a}.(\mathsf{b}\overset{\mathsf{C}}{\times}\mathsf{c}) \arrow[r, "{:}_{\mathsf{a}}\mathrm{id}.\pi"] & \mathsf{a}.(\mathsf{b}.\mathsf{c}) \\
\mathsf{x}\overset{\mathsf{C}}{\Delta} \arrow[u, dashed, "h'\overset{\mathsf{C}}{\Delta}"] \arrow[ur, dotted, "f_{\mathsf{ax}}.j'"] \arrow[urr, "f_a.(f_b.f_c)"']
\end{tikzcd}$$

对于函子 $\overset{\mathsf{C}}{+}$ 我们不难得知

- $\mathsf{a} \overset{\mathsf{C}}{+} 0 \cong 0 \overset{\mathsf{C}}{+} \mathsf{a} \cong \mathsf{a}$ —— 加法有**幺元** 0 。
  下图有助于理解 : (f, g) 决定 h , h' 。

$$\begin{tikzcd}
(\mathsf{a}\overset{\mathsf{C}}{+}0)\overset{\mathsf{C}}{\Delta} \arrow[d, dashed, "h\overset{\mathsf{C}}{\Delta}"'] & \mathsf{a}.0 \arrow[l, "\epsilon_L.\epsilon_R=\epsilon"'] \arrow[dl, "f.g=f.{:}_{\backslash \mathrm{ob}x}¡"] \\
\mathsf{x}\overset{\mathsf{C}}{\Delta}
\end{tikzcd}
\qquad
\begin{tikzcd}
\mathsf{a}\overset{\mathsf{C}}{\Delta} \arrow[d, dashed, "f=h'\overset{\mathsf{C}}{\Delta}"'] & \mathsf{a}.0 \arrow[l, "{:}_{\mathsf{a}}\mathrm{id}.{:}_{\mathsf{a}}¡"'] \arrow[dl, "f.g=f.{:}_{\mathsf{x}}¡"] \\
\mathsf{x}\overset{\mathsf{C}}{\Delta}
\end{tikzcd}$$

- $\mathsf{a} \overset{\mathsf{C}}{+} \mathsf{b} \cong \mathsf{b} \overset{\mathsf{C}}{+} \mathsf{a}$ —— 加法运算有**交换律** 。
  下图有助于理解 : (f, g) 决定 h , h' 。

$$\begin{tikzcd}
(\mathsf{a}\overset{\mathsf{C}}{+}\mathsf{b})\overset{\mathsf{C}}{\Delta} \arrow[d, dashed, "h\overset{\mathsf{C}}{\Delta}"'] & \mathsf{a}.\mathsf{b} \arrow[l, "\epsilon_L.\epsilon_R=\epsilon"'] \arrow[dl, "f.g"] \\
\mathsf{x}\overset{\mathsf{C}}{\Delta}
\end{tikzcd}
\qquad
\begin{tikzcd}
(\mathsf{b}\overset{\mathsf{C}}{+}\mathsf{a})\overset{\mathsf{C}}{\Delta} \arrow[d, dashed, "h'\overset{\mathsf{C}}{\Delta}"'] & \mathsf{b}.\mathsf{a} \arrow[l, "\epsilon_L.\epsilon_R=\epsilon"'] \arrow[dl, "g.f"] \\
\mathsf{x}\overset{\mathsf{C}}{\Delta}
\end{tikzcd}$$

- $(\mathsf{a} + \mathsf{b}) + \mathsf{c} \cong \mathsf{a} + (\mathsf{b} + \mathsf{c})$ —— 加法运算具有**结合律** 。
  下图有助于形象理解证明 : $(f_{\mathsf{ax}}, f_{\mathsf{bx}}, f_{\mathsf{cx}})$ 决定 h , h' 。

$$\begin{tikzcd}
((\mathsf{a}\overset{\mathsf{C}}{+}\mathsf{b})\overset{\mathsf{C}}{+}\mathsf{c})\overset{\mathsf{C}}{\Delta} \arrow[d, dashed, "h\overset{\mathsf{C}}{\Delta}"'] & (\mathsf{a}\overset{\mathsf{C}}{+}\mathsf{b}).\mathsf{c} \arrow[l, "\epsilon"'] \arrow[dl, dotted, "j.f_c"'] & (\mathsf{a}.\mathsf{b}).\mathsf{c} \arrow[l, "\epsilon.{:}_{\mathsf{c}}\mathrm{id}"'] \arrow[dll, "(f_a.f_b).f_c"] \\
\mathsf{x}\overset{\mathsf{C}}{\Delta}
\end{tikzcd}
\qquad
\begin{tikzcd}
(\mathsf{a}\overset{\mathsf{C}}{+}(\mathsf{b}\overset{\mathsf{C}}{+}\mathsf{c}))\overset{\mathsf{C}}{\Delta} \arrow[d, dashed, "h'\overset{\mathsf{C}}{\Delta}"'] & \mathsf{a}.(\mathsf{b}\overset{\mathsf{C}}{+}\mathsf{c}) \arrow[l, "\epsilon"'] \arrow[dl, dotted, "f_a.j'."'] & \mathsf{a}.(\mathsf{b}.\mathsf{c}) \arrow[l, "{:}_{\mathsf{a}}\mathrm{id}.\epsilon"'] \arrow[dll, "f_a.(f_b.f_c)"] \\
\mathsf{x}\overset{\mathsf{C}}{\Delta}
\end{tikzcd}$$

幺半范畴

像刚才这样对象运算具有**单位元**以及**结合律**的范畴称作**幺半范畴**；

若上述范畴还具有**交换律**则称作**对称幺半范畴**；

很明显我们的范畴 C 是典型的**对称幺半范畴** 。

幺半群

什么是幺半群呢？有两种定义方式：

- **幺半群** M 是个范畴，其只含一个对象 m；
  其中的复合运算正好有单位元以及结合律 。
- 对象 m 属于幺半范畴 C，满足下述交换图：

$$
\begin{tikzcd}
1\overset{\mathsf{C}}{\times}\mathsf{m} \arrow[r, "u\overset{\mathsf{C}}{\otimes}_{:\mathsf{m}}\mathrm{id}"] \arrow[dr, "左单位元\ u_l"'] & \mathsf{m}\overset{\mathsf{C}}{\times}\mathsf{m} \arrow[d, "p"', "运算结果唯一"] & \mathsf{m}\overset{\mathsf{C}}{\times}1 \arrow[l, "{}_{:\mathsf{m}}\mathrm{id}\overset{\mathsf{C}}{\otimes}u"'] \arrow[dl, "u_r\ 右单位元"] \\
& \mathsf{m} &
\end{tikzcd}
$$

$$
\begin{tikzcd}
(\mathsf{m}\overset{\mathsf{C}}{\times}\mathsf{m})\overset{\mathsf{C}}{\times}\mathsf{m} \arrow[rr, "结合律\ a"] \arrow[d, "先算左侧括号\ p\overset{\mathsf{C}}{\otimes}_{:\mathsf{m}}\mathrm{id}"'] & & \mathsf{m}\overset{\mathsf{C}}{\times}(\mathsf{m}\overset{\mathsf{C}}{\times}\mathsf{m}) \arrow[d, "{}_{:\mathsf{m}}\mathrm{id}\overset{\mathsf{C}}{\otimes}p\ 先算右侧括号"] \\
\mathsf{m}\overset{\mathsf{C}}{\times}\mathsf{m} \arrow[r, "再算最后结果\ p"'] & \mathsf{m} & \mathsf{m}\overset{\mathsf{C}}{\times}\mathsf{m} \arrow[l, "p\ 再算最后结果"]
\end{tikzcd}
$$

  其中
  - u ：$1\overset{\mathsf{C}}{\to}$ m 其实就是 m 里面的幺元
  - u_l：$1\overset{\mathsf{C}}{\times}$ m $\overset{\mathsf{C}}{\to}$ m 表示 u 构成左幺元
  - u_r：m $\overset{\mathsf{C}}{\times}1\overset{\mathsf{C}}{\to}$ m 表示 u 构成右幺元
  - p ：m $\overset{\mathsf{C}}{\times}$ m $\overset{\mathsf{C}}{\to}$ m 即为 m 中的二元运算
  - a ：(m $\overset{\mathsf{C}}{\times}$ m) $\overset{\mathsf{C}}{\times}$ m $\overset{\mathsf{C}}{\to}$ m $\overset{\mathsf{C}}{\times}$ (m $\overset{\mathsf{C}}{\times}$ m) 表示 m 具有结合律

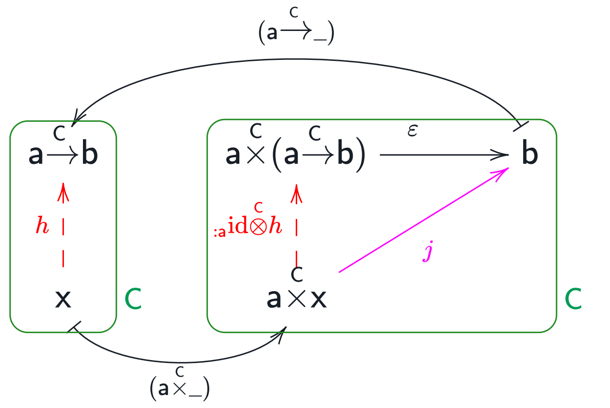
章节 06 类型的幂

LaTeX Definitions are here.

泛性质

默认函子 $\overset{\mathsf{C}}{\to} : \mathsf{C} \overset{\mathsf{Cat}}{\times} \mathsf{C} \overset{\mathsf{Cat}}{\longrightarrow} \mathsf{C}$ 在范畴 C 中有下述性质：

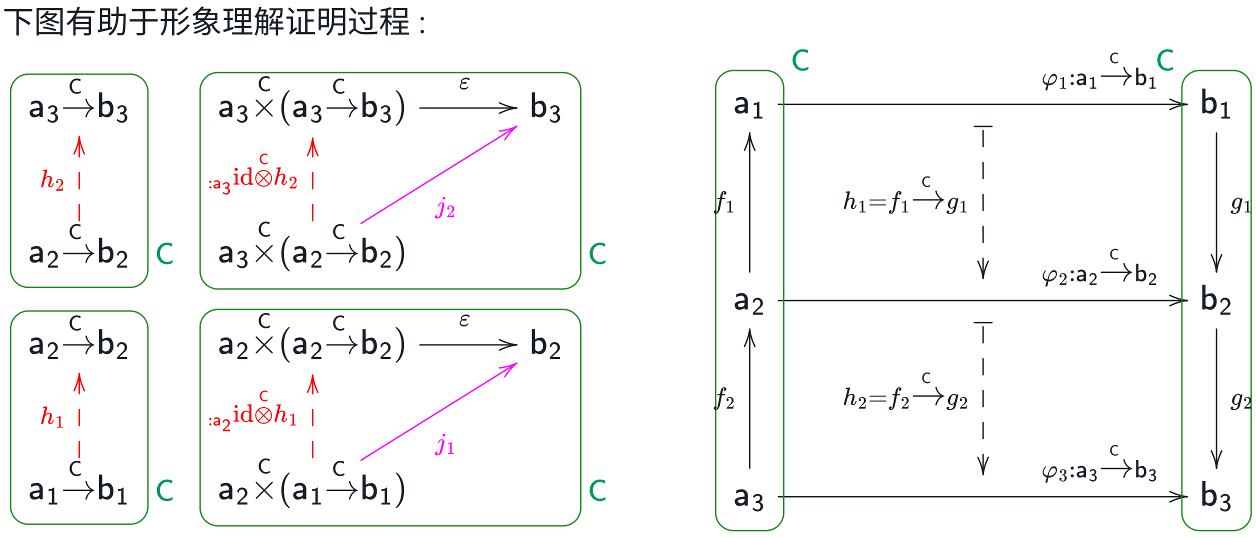
- $\underline{(\mathsf{a} \overset{\mathsf{C}}{\times} \mathsf{x}) \overset{\mathsf{C}}{\to} \mathsf{b}} \cong \underline{\mathsf{x} \overset{\mathsf{C}}{\to} (\mathsf{a} \overset{\mathsf{C}}{\to} \mathsf{b})} \cong \underline{\mathsf{a} \overset{\mathsf{C}}{\to} (\mathsf{x} \overset{\mathsf{C}}{\to} \mathsf{b})}$，x 为任意 C 中对象
  —— **泛性质**，指数与加乘法运算间的关系 。 下图便于理解证明：



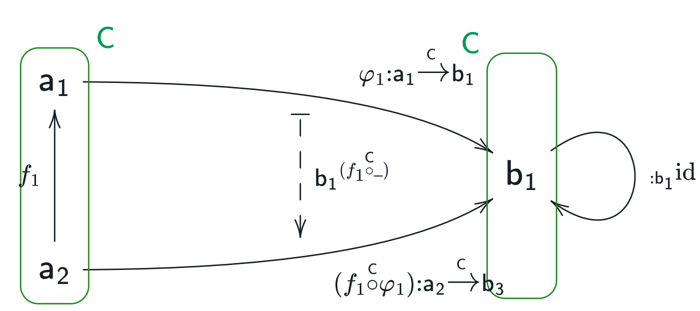
函子性

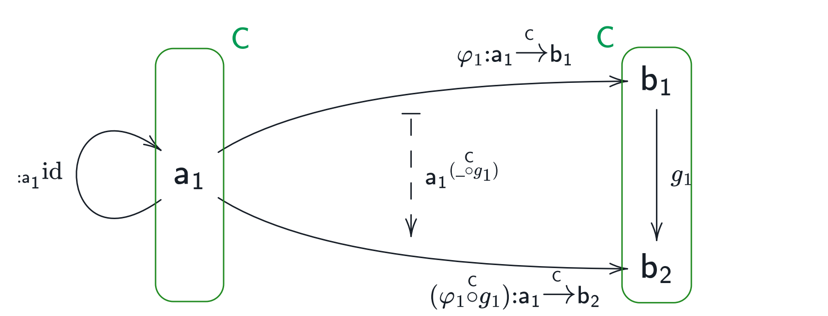
如何证明 $\overset{\mathsf{C}}{\to}$ 构成函子呢？请看

- $\overset{\mathsf{C}}{\to} : ({}_{:\mathsf{a}_1}\mathrm{id} \,.\, {}_{:\mathsf{b}_1}\mathrm{id}) \longmapsto {}_{:(\mathsf{a}_1 \overset{\mathsf{C}}{\to} \mathsf{b}_1)}\mathrm{id}$
  —— 即函子 $\overset{\mathsf{C}}{\to}$ 能**保持恒等箭头**；
- $\overset{\mathsf{C}}{\to} : (f_2 \overset{\mathsf{C}}{\circ} f_1 \,.\, g_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} g_2) \longmapsto h_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} h_2$
  —— 即函子 $\overset{\mathsf{C}}{\to}$ **保持箭头复合运算** 。
  下图有助于形象理解证明过程：



下图（自上到下分别为图 1 和图 2）后面会用到 。





范畴 C 内任意两对象 a_1 和 b_1 间的箭头构成一个集合 $\mathsf{a}_1 \xrightarrow{\mathsf{C}} \mathsf{b}_1$，
说明 $\xrightarrow{\mathsf{C}}$ 只能将两个对象打到一个集合。下面使 $\xrightarrow{\mathsf{C}}$ 升级为函子：
若还知道箭头 $f_1 : \mathsf{a}_2 \xrightarrow{\mathsf{C}} \mathsf{a}_1$ 以及 $g_1 : \mathsf{b}_1 \xrightarrow{\mathsf{C}} \mathsf{b}_2$，则规定

- $(\_ \xrightarrow{\mathsf{C}} \mathsf{b}_1) : \mathsf{C}^{\mathrm{op}} \cancel{\overset{\mathsf{Cat}}{\times} \mathsf{C}} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{Set}$ 为函子且
  $(\_ \xrightarrow{\mathsf{C}} \mathsf{b}_1) : \mathsf{a}_1 \longmapsto (\mathsf{a}_1 \xrightarrow{\mathsf{C}} \mathsf{b}_1)$，并且有
  $(\_ \xrightarrow{\mathsf{C}} \mathsf{b}_1) : f_1 \longmapsto (f_1 \xrightarrow{\mathsf{C}} \mathsf{b}_1) = (f_1 \xrightarrow{\mathsf{C}} {}_{:\mathsf{b}_1}\mathrm{id}) = \mathsf{b}_1{}^{(f_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} \_)}$

  图 1 有助于理解。

  $(\_ \xrightarrow{\mathsf{C}} g_1) : \mathsf{C}^{\mathrm{op}} \cancel{\overset{\mathsf{Cat}}{\times} \mathsf{C}} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{Set}$，
  $(\_ \xrightarrow{\mathsf{C}} g_1) : \mathsf{a}_1 \longmapsto (\mathsf{a}_1 \xrightarrow{\mathsf{C}} g_1) = ({}_{:\mathsf{a}_1}\mathrm{id} \xrightarrow{\mathsf{C}} g_1) = \mathsf{a}_1{}^{(\_ \overset{\mathsf{C}}{\circ} g_1)}$
  $(\_ \xrightarrow{\mathsf{C}} g_1) : f_1 \longmapsto (f_1 \xrightarrow{\mathsf{C}} g_1) = (f_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} \_)^{\mathsf{C} \to \mathsf{Set}} \overset{}{\circ} (\_ \overset{\mathsf{C}}{\circ} g_1) = (\_ \overset{\mathsf{C}}{\circ} g_1) \overset{\mathsf{C} \to \mathsf{Set}}{\circ} (f_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} \_)$

  图 2 有助于理解。

  > **Note**
  >
  > 不难看出
  >
  > - $\text{よ} : \mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} (\mathsf{C}^{\mathrm{op}} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{Set})$
  > $\mathsf{b}_1 \longmapsto (\_ \xrightarrow{\mathsf{C}} \mathsf{b}_1)$ 构成一个函子,称作预层
  > $g_1 \longmapsto (\_ \xrightarrow{\mathsf{C}} g_1) = (\_ \circ g_1)$ 构成一个函子间映射,即自然变换
  >
  >   该函子称作是**米田嵌入**。

- $(\mathsf{a}_1 \xrightarrow{\mathsf{C}} \_) : \cancel{\mathsf{C}^{\mathrm{op}} \overset{\mathsf{Cat}}{}} \times \mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{Set}$ 为函子且
  $(\mathsf{a}_1 \xrightarrow{\mathsf{C}} \_) : \mathsf{b}_1 \longmapsto (\mathsf{a}_1 \xrightarrow{\mathsf{C}} \mathsf{b}_1)$，并且有
  $(\mathsf{a}_1 \xrightarrow{\mathsf{C}} \_) : g_1 \longmapsto (\mathsf{a}_1 \xrightarrow{\mathsf{C}} g_1) = ({}_{:\mathsf{a}_1}\mathrm{id} \xrightarrow{\mathsf{C}} g_1) = \mathsf{a}_1{}^{(\_ \overset{\mathsf{C}}{\circ} g_1)}$

  图 2 有助于理解。

  $(f_1 \xrightarrow{\mathsf{C}} \_) : \cancel{\mathsf{C}^{\mathrm{op}} \overset{\mathsf{Cat}}{}} \times \mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{Set}$，
  $(f_1 \xrightarrow{\mathsf{C}} \_) : \mathsf{b}_1 \longmapsto (f_1 \xrightarrow{\mathsf{C}} \mathsf{b}_1) = (f_1 \xrightarrow{\mathsf{C}} {}_{:\mathsf{b}_1}\mathrm{id}) = \mathsf{b}_1{}^{(f_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} \_)}$
  $(f_1 \xrightarrow{\mathsf{C}} \_) : g_1 \longmapsto (f_1 \xrightarrow{\mathsf{C}} g_1) = (f_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} \_)^{\mathsf{C} \to \mathsf{Set}} \overset{}{\circ} (\_ \overset{\mathsf{C}}{\circ} g_1) = (\_ \overset{\mathsf{C}}{\circ} g_1) \overset{\mathsf{C} \to \mathsf{Set}}{\circ} (f_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} \_)$

  图 1 有助于理解。

  > **Note**
  >
  > 不难看出
  >
  > - $\text{尤} : \mathsf{C}^{\mathrm{op}} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} (\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{Set})$
  > $\mathsf{a}_1 \longmapsto (\mathsf{a}_1 \xrightarrow{\mathsf{C}} \_)$ 构成一个函子
  > $f_1 \longmapsto (f_1 \xrightarrow{\mathsf{C}} \_) = (f_1 \circ \_)$ 构成一个函子间映射,即自然变换
  >
  >   该函子戏称为**尤达嵌入**。

积闭范畴

这里插个题外话：

若范畴包含终对象，所有类型的积以及指数，则可将其称作**积闭范畴**；

若范畴包含始对象，所有类型的和，则可将其称作是**余积闭范畴**；

若范畴满足上述条件，则可称作**双积闭范畴**。

很明显我们讨论的范畴 C 就是**双积闭范畴**。

章节 07 递归类型

LaTeX Definitions are here.

泛性质

默认对象 N 在范畴 C 中有下述性质：

- $(1 \xrightarrow{\mathsf{C}} \mathsf{x}) \overset{\mathsf{Cat}}{\times} (\mathsf{x} \xrightarrow{\mathsf{C}} \mathsf{x}) \cong (\mathsf{N} \xrightarrow{\mathsf{C}} \mathsf{x})$，x 为任意 C 中对象
  —— **泛性质**。`rec` 即对应的同构（上式从左至右）。

$$\begin{tikzcd} \mathsf{N} \arrow[d, dashed, "h"'] \\ \mathsf{x} \end{tikzcd} \ \mathsf{C} \qquad \begin{tikzcd} \mathsf{N}\overset{\mathsf{C}}{\Delta} \arrow[d, dashed, "h\overset{\mathsf{C}}{\Delta}"'] & 1.\mathsf{N} \arrow[l, "\eta=\eta_i.\eta_s"'] \arrow[d, dashed, "_{:1}\mathrm{id}.h"] \\ \mathsf{x}\overset{\mathsf{C}}{\Delta} & 1.\mathsf{x} \arrow[l, "i.s"] \end{tikzcd} \ \mathsf{C}\overset{\mathsf{Cat}}{\times}\mathsf{C} \qquad \mathsf{C}\overset{\mathsf{Cat}}{\times}\mathsf{C} \ \begin{tikzcd} 1 \arrow[r, "\eta_i=0"] \arrow[dr, "i"'] & \mathsf{N} \arrow[d, dashed, "h"] & \mathsf{N} \arrow[l, "\eta_s=\mathtt{succ}"'] \arrow[d, dashed, "h"] \\ & \mathsf{x} & \mathsf{x} \arrow[l, "s"] \end{tikzcd} \ \mathsf{C}$$

默认函子 $[\_] : \mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{C}$ 在范畴 C 中有下述性质：

- $(1 \xrightarrow{\mathsf{C}} \mathsf{x}) \overset{\mathsf{Cat}}{\times} ((\mathsf{x} \overset{\mathsf{C}}{\times} \mathsf{b}) \xrightarrow{\mathsf{C}} \mathsf{x}) \cong ([\mathsf{b}] \xrightarrow{\mathsf{C}} \mathsf{x})$，x 为任意 C 中对象
  —— **泛性质**。`foldr` 即对应的同构（上述等式从左至右）。

$$\begin{tikzcd} {[\mathsf{b}]} \arrow[d, dashed, "h"'] \\ \mathsf{x} \end{tikzcd} \ \mathsf{C} \qquad \begin{tikzcd} {[\mathsf{b}]}\overset{\mathsf{C}}{\Delta} \arrow[d, dashed, "h\overset{\mathsf{C}}{\Delta}"'] & 1.[\mathsf{b}]\overset{\mathsf{C}}{\times}\mathsf{b} \arrow[l, "\kappa=\kappa_i.\kappa_s"'] \arrow[d, dashed, "_{:1}\mathrm{id}.h\overset{\mathsf{C}}{\otimes}_{:\mathsf{b}}\mathrm{id}"] \\ \mathsf{x}\overset{\mathsf{C}}{\Delta} & 1.\mathsf{x}\overset{\mathsf{C}}{\times}\mathsf{b} \arrow[l, "i.s"] \end{tikzcd} \ \mathsf{C}\overset{\mathsf{Cat}}{\times}\mathsf{C} \qquad \mathsf{C}\overset{\mathsf{Cat}}{\times}\mathsf{C} \ \begin{tikzcd} 1 \arrow[r, "\kappa_i=\mathtt{[]}"] \arrow[dr, "i"'] & {[\mathsf{b}]} \arrow[d, dashed, "h"] & {[\mathsf{b}]}\overset{\mathsf{C}}{\times}\mathsf{b} \arrow[l, "\kappa_s=\mathtt{(:)}"'] \arrow[d, dashed, "h\overset{\mathsf{C}}{\otimes}_{:\mathsf{b}}\mathrm{id}"] \\ & \mathsf{x} & \mathsf{x}\overset{\mathsf{C}}{\times}\mathsf{b} \arrow[l, "s"] \end{tikzcd} \ \mathsf{C}$$

函子性

如何证明 [_] 构成函子呢？请看

- $[\_] : {}_{:\mathsf{b}_1}\mathrm{id} \longmapsto {}_{:[\mathsf{b}_1]}\mathrm{id}$
  —— **[_] 保持恒等箭头**；
- $[\_] : (g_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} g_2) \longmapsto (h_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} h_2)$
  —— **[_] 保持箭头复合运算**。
  下图便于形象理解证明过程。

$$\begin{tikzcd} {[\mathsf{b}_1]} \arrow[d, dashed, "h_1"'] \\ {[\mathsf{b}_2]} \arrow[d, dashed, "h_2"'] \\ {[\mathsf{b}_3]} \end{tikzcd} \ \mathsf{C} \qquad \begin{tikzcd} {[\mathsf{b}_1]}\overset{\mathsf{C}}{\Delta} \arrow[dd, dashed, "h_1\overset{\mathsf{C}}{\Delta}"'] & 1.[\mathsf{b}_1]\overset{\mathsf{C}}{\times}\mathsf{b}_1 \arrow[l, "\kappa"'] \arrow[d, dashed, "_{:1}\mathrm{id}.h_1\overset{\mathsf{C}}{\otimes}_{:\mathsf{b}_1}\mathrm{id}"] \\ & 1.[\mathsf{b}_2]\overset{\mathsf{C}}{\times}\mathsf{b}_1 \arrow[d, "_{:1}\mathrm{id}.g_1\overset{\mathsf{C}}{\otimes}_{:[\mathsf{b}_2]}\mathrm{id}"] \\ {[\mathsf{b}_2]}\overset{\mathsf{C}}{\Delta} \arrow[dd, dashed, "h_2\overset{\mathsf{C}}{\Delta}"'] & 1.[\mathsf{b}_2]\overset{\mathsf{C}}{\times}\mathsf{b}_2 \arrow[l, "\kappa"'] \arrow[d, dashed, "_{:1}\mathrm{id}.h_2\overset{\mathsf{C}}{\otimes}_{:\mathsf{b}_2}\mathrm{id}"] \\ & 1.[\mathsf{b}_3]\overset{\mathsf{C}}{\times}\mathsf{b}_2 \arrow[d, "_{:1}\mathrm{id}.g_2\overset{\mathsf{C}}{\otimes}_{:[\mathsf{b}_3]}\mathrm{id}"] \\ {[\mathsf{b}_3]}\overset{\mathsf{C}}{\Delta} & 1.[\mathsf{b}_3]\overset{\mathsf{C}}{\times}\mathsf{b}_3 \arrow[l, "\kappa"'] \end{tikzcd} \ \mathsf{C}\overset{\mathsf{Cat}}{\times}\mathsf{C}$$

章节 08 - 09 函子与自然变换

LaTeX Definitions are here.

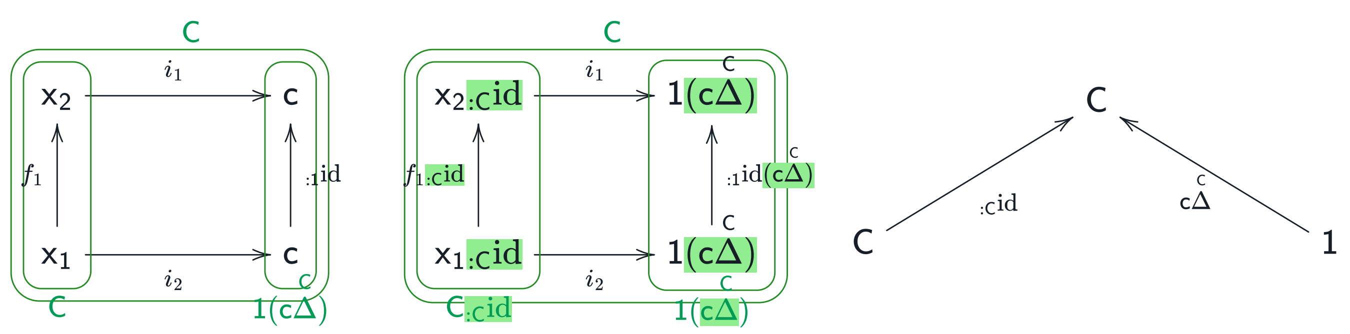
一些特殊的范畴

现在规定几种特殊的范畴。

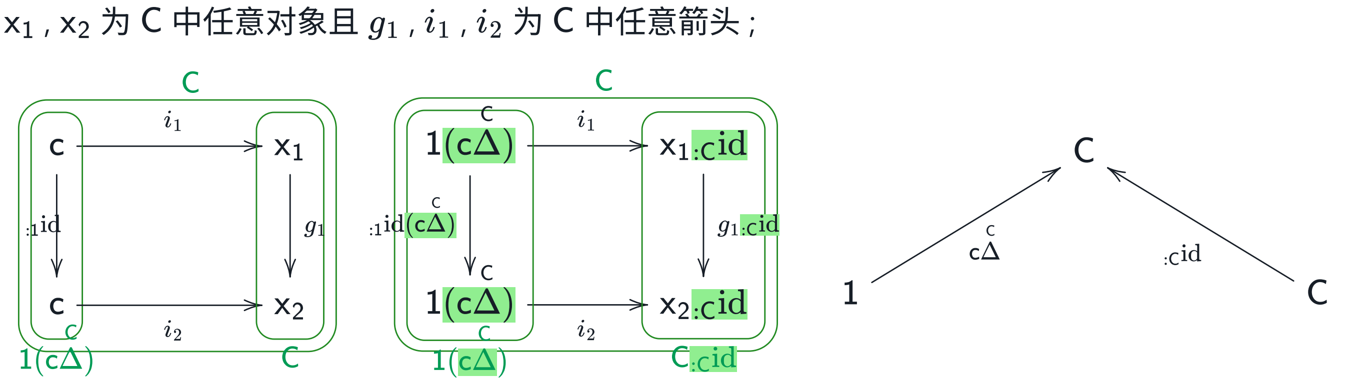
- **离散范畴**：只有对象不含箭头（恒等箭头除外）的范畴。
- Set：**所有集合构成的范畴**，为局部小范畴，满足
  - Set 中对象为任意集合；
  - Set 中箭头为集合间映射。
- Cat：**所有范畴构成的范畴**，满足
  - Cat 中任何对象都构成一个范畴；
  - Cat 中任何箭头都构成一个函子。

若 C，D 为 Cat 中对象，则：

- C^{op}：**反范畴**，满足
  - C^{op} 中对象皆形如 c，
    c 为任意 C 中的对象；
  - C^{op} 中箭头皆形如 $i^{\mathrm{op}} : \mathsf{c}_2 \xrightarrow{\mathsf{C}^{\mathrm{op}}} \mathsf{c}_1$，
    $i : \mathsf{c}_1 \xrightarrow{\mathsf{C}} \mathsf{c}_2$ 可为任意 C 中的箭头。
- $\mathsf{C} \overset{\mathsf{Cat}}{\times} \mathsf{D}$：**积范畴**，满足
  - $\mathsf{C} \overset{\mathsf{Cat}}{\times} \mathsf{D}$ 中对象皆形如 c . d，
    c，d 分别为任意 C，D 中的对象；
  - $\mathsf{C} \overset{\mathsf{Cat}}{\times} \mathsf{D}$ 中箭头皆形如 $i \,.\, j$，
    i，j 分别为任意 C，D 中的箭头。
- $\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{D}$：**所有 C 到 D 的函子的范畴**，满足
  - $\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{D}$ 中任何对象
    都是 C 到 D 的函子；
  - $\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{D}$ 中任何箭头
    都是函子间自然变换。
- C/c：**俯范畴**，这里 c 为任意 C 中对象；满足
  - C/c 中对象皆形如 $\cancel{\mathsf{x} \,.\, 1} \,.\, i$，其中 x 和
    $i : \mathsf{x} \xrightarrow{\mathsf{C}} \mathsf{c}$ 分别为 C 中任意的对象和箭头；
  - c/C 中箭头皆形如 $f_1 \cancel{\,.\, {}_{:\mathsf{c}}\mathrm{id}}$ 且满足下述交换图，其中
    x_1，x_2 为 C 中任意对象且 f_1，i_1，i_2 为 C 中任意箭头；



- c/C：**仰范畴**，这里 c 为任意 C 中对象；满足
  - c/C 中对象皆形如 $\cancel{1 \,.\, \mathsf{x}} \,.\, i$，其中 x 和
    $i : \mathsf{c} \xrightarrow{\mathsf{C}} \mathsf{x}$ 分别为 C 中任意的对象和箭头；
  - C/c 中箭头皆形如 $\cancel{{}_{:\mathsf{c}}\mathrm{id} \,.}\, g_1$ 且满足下述交换图，其中
    x_1，x_2 为 C 中任意对象且 g_1，i_1，i_2 为 C 中任意箭头；



函子

接下来我们来提供函子的正式定义：

- P_1 : C $\xrightarrow{\text{Cat}}$ D 为**函子**当且仅当
  - 对任意 C 中对象 c，cP_1 为 D 中对象且 $_{:\mathsf{c}}\mathrm{id}P_1 = {}_{:\mathsf{c}P_1}\mathrm{id}$；
  - 对任意 C 中箭头 i_1 : c$_1$ $\xrightarrow{\text{C}}$ c$_2$ 和 i_2 : c$_2$ $\xrightarrow{\text{C}}$ c$_3$，始终都有等式 $(i_1 \overset{\text{C}}{\circ} i_2)P_1 = i_1P_1 \overset{\text{D}}{\circ} i_2P_1$ 成立。

函子的复合运算

若知道 P_1 : C $\xrightarrow{\text{Cat}}$ D 构成函子且
还知道 Q_1 : D $\xrightarrow{\text{Cat}}$ E 为函子，则

- $P_1 \overset{\text{Cat}}{\circ} Q_1$: C $\xrightarrow{\text{Cat}}$ E
  也构成一个函子。

恒等函子

对于函子我们也有恒等映射，即：

- $$\begin{aligned} {}_{:\mathsf{C}}\mathrm{id} \overset{\text{Cat}}{\circ} P_1 &= P_1 \\ &= P_1 \overset{\text{Cat}}{\circ} {}_{:\mathsf{D}}\mathrm{id} \end{aligned}$$

忠实，完全和本质满函子

若 C，D，E 皆为**局部小范畴**，则

- P_1 是**忠实的**当且仅当对任意 C 中的对象 c$_1$，c$_2$
  (c$_1$ $\xrightarrow{\text{C}}$ c$_2$) 与 (c$_1P_1$ $\xrightarrow{\text{D}}$ c$_2P_1$) 之间始终存在单射；
- P_1 是**完全的**当且仅当对任意 C 中的对象 c$_1$，c$_2$
  (c$_1$ $\xrightarrow{\text{C}}$ c$_2$) 与 (c$_1P_1$ $\xrightarrow{\text{D}}$ c$_2P_1$) 之间始终存在满射；
- P_1 是**完全忠实的**当且仅当任意 C 中对象 c$_1$，c$_2$
  (c$_1$ $\xrightarrow{\text{C}}$ c$_2$) 与 (c$_1P_1$ $\xrightarrow{\text{D}}$ c$_2P_1$) 之间始终存在双射。

> **Note**
>
> 刚才提到的“单 / 满 / 双射”
> 针对的都是范畴的箭头部分。

- P_1 是**本质满的**当且仅当对任意 D 中对象 d
  都存在 C 中对象 c 使 cP_1 $\xrightarrow{\text{D}}$ d 之间有双射。

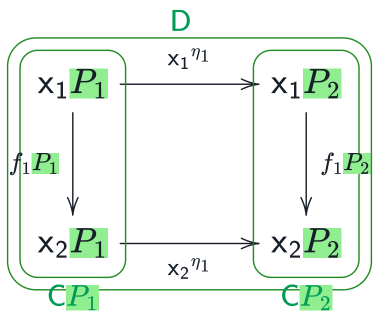
根据刚才的信息我们不难得知

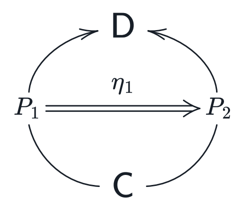
- 若 P_1，Q_1 为忠实函子
  则 $P_1 \overset{\text{Cat}}{\circ} Q_1$ 为忠实函子；
- 若 P_1，Q_1 为完全函子
  则 $P_1 \overset{\text{Cat}}{\circ} Q_1$ 为完全函子；
- 若 P_1，Q_1 为完全忠实函子
  则 $P_1 \overset{\text{Cat}}{\circ} Q_1$ 为完全忠实函子；
- 若 $P_1 \overset{\text{Cat}}{\circ} Q_1$ 为完全忠实函子
  且知道 Q_1 为完全忠实函子
  则可知 P_1 为完全忠实函子；
- 若 P_1，Q_1 为本质满函子
  则 $P_1 \overset{\text{Cat}}{\circ} Q_1$ 为本质满函子。

自然变换

如果还知道 $P_2 : \mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{D}$ 为函子，那么

- $\eta_1 : P_1 \xrightarrow{\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{D}} P_2$ 为自然变换当且仅当对任意 C 中对象 x_1，x_2 始终都会有下述交换图成立：

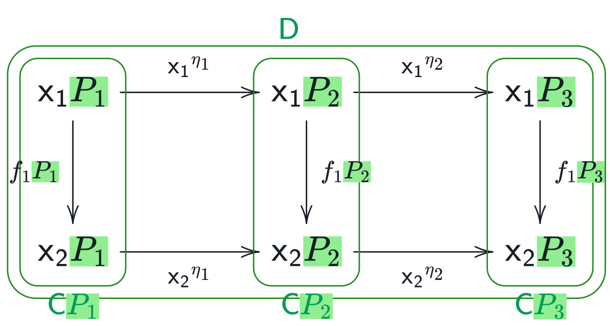


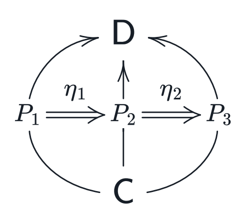


自然变换的复合

若已知 $\eta_1 : P_1 \xrightarrow{\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{D}} P_2$ 构成自然变换且
还知道 $\eta_2 : P_2 \xrightarrow{\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{D}} P_3$ 为自然变换则有

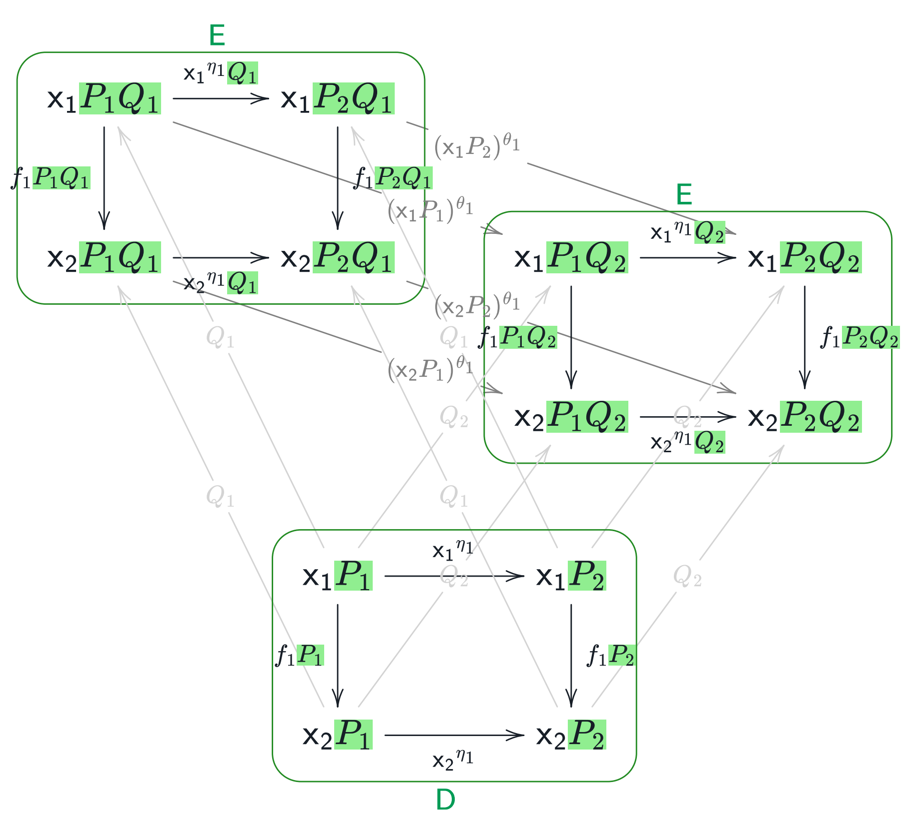
- $\eta_1 \overset{\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{D}}{\circ} \eta_2 : P_1 \xrightarrow{\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{D}} P_2$ 为自然变换，称作 η_1 和 η_2 的**纵复合**。

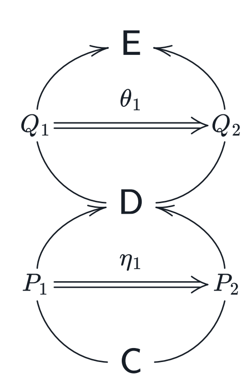




如果还知道 $Q_2 : \mathsf{D} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{E}$ 也是个函子
及自然变换 $\theta_1 : Q_1 \xrightarrow{\mathsf{D} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{E}} Q_2$，那么有

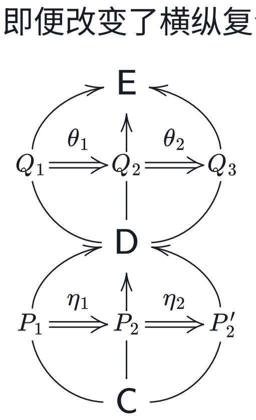
- $\eta_1 \circ \theta_1 : P_1 \overset{\mathsf{Cat}}{\circ} Q_1 \xrightarrow{\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{E}} P_2 \overset{\mathsf{Cat}}{\circ} Q_2$ 为自然变换，称作 η_1 和 θ_1 的**横复合**。





若 $\theta_2 : Q_2 \xrightarrow{\mathsf{D} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{E}} Q_3$ 为自然变换则

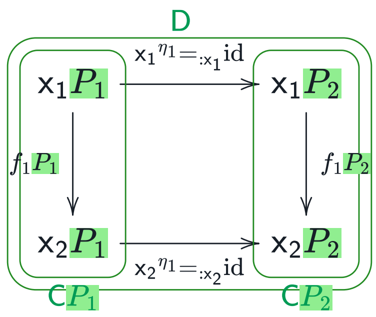
- $(\eta_1 \circ \theta_1) \overset{\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{E}}{\circ} (\eta_2 \circ \theta_2) = (\eta_1 \overset{\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{D}}{\circ} \eta_2) \circ (\theta_1 \overset{\mathsf{D} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{E}}{\circ} \theta_2)$，即便改变了横纵复合的先后顺序也不会影响最终结果。

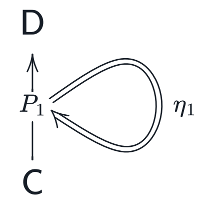


恒等自然变换

同样对于自然变换也有恒等映射 。

- ${}_{:P_1}\mathrm{id} : P_1 \xrightarrow{\overset{\mathsf{Cat}}{\mathsf{C} \longrightarrow \mathsf{D}}} P_1$ 为恒等自然变换当且仅当
  对范畴 C 中任意对象 x 有下述交换图成立 :





自然同构

自然同构与你想象中的同构不太像 。

- $\eta_1 : P_1 \xrightarrow{\overset{\mathsf{Cat}}{\mathsf{C} \longrightarrow \mathsf{D}}} P_2$ 为**自然同构**当且仅当
  x^{η_1} 总是同构 , 这里 x 为任意 C 中对象 。
  此时 P_1 , P_2 的关系可用 $P_1 \overset{\overset{\mathsf{Cat}}{\mathsf{C} \longrightarrow \mathsf{D}}}{\cong} P_2$ 表示

范畴等价的定义

我们用自然同构来定义范畴的等价 。

- $\mathsf{C} \overset{\mathsf{Cat}}{\cong} \mathsf{D}$ 当且仅当
  存在函子 $P_1 : \mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{D}$ 及 $P_1' : \mathsf{D} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{C}$
  使 $P_1 \overset{\mathsf{Cat}}{\circ} P_1' \overset{\overset{\mathsf{Cat}}{\mathsf{C} \longrightarrow \mathsf{C}}}{\cong} {}_{:\mathsf{C}}\mathrm{id}$ 且 $P_1' \overset{\mathsf{Cat}}{\circ} P_1 \overset{\overset{\mathsf{Cat}}{\mathsf{D} \longrightarrow \mathsf{D}}}{\cong} {}_{:\mathsf{D}}\mathrm{id}$ 。