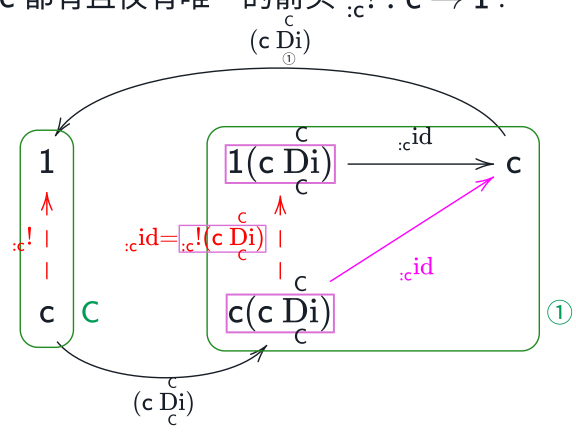
01 始对象和终对象

LaTeX Definitions are here.

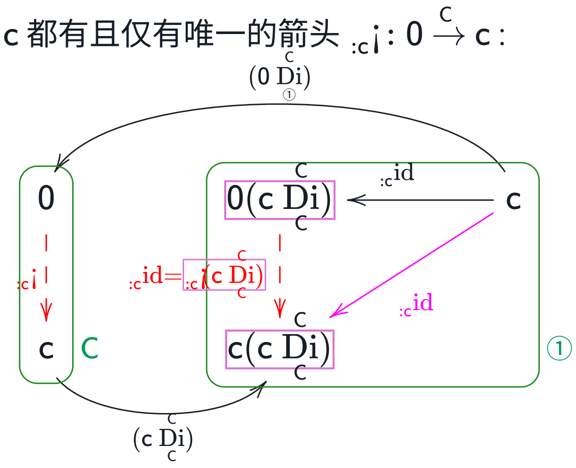
泛性质

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 c 都有且仅有唯一的箭头 ${}_{:c}! : c \overset{C}{\to} 1$：



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



> ⓘ **Note**
>
> - $\underset{①}{\overset{C}{\mathrm{Di}}} : C \xrightarrow{\mathrm{Cat}} (① \xrightarrow{\mathrm{Cat}} C)$
>
> $c \longmapsto$ 常值函子
>
> $c\,\underset{①}{\overset{C}{\mathrm{Di}}} : (① \xrightarrow{\mathrm{Cat}} C)$
>
> $1 \longmapsto c$
>
> $f \longmapsto {}_{:c}\mathrm{id}$
>
>   ① 为仅含单个函子的范畴，1 为其中的对象；仅含有单个对象的范畴可以被等价地视作为 ①。

若范畴 C 中真的含有 0 和 1 分别作为始对象和终对象 则根据上述信息可知

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

元素与全局元素

对任意对象 c_1, c_1', etc，c_2, c_2', etc，c_3 及任意的映射 i 我们进行如下的规定：

- i 为 c_2 的**元素**当且仅当 $i\,\overset{C}{\mathrm{tar}} = c_2$；
- i 为 c_1 的**全局元素**当且仅当 $i\,\overset{C}{\mathrm{tar}} = c_1$ 且 $i\,\overset{C}{\mathrm{src}} = 1$
- i 不存在仅当 $i\,\overset{C}{\mathrm{tar}} = 0$。

> ⓘ **Note**
>
> 其他范畴中刚才的断言未必成立。

02-03 范畴当中的箭头

LaTeX Definitions are here.

沿用上一节提到的自由变量。我们规定：

- $\mathsf{c}_1 \overset{\mathsf{C}}{\to} \mathsf{c}_2 =$
  所有从 c_1 射向 c_2 的箭头构成的集。

> **Note**
>
> 上述断言仅对于**局部小范畴**成立，
> 其他范畴里 $\mathsf{c}_1 \overset{\mathsf{C}}{\to} \mathsf{c}_2$ 未必构成集。

范畴 C 中特定的箭头可以进行复合运算：

- $$\begin{array}{rcl} \overset{\mathsf{C}}{\circ} : (\mathsf{c}_1 \overset{\mathsf{C}}{\to} \mathsf{c}_2) \times (\mathsf{c}_2 \overset{\mathsf{C}}{\to} \mathsf{c}_3) & \overset{\mathsf{Set}}{\longrightarrow} & (\mathsf{c}_1 \overset{\mathsf{C}}{\to} \mathsf{c}_3) \\ (\quad i_1 \quad . \quad i_2 \quad) & \longmapsto & (i_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} i_2) \end{array}$$

如果我们还知道箭头 f_1，i，f_2 分别属于
$\mathsf{c}_1' \overset{\mathsf{C}}{\to} \mathsf{c}_1$，$\mathsf{c}_1 \overset{\mathsf{C}}{\to} \mathsf{c}_2$，$\mathsf{c}_2 \overset{\mathsf{C}}{\to} \mathsf{c}_2'$ 那么便可知

- $(f_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} i) \overset{\mathsf{C}}{\circ} f_2 = f_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} (i \overset{\mathsf{C}}{\circ} f_2)$，
  即箭头复合运算具有**结合律**。

另外固定住一侧实参便可获得新的函数：

- $$\begin{array}{rcl} (f_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} \_) : (\mathsf{c}_1 \overset{\mathsf{C}}{\to} \_) & \xrightarrow{\mathsf{C} \overset{\mathsf{Cat}}{\longrightarrow} \mathsf{Set}} & (\mathsf{c}_1' \overset{\mathsf{C}}{\to} \_) \\ i & \longmapsto & (f_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} i) \end{array}$$
  称作**前复合**。下图有助于形象理解：

$$\begin{tikzcd}
\mathsf{c}_1 \arrow[rr, bend left, "i : \mathsf{c}_1 \overset{\mathsf{C}}{\longrightarrow} \mathsf{c}_2"] \arrow[r, phantom, "\mathsf{c}_2^{(f_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} _)}"] & {} & \mathsf{c}_2 \arrow[loop right, ":_{\mathsf{c}_2}\mathrm{id}"] \\
\mathsf{c}_1' \arrow[u, "f_1"] \arrow[urr, bend right, "(f_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} i) : \mathsf{c}_1' \overset{\mathsf{C}}{\longrightarrow} \mathsf{c}_2"'] & &
\end{tikzcd}$$

- $$\begin{array}{rcl} (\_ \overset{\mathsf{C}}{\circ} f_2) : (\_ \overset{\mathsf{C}}{\to} \mathsf{c}_2) & \xrightarrow{\mathsf{C} \overset{\mathsf{Cat}}{\longrightarrow} \mathsf{Set}} & (\_ \overset{\mathsf{C}}{\to} \mathsf{c}_2') \\ i & \longmapsto & (i \overset{\mathsf{C}}{\circ} f_1) \end{array}$$
  称作**后复合**。 下图有助于形象理解：

$$\begin{tikzcd}
& & \mathsf{c}_2 \arrow[d, "f_2"] \\
\mathsf{c}_1 \arrow[loop left, ":_{\mathsf{c}_1}\mathrm{id}"] \arrow[urr, bend left, "i : \mathsf{c}_1 \overset{\mathsf{C}}{\longrightarrow} \mathsf{c}_2"] \arrow[drr, bend right, "(i \overset{\mathsf{C}}{\circ} f_2) : \mathsf{c}_1 \overset{\mathsf{C}}{\longrightarrow} \mathsf{c}_2'"'] \arrow[r, phantom, "\mathsf{c}_1^{(_ \overset{\mathsf{C}}{\circ} f_2)}"] & {} & \\
& & \mathsf{c}_2'
\end{tikzcd}$$

根据上面的定义不难得出下述结论：

- $(f_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} \_) \overset{\mathsf{C} \overset{\mathsf{Cat}}{\longrightarrow} \mathsf{Set}}{\circ} (\_ \overset{\mathsf{C}}{\circ} f_2) = (\_ \overset{\mathsf{C}}{\circ} f_2) \overset{\mathsf{C} \overset{\mathsf{Cat}}{\longrightarrow} \mathsf{Set}}{\circ} (f_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} \_)$
  复合运算具有**结合律**，即后面提到的**自然性**；
- $(\_ \overset{\mathsf{C}}{\circ} i) \overset{\mathsf{C} \overset{\mathsf{Cat}}{\longrightarrow} \mathsf{Set}}{\circ} (\_ \overset{\mathsf{C}}{\circ} f_2) = (\_ \overset{\mathsf{C}}{\circ} (i \overset{\mathsf{C}}{\circ} f_2))$
  前复合与复合运算的关系
- $(i \overset{\mathsf{C}}{\circ} \_) \overset{\mathsf{C} \overset{\mathsf{Cat}}{\longrightarrow} \mathsf{Set}}{\circ} (f_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} \_) = ((f_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} i) \overset{\mathsf{C}}{\circ} \_)$
  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 c_1 的全局元素则可规定

- $c_1 i = c_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} i$

恒等箭头

范畴 C 内的每个对象都有恒等映射：

- $$\begin{aligned} {}_{:c_1}\mathrm{id} : {} & c_1 \overset{C}{\to} c_1 \\ & c_1 \mapsto c_1 \end{aligned}$$

如此我们便可以得出下述重要等式：

- $$\begin{aligned} {}_{:c_1}\mathrm{id} \overset{C}{\circ} i &= i \\ &= i \overset{C}{\circ} {}_{:c_2}\mathrm{id} \end{aligned}$$

此外还可以得知

- $({}_{:c_1}\mathrm{id} \overset{C}{\circ} \_) : (c_1 \overset{C}{\to} \_) \xrightarrow{C \xrightarrow{\mathrm{Cat}} \mathrm{Set}} (c_1 \overset{C}{\to} \_)$
  为恒等自然变换，可记成是 ${}_{:(c_1 \overset{C}{\to} \_)}\mathrm{id}$；
- $(\_ \overset{C}{\circ} {}_{:c_2}\mathrm{id}) : (\_ \overset{C}{\to} c_2) \xrightarrow{C \xrightarrow{\mathrm{Cat}} \mathrm{Set}} (\_ \overset{C}{\to} c_2)$
  为恒等自然变换，可记成是 ${}_{:(\_ \overset{C}{\to} c_2)}\mathrm{id}$。

单满态以及同构

接下来给出单 / 满态和同构的定义。

- i 为**单态**当且仅当对任意 c'_1
  若有 $f_1, f'_1 : c'_1 \overset{C}{\to} c_1$ 满足 $f_1 \overset{C}{\circ} i = f'_1 \overset{C}{\circ} i$
  则有 $f_1 = f'_1$。详情见下图：

$$\begin{tikzcd}
c_1 \arrow[rrd, bend left, "i : c_1 \xrightarrow{C} c_2"] & & \\
& {} \arrow[r, phantom, "c_2^{(f_1 \overset{C}{\circ} _)}"] & c_2 \arrow[loop right, "{}_{:c_2}\mathrm{id}"] \\
c'_1 \arrow[uu, shift left, "f_1"] \arrow[uu, shift right, "f'_1"'] \arrow[rru, bend right, "(f_1 \overset{C}{\circ} i) : c'_1 \xrightarrow{C} c_2"'] & &
\end{tikzcd}$$

- i 为**满态**当且仅当对任意 c'_2
  若有 $f_2, f'_2 : c_2 \overset{C}{\to} c'_2$ 满足 $i \overset{C}{\circ} f_2 = i \overset{C}{\circ} f'_2$
  则有 $f_2 = f'_2$。详情见下图：

$$\begin{tikzcd}
& & c_2 \arrow[dd, shift right, "f'_2"'] \arrow[dd, shift left, "f_2"] \\
c_1 \arrow[loop left, "{}_{:c_1}\mathrm{id}"] \arrow[rru, bend left, "i : c_1 \xrightarrow{C} c_2"] \arrow[rrd, bend right, "(i \overset{C}{\circ} f_2) : c_1 \xrightarrow{C} c'_2"'] & {} \arrow[r, phantom, "c_1^{(_ \overset{C}{\circ} f_2)}"] & \\
& & c'_2
\end{tikzcd}$$

- i 为**同构**当且仅当存在 $i' : c_2 \overset{C}{\to} c_1$
  使得 $i \overset{C}{\circ} i' = {}_{:c_1}\mathrm{id}$ 且 $i' \overset{C}{\circ} i = {}_{:c_2}\mathrm{id}$。
  此时 c_1, c_2 间的关系可记作 $c_1 \cong c_2$。

若还知道 $i = i_1$ 且 $i_2 : c_2 \overset{C}{\to} c_3$ 则有

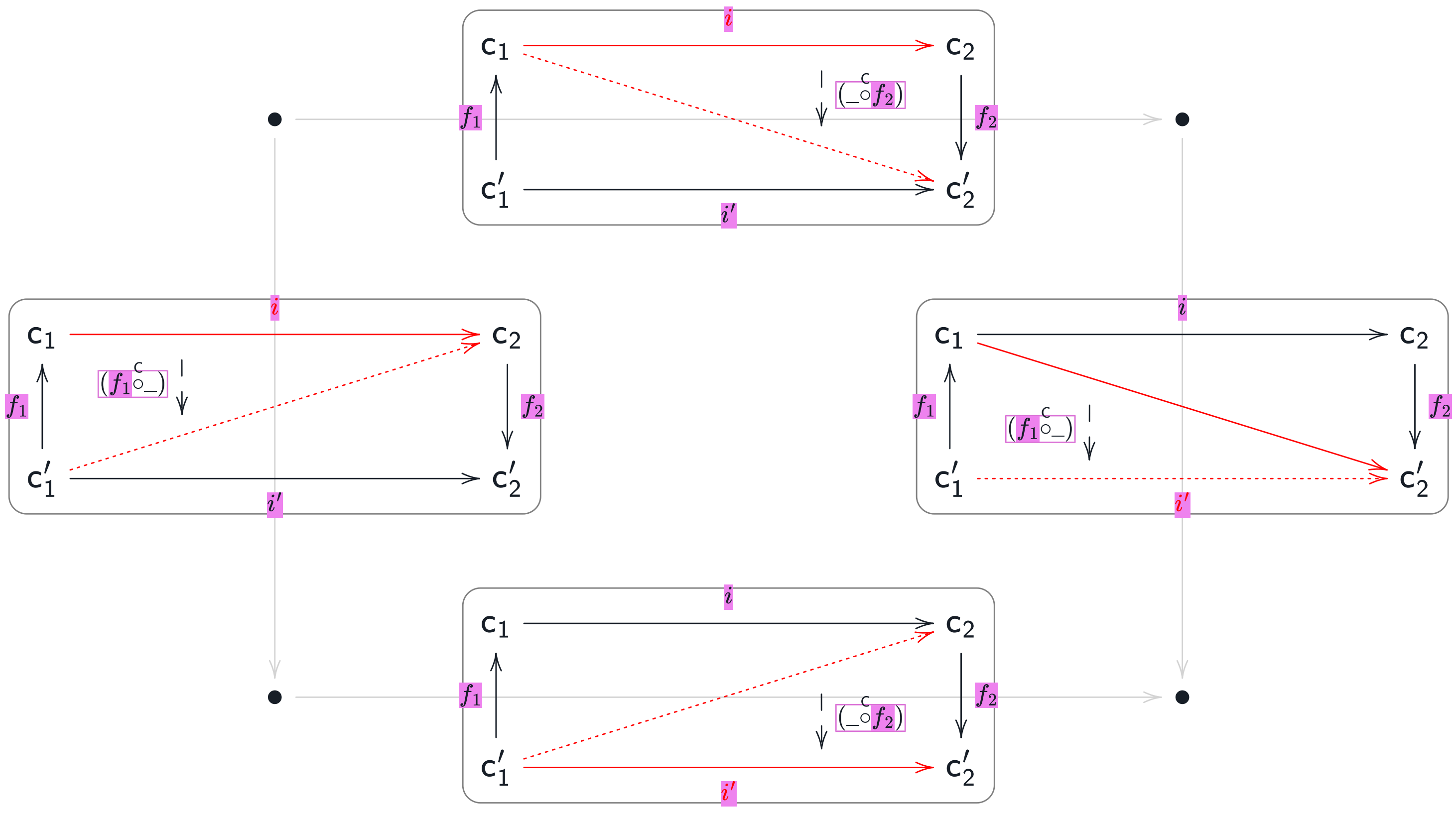
- 若 i_1，i_2 为单态 / 满态 / 同构
  则 $i_1 \overset{C}{\circ} i_2$ 为单态 / 满态 / 同构；
- 若 $i_1 \overset{C}{\circ} i_2$ 为同构
  且 i_1，i_2 中有一个为同构
  则 i_1，i_2 两者皆构成同构。

不仅如此我们还可以得出下述结论：

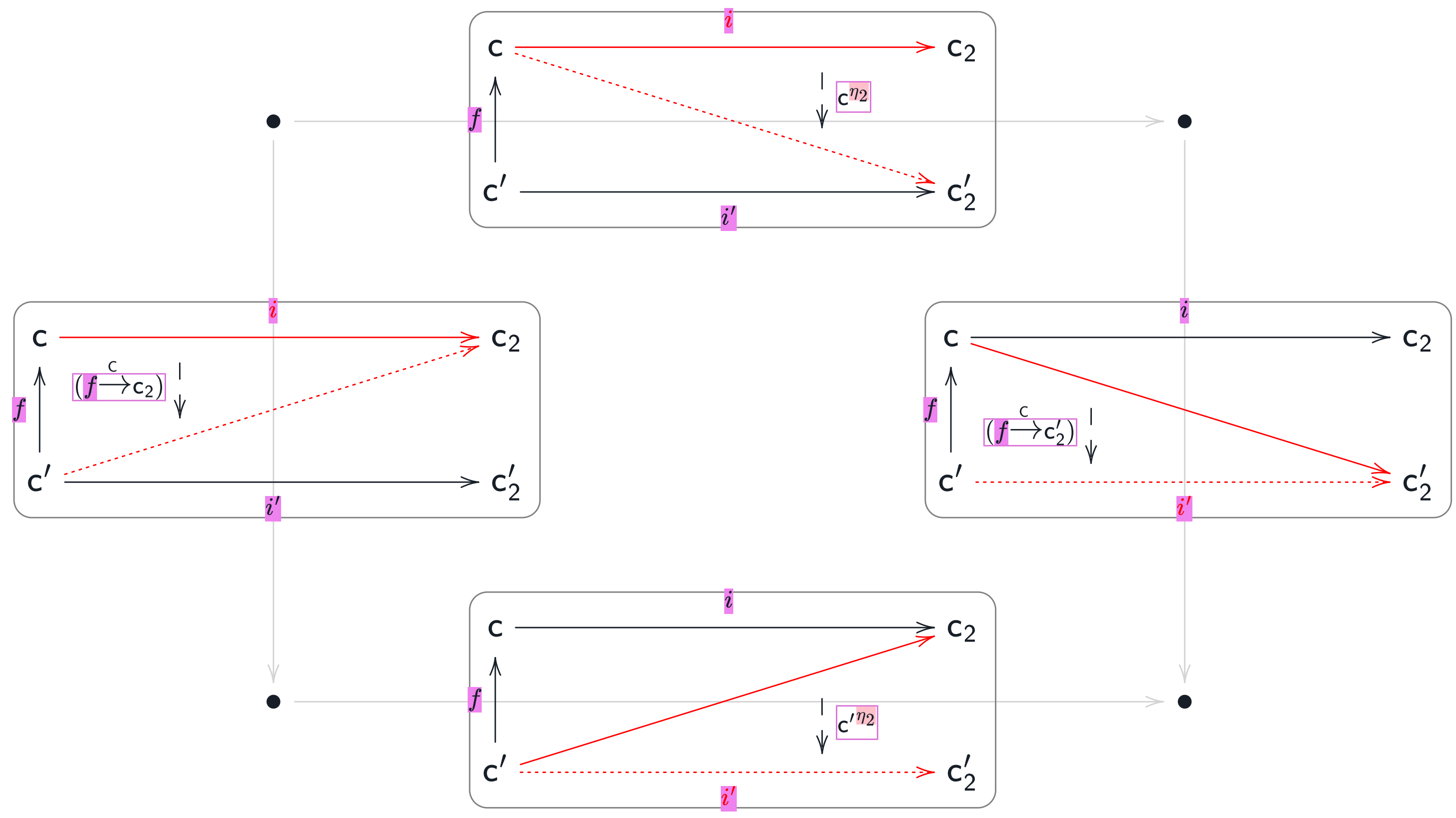
- c_1 为单态，
  由 ${}_{:c_1}!$ 的唯一性可知；
- ${}_{:0}! = {}_{:1}¡$ 为同构，
  因为 $0 \overset{C}{\to} 0 = \{{}_{:0}\mathrm{id}\}$
  并且 $1 \overset{C}{\to} 1 = \{{}_{:1}\mathrm{id}\}$

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 。



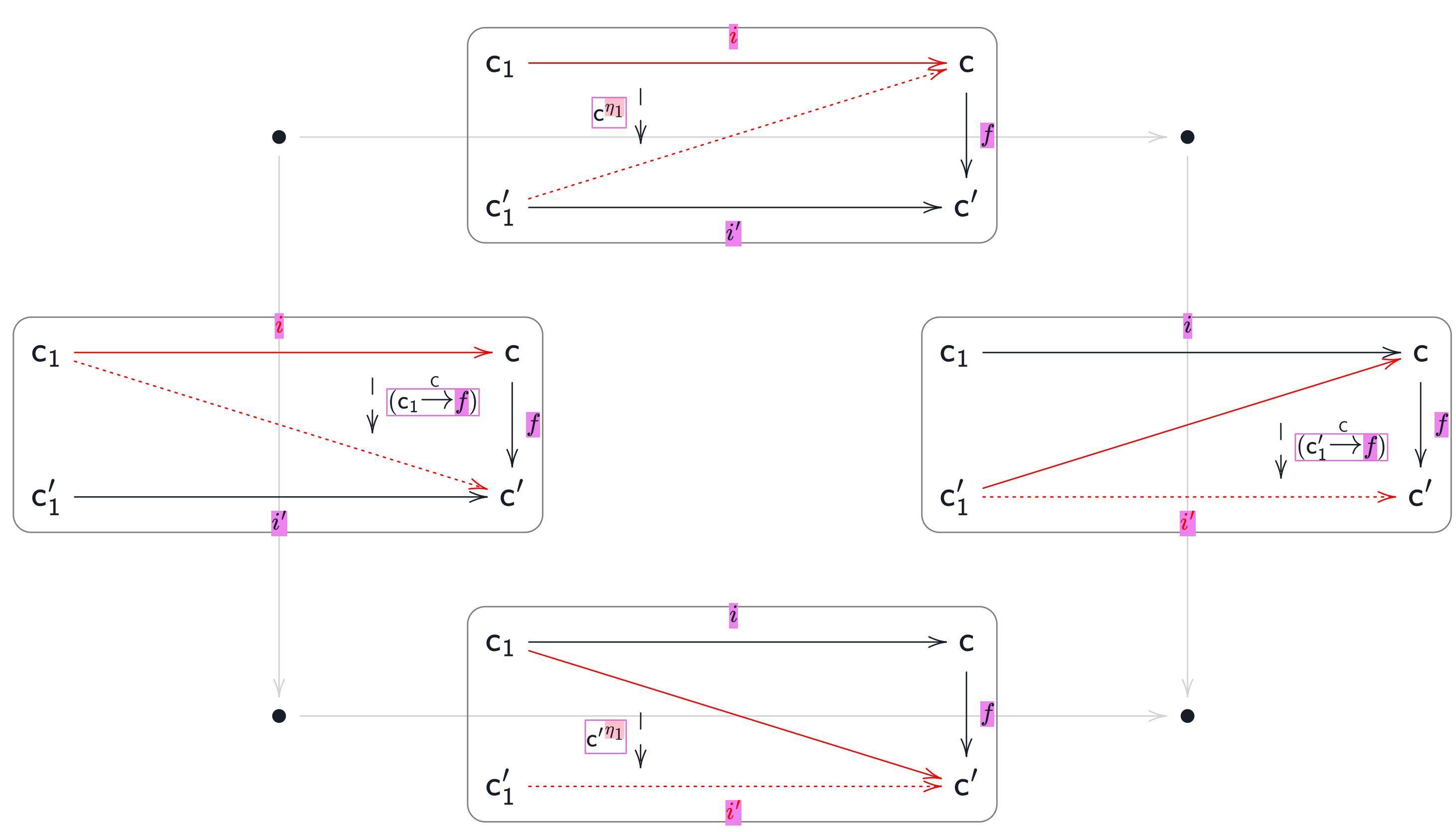
现提供自然变换 η_2 满足自然性 —— 即对
任意 C 中对象 c, c' 以及
任意 C 中映射 $f : (c' \xrightarrow{\mathsf{C}} c)$
都有 $(f \xrightarrow{\mathsf{C}} c_2) \overset{\mathsf{Set}}{\circ} c'^{\eta_2} = c^{\eta_2} \overset{\mathsf{Set}}{\circ} (f \xrightarrow{\mathsf{C}} c_2')$:



那么我们便会有下述结论：

- $c_2 \overset{\mathsf{C}}{\cong} c_2'$ 当且仅当对任意 C 中的对象 c
  c^{η_2} 都是同构 。此时称 η_2 为**自然同构** 。

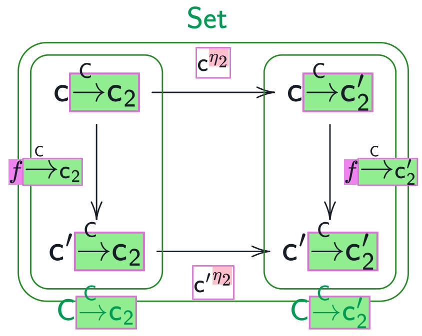
现提供自然变换 η_1 满足自然性 —— 即对
任意 C 中对象 c, c' 以及
任意 C 中映射 $f : c \xrightarrow{\mathsf{C}} c'$
都有 $(c_1 \xrightarrow{\mathsf{C}} f) \overset{\mathsf{Set}}{\circ} c'^{\eta_1} = c^{\eta_1} \overset{\mathsf{Set}}{\circ} (c_1' \xrightarrow{\mathsf{C}} f)$:



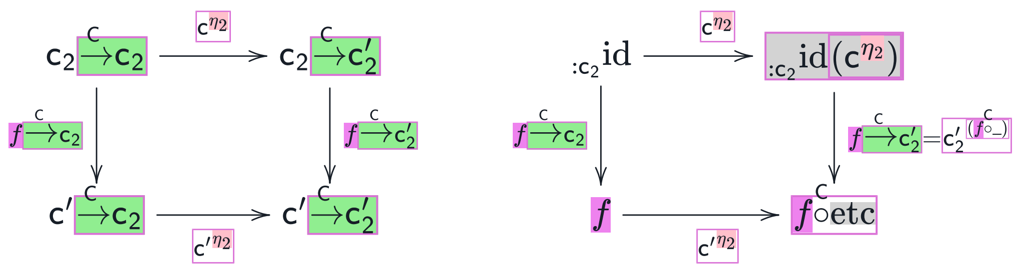
那么我们便会有下述结论：

- $c_1 \overset{\mathsf{C}}{\cong} c_1'$ 当且仅当对任意 C 中的对象 c
  c^{η_1} 都是同构 。此时称 η_1 为**自然同构** 。

上一页的第一条定理若用交换图表示则应为



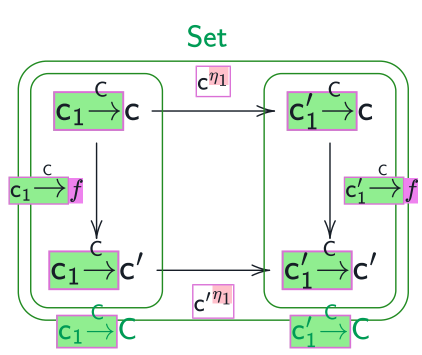
$\Rightarrow$ 易证，$\Leftarrow$ 用到了米田技巧 将 c 换成 c_2 ：



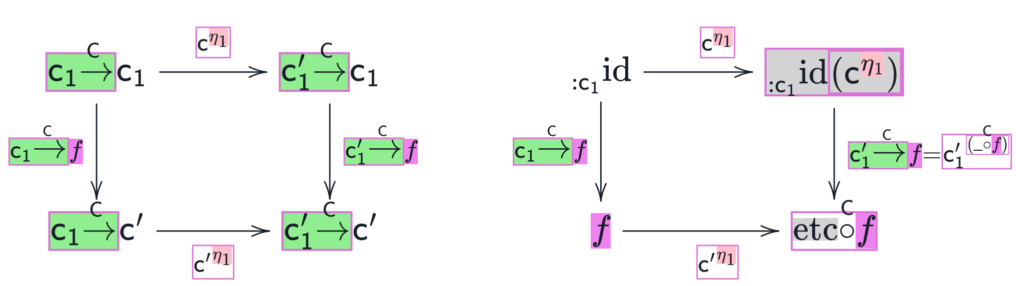
为了方便就用 etc 表示 $:_{c_2}\mathrm{id}(c^{\eta_2})$ 。由上图
知 $f(c'^{\eta_2}) = (f \overset{c}{\circ} \mathrm{etc})$ 右图底部和右侧箭头，
故 $c'^{\eta_2} = c' \overset{c}{\to} \mathrm{etc}$ 注意到箭头 $f : c' \overset{c}{\to} c$ ；
而 $c'^{\eta_2} = c' \overset{c}{\to} \mathrm{etc} = c'^{(\_\overset{c}{\circ}\mathrm{etc})}$ 始终是同构
故 $\mathrm{etc} : c_2 \overset{c}{\to} c_2'$ 也是同构 。

> 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



$\Rightarrow$ 易证，$\Leftarrow$ 用到了米田技巧 将 c 换成 c_1 ：



为了方便就用 etc 表示 $:_{c_1}\mathrm{id}(c^{\eta_1})$ 。由上图
知 $f(c'^{\eta_1}) = (\mathrm{etc} \overset{c}{\circ} f)$ 右图底部和右侧箭头，
故 $c'^{\eta_1} = \mathrm{etc} \overset{c}{\to} c'$ 注意到箭头 $f : c \overset{c}{\to} c'$ ；
而 $c'^{\eta_1} = \mathrm{etc} \overset{c}{\to} c' = c'^{(\mathrm{etc}\overset{c}{\circ}\_)}$ 始终是同构
故 $\mathrm{etc} : c_1 \overset{c}{\to} c_1'$ 也是同构 。

> 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 。

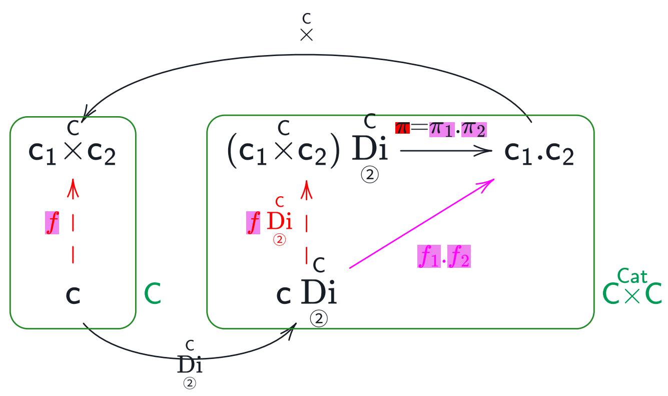
04-05 类型的和与积

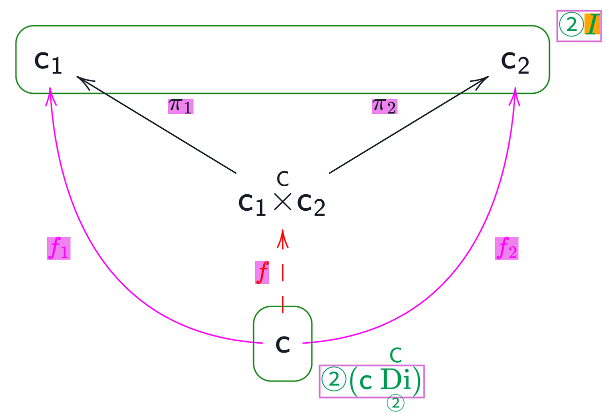
LaTeX Definitions are here.

泛性质

默认函子 $\overset{\mathsf{C}}{\times} : (\mathsf{C} \overset{\mathsf{Cat}}{\times} \mathsf{C}) \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{C}$ 在范畴 C 中有如下性质：

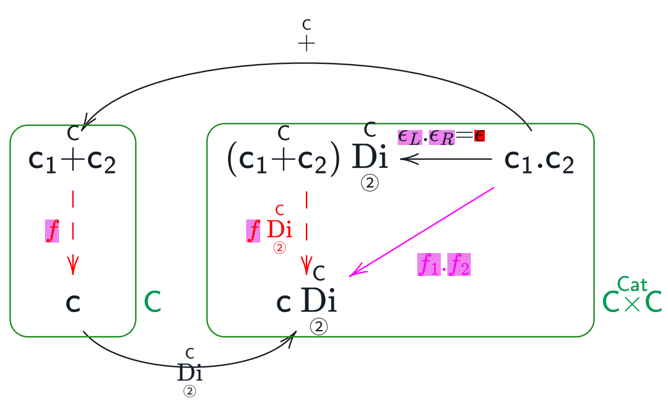
- $(c \overset{\mathsf{C}}{\to} c_1) \overset{\mathsf{Set}}{\times} (c \overset{\mathsf{C}}{\to} c_2) \overset{\mathsf{Set}}{\cong} c \overset{\mathsf{C}}{\to} (c_1 \overset{\mathsf{C}}{\times} c_2)$
  —— c 为任意 C 中对象。此即为积的
  泛性质，亦为**指数对乘法的分配律** 。

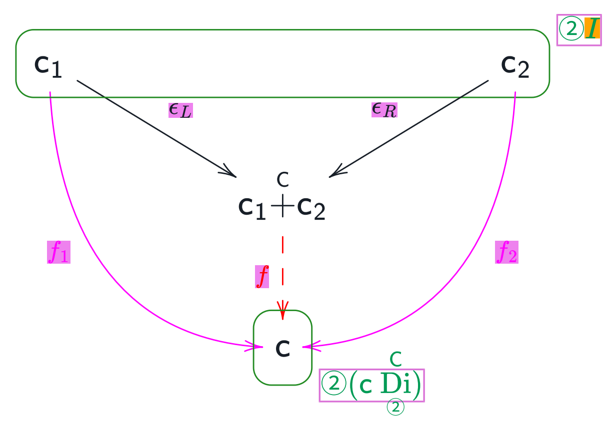




默认函子 $\overset{\mathsf{C}}{+} : (\mathsf{C} \overset{\mathsf{Cat}}{\times} \mathsf{C}) \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{C}$ 在范畴 C 中有如下性质：

- $(c_1 \overset{\mathsf{C}}{\to} c) \overset{\mathsf{Set}}{\times} (c_2 \overset{\mathsf{C}}{\to} c) \overset{\mathsf{Set}}{\cong} (c_1 \overset{\mathsf{C}}{+} c_2) \overset{\mathsf{C}}{\to} c$
  —— c 为任意 C 中对象。此即为和的
  泛性质，亦为**指数对加法的分配律** 。





ⓘ **Note**

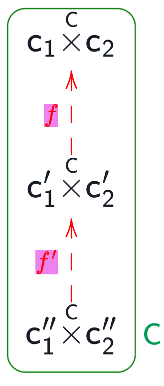
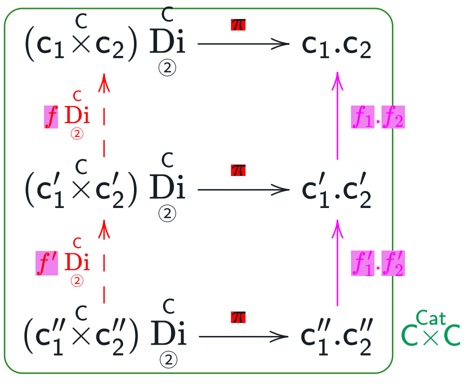
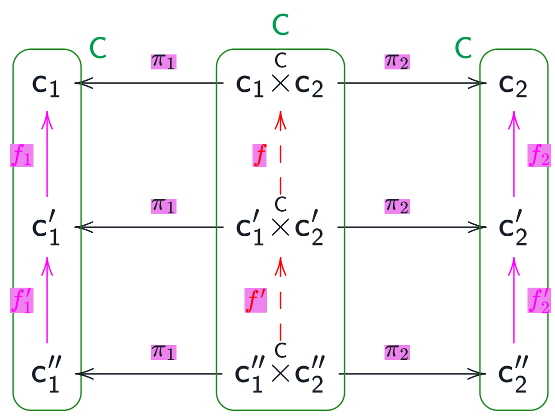
在上面的插图中

- $\underset{\textcircled{2}}{\overset{\mathsf{C}}{\mathrm{Di}}} : \mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} (\mathsf{C} \overset{\mathsf{Cat}}{\times} \mathsf{C})$ 为对角函子满足
  $c \longmapsto (c \,.\, c)$
- $\underset{\textcircled{2}}{\overset{\mathsf{C}}{\mathrm{Di}}} : \mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} (\textcircled{2} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{C})$
  $c \longmapsto$ 常值函子
  $c\ \underset{\textcircled{2}}{\overset{\mathsf{C}}{\mathrm{Di}}} : \quad \textcircled{2} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{C}$
  $1 \longmapsto c$
  $2 \longmapsto c$
  $f \longmapsto {}_{:c}\mathrm{id}$
  即为对角函子的第二种等价的定义 。
  ② 为仅含两个对象的范畴，在此则
  作为一个指标范畴 。1 和 2 分别为
  其中的对象 。
- $I : \textcircled{2} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{C}$ 为函子，满足
  $1 \longmapsto c_1$
  $2 \longmapsto c_2$
- 不难看出上图中
  $\pi : I \xrightarrow{\mathsf{Cat}} (c_1 \overset{\mathsf{C}}{\times} c_2)\ \underset{\textcircled{2}}{\overset{\mathsf{C}}{\mathrm{Di}}}$
  $\epsilon : (c_1 \overset{\mathsf{C}}{+} c_2)\ \underset{\textcircled{2}}{\overset{\mathsf{C}}{\mathrm{Di}}} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} I$
  都构成自然变换

函子性

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

- $\overset{\mathsf{C}}{\times} : ({}_{:\mathsf{c}'_1}\mathrm{id} \,.\, {}_{:\mathsf{c}'_2}\mathrm{id}) \longmapsto {}_{:(\mathsf{c}'_1 \overset{\mathsf{C}}{\times} \mathsf{c}'_2)}\mathrm{id}$
  —— 即函子 $\overset{\mathsf{C}}{\times}$ 保持**恒等箭头**；
- $\overset{\mathsf{C}}{\times} : (f'_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} f_1 \,.\, f'_2 \overset{\mathsf{C}}{\circ} f_2) \longmapsto (f' \overset{\mathsf{C}}{\circ} f)$
  —— 即函子 $\overset{\mathsf{C}}{\times}$ 保持**箭头复合运算**。
  下图有助于形象理解证明的过程：

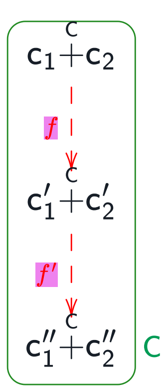
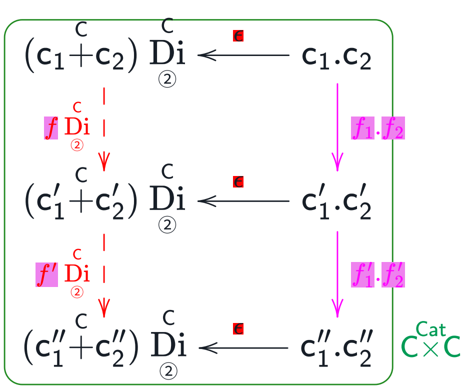
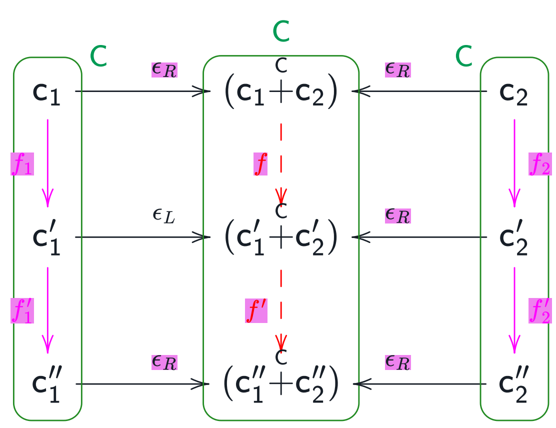




另外我们规定 $\overset{\mathsf{C}}{\times}$ 在实参分别为
箭头和对象时的输出结果如下：

- $\overset{\mathsf{C}}{\times} : (f_1 \,.\, \mathsf{c}_2) \longmapsto (f_1 \overset{\mathsf{C}}{\times} {}_{:\mathsf{c}_2}\mathrm{id})$
  $\overset{\mathsf{C}}{\times} : (\mathsf{c}_1 \,.\, f_2) \longmapsto ({}_{:\mathsf{c}_1}\mathrm{id} \overset{\mathsf{C}}{\times} f_2)$

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

- $\overset{\mathsf{C}}{+} : ({}_{:\mathsf{c}_1}\mathrm{id} \,.\, {}_{:\mathsf{c}_2}\mathrm{id}) \longmapsto {}_{:(\mathsf{c}_1 \overset{\mathsf{C}}{+} \mathsf{c}_2)}\mathrm{id}$
  —— 即函子 $\overset{\mathsf{C}}{+}$ 保持**恒等箭头**；
- $\overset{\mathsf{C}}{+} : (f_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} f'_1 \,.\, f_2 \overset{\mathsf{C}}{\circ} f'_2) \longmapsto (f \overset{\mathsf{C}}{\circ} f')$
  —— 即函子 $\overset{\mathsf{C}}{\times}$ 保持**箭头复合运算**。
  下图有助于形象理解证明的过程：

另外我们规定 $\overset{\mathsf{C}}{+}$ 在实参分别为
箭头和对象时的输出结果如下：

- $\overset{\mathsf{C}}{+} : (f_1 \,.\, \mathsf{c}_2) \longmapsto (f_1 \overset{\mathsf{C}}{+} {}_{:\mathsf{c}_2}\mathrm{id})$
  $\overset{\mathsf{C}}{+} : (\mathsf{c}_1 \,.\, f_2) \longmapsto ({}_{:\mathsf{c}_1}\mathrm{id} \overset{\mathsf{C}}{+} f_2)$

运算性质

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

- $c_1 \overset{\mathsf{C}}{\times} 1 \overset{\mathsf{C}}{\cong} c_1 \overset{\mathsf{C}}{\times} 1 \overset{\mathsf{C}}{\cong} c_1$
  —— 乘法具有**幺元 1**。
  下图有助于理解证明目标，即 $f_1 . {:_c}!$ 能唯一决定 f 和 f'。

$$
\begin{tikzcd}
(c_1 \overset{\mathsf{C}}{\times} 1)\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}} \arrow[rr, "\pi = \pi_1 . \pi_2"] && c_1 . 1 \\
c\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}} \arrow[u, dashed, "f\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}}"] \arrow[urr, "f_1 . {:_c}!"']
\end{tikzcd}
\qquad
\begin{tikzcd}
c_1\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}} \arrow[rr, "{:_{c_1}}\mathrm{id} . {:_{c_1}}!"] && c_1 . 1 \\
c\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}} \arrow[u, dashed, "f'\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}}"] \arrow[urr, "f_1 . {:_c}!"']
\end{tikzcd}
$$

- $c_1 \overset{\mathsf{C}}{\times} c_2 \overset{\mathsf{C}}{\cong} c_2 \overset{\mathsf{C}}{\times} c_1$
  —— 乘法具有**交换律**。
  下图有助于理解证明目标，即 $f_1 . f_2$ 能唯一决定 f 和 f'。

$$
\begin{tikzcd}
(c_1 \overset{\mathsf{C}}{\times} c_2)\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}} \arrow[rr, "\pi = \pi_1 . \pi_2"] && c_1 . c_2 \\
c\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}} \arrow[u, dashed, "f\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}}"] \arrow[urr, "f_1 . f_2"']
\end{tikzcd}
\qquad
\begin{tikzcd}
(c_2 \overset{\mathsf{C}}{\times} c_1)\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}} \arrow[rr, "\pi = \pi_1 . \pi_2"] && c_2 . c_1 \\
c\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}} \arrow[u, dashed, "f'\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}}"] \arrow[urr, "f_2 . f_1"']
\end{tikzcd}
$$

- $(c_1 \overset{\mathsf{C}}{\times} c_2) \overset{\mathsf{C}}{\times} c_3 \overset{\mathsf{C}}{\cong} c_1 \overset{\mathsf{C}}{\times} (c_2 \overset{\mathsf{C}}{\times} c_3)$
  —— 乘法具有**结合律**。
  下图有助于理解证明目标，即 $(f_1 . f_2) . f_3$ 唯一决定 f 和 f'。

$$
\begin{tikzcd}
((c_1 \overset{\mathsf{C}}{\times} c_2) \overset{\mathsf{C}}{\times} c_3)\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}} \arrow[r, "\pi"] & (c_1 \overset{\mathsf{C}}{\times} c_2) . c_3 \arrow[r, "\pi . {:_{c_3}}\mathrm{id}"] & (c_1 . c_2) . c_3 \\
c_3\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}} \arrow[u, dashed, "f\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}}"] \arrow[ur, dotted, "j . f_3"] \arrow[urr, "(f_1 . f_2) . f_3"']
\end{tikzcd}
\qquad
\begin{tikzcd}
(c_1 \overset{\mathsf{C}}{\times} (c_2 \overset{\mathsf{C}}{\times} c_3))\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}} \arrow[r, "\pi"] & c_1 . (c_2 \overset{\mathsf{C}}{\times} c_3) \arrow[r, "{:_{c_1}}\mathrm{id} . \pi"] & c_1 . (c_2 . c_3) \\
c_3\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}} \arrow[u, dashed, "f\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}}"] \arrow[ur, dotted, "f_1 . j"] \arrow[urr, "f_1 . (f_2 . f_3)"']
\end{tikzcd}
$$

对于函子 $\overset{\mathsf{C}}{+}$ 我们不难得知

- $c_1 \overset{\mathsf{C}}{+} 0 \overset{\mathsf{C}}{\cong} c_1 \overset{\mathsf{C}}{+} 1 \overset{\mathsf{C}}{\cong} c_1$
  —— 加法具有**幺元 0**。
  下图有助于理解证明目标，即 $f_1 . {:_c}¡$ 能唯一决定 f 和 f'。

$$
\begin{tikzcd}
(c_1 \overset{\mathsf{C}}{+} 0)\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}} \arrow[d, dashed, "f\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}}"'] && c_1 . 0 \arrow[ll, "\epsilon_L . \epsilon_R = \epsilon"'] \arrow[dll, "f_1 . {:_c}¡"] \\
c\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}}
\end{tikzcd}
\qquad
\begin{tikzcd}
c_1\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}} \arrow[d, dashed, "f'\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}}"'] && c_1 . 0 \arrow[ll, "\epsilon_L . \epsilon_R = \epsilon"'] \arrow[dll, "f_1 . {:_c}¡"] \\
c\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}}
\end{tikzcd}
$$

- $c_1 \overset{\mathsf{C}}{+} c_2 \overset{\mathsf{C}}{\cong} c_2 \overset{\mathsf{C}}{+} c_1$
  —— 加法具有**交换律**。
  下图有助于理解证明目标，即 $f_1 . f_2$ 能唯一决定 f 和 f'。

$$
\begin{tikzcd}
(c_1 \overset{\mathsf{C}}{+} c_2)\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}} \arrow[d, dashed, "f\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}}"'] && c_1 . c_2 \arrow[ll, "\epsilon_L . \epsilon_R = \epsilon"'] \arrow[dll, "f_1 . f_2"] \\
c\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}}
\end{tikzcd}
\qquad
\begin{tikzcd}
(c_2 \overset{\mathsf{C}}{+} c_1)\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}} \arrow[d, dashed, "f'\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}}"'] && c_2 . c_1 \arrow[ll, "\epsilon_L . \epsilon_R = \epsilon"'] \arrow[dll, "f_2 . f_1"] \\
c\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}}
\end{tikzcd}
$$

- $(c_1 \overset{\mathsf{C}}{+} c_2) \overset{\mathsf{C}}{+} c_3 \overset{\mathsf{C}}{\cong} c_1 \overset{\mathsf{C}}{+} (c_2 \overset{\mathsf{C}}{+} c_3)$
  —— 加法具有**结合律**。
  下图有助于理解证明目标，即 $(f_1 . f_2) . f_3$ 唯一决定 f 和 f'。

$$
\begin{tikzcd}
((c_1 \overset{\mathsf{C}}{+} c_2) \overset{\mathsf{C}}{+} c_3)\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}} \arrow[d, dashed, "f\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}}"'] & (c_1 \overset{\mathsf{C}}{+} c_2) . c_3 \arrow[l, "\epsilon"'] \arrow[dl, dotted, "j . f_3"] & (c_1 . c_2) . c_3 \arrow[l, "\epsilon . {:_{c_3}}\mathrm{id}"'] \arrow[dll, "(f_1 . f_2) . f_3"] \\
c\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}}
\end{tikzcd}
\qquad
\begin{tikzcd}
(c_1 \overset{\mathsf{C}}{+} (c_2 \overset{\mathsf{C}}{+} c_3))\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}} \arrow[d, dashed, "f\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}}"'] & c_1 . (c_2 \overset{\mathsf{C}}{+} c_3) \arrow[l, "\epsilon"'] \arrow[dl, dotted, "f_1 . j"] & c_1 . (c_2 . c_3) \arrow[l, "\epsilon . {:_{c_3}}\mathrm{id}"'] \arrow[dll, "f_1 . (f_2 . f_3)"] \\
c\ \overset{\mathsf{C}}{\underset{②}{\mathrm{Di}}}
\end{tikzcd}
$$

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：

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

$$\begin{tikzcd}
(m \overset{C}{\times} m) \overset{C}{\times} m \arrow[rr, "结合律\ \boldsymbol{a}"] \arrow[d, "先算左侧括号\ \boldsymbol{p} \overset{C}{\otimes} {:_m}\mathrm{id}"'] & & m \overset{C}{\times} (m \overset{C}{\times} m) \arrow[d, "{:_m}\mathrm{id} \overset{C}{\otimes} \boldsymbol{p}\ 先算右侧括号"] \\
m \overset{C}{\times} m \arrow[r, "再算最终结果\ \boldsymbol{p}"'] & m & m \overset{C}{\times} m \arrow[l, "\boldsymbol{p}\ 果结终最算再"]
\end{tikzcd}$$

  其中

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

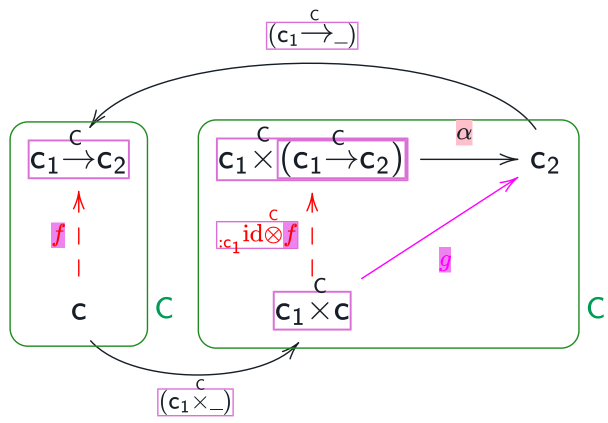
06 类型的幂

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：

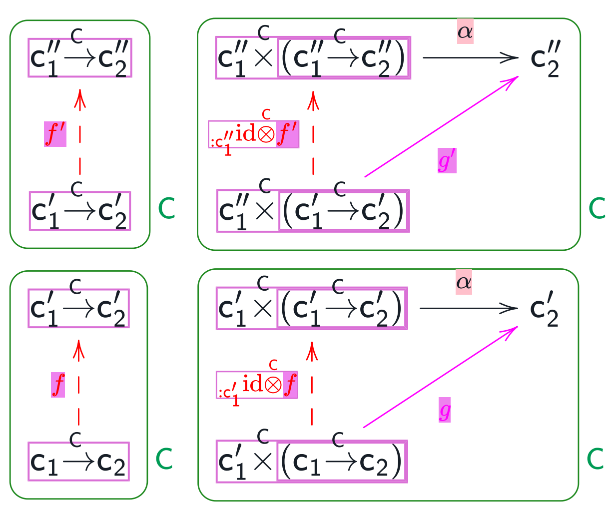
- $(c_1 \overset{\mathsf{C}}{\times} c) \overset{\mathsf{C}}{\to} c_2 \overset{\mathsf{Set}}{\cong} c \overset{\mathsf{C}}{\to} (c_1 \overset{\mathsf{C}}{\to} c_2) \overset{\mathsf{Set}}{\cong} c_1 \overset{\mathsf{C}}{\to} (c \overset{\mathsf{C}}{\to} c_2)$
  —— c 为任意 C 中对象 。此即为幂的泛性质，亦表示了**指数加乘法之间的运算关系** 。

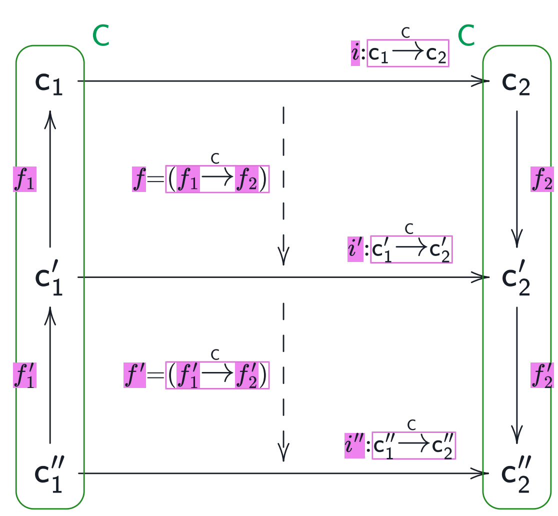


函子性

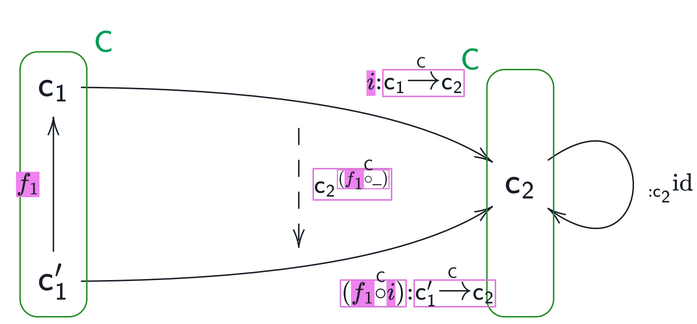
如何证明 $\overset{\mathsf{C}}{\to}$ 构成函子呢？请看

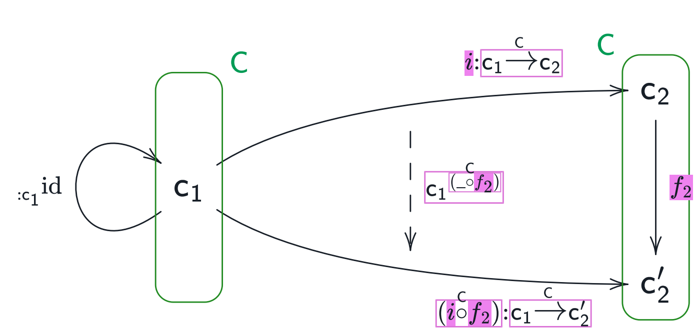
- $\overset{\mathsf{C}}{\to}$: $({}_{:c_1}\mathrm{id} \,.\, {}_{:c_2}\mathrm{id}) \longmapsto {}_{:(c_1 \overset{\mathsf{C}}{\to} c_2)}\mathrm{id}$
  —— 即函子 $\overset{\mathsf{C}}{\to}$ 能**保持恒等箭头**；
- $\overset{\mathsf{C}}{\to}$: $(f_1' \overset{\mathsf{C}}{\circ} f_1 \,.\, f_2 \overset{\mathsf{C}}{\circ} f_2') \longmapsto (f \overset{\mathsf{C}}{\circ} f')$
  —— 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 c_1 和 c_2 间的箭头构成一个集合 $c_1 \xrightarrow{C} c_2$，
说明 $\xrightarrow{C}$ 只能将两个对象打到一个集合；下面使 $\xrightarrow{C}$ 升级为函子：
若还知道箭头 $f_1 : c_1' \xrightarrow{C} c_1$ 以及 $f_2 : c_2 \xrightarrow{C} c_2'$，则规定

- $(\_ \xrightarrow{C} c_2) : C^{op} \overset{Cat}{\times} \cancel{C} \xrightarrow{Cat} Set$ 为函子且
  $(\_ \xrightarrow{C} c_2) : c \longmapsto (c \xrightarrow{C} c_2)$ 且对任意 $f : c' \xrightarrow{C} c$ 有
  $(\_ \xrightarrow{C} c_2) : f \longmapsto (f \xrightarrow{C} c_2) = (f \xrightarrow{C} {}_{:c_2}\mathrm{id}) = c_2^{(f \overset{C}{\circ} \_)}$
  图 1 有助于理解。
  $(\_ \xrightarrow{C} f_2) : C^{op} \overset{Cat}{\times} \cancel{C} \xrightarrow{Cat} Set$，
  $(\_ \xrightarrow{C} f_2) : c \longmapsto (c \xrightarrow{C} f_2) = ({}_{:c}\mathrm{id} \xrightarrow{C} f_2) = c_2^{(\_ \overset{C}{\circ} f_2)}$ 且对任意 $f : c' \xrightarrow{C} c$ 有
  $(\_ \xrightarrow{C} f_2) : f \longmapsto (f \xrightarrow{C} f_2) = (f \overset{C}{\circ} \_) \overset{C \xrightarrow{} Set}{\circ} (\_ \overset{C}{\circ} f_2) = (\_ \overset{C}{\circ} f_2) \overset{C \xrightarrow{} Set}{\circ} (f \overset{C}{\circ} \_)$
  图 2 有助于理解。

  > **Note**
  >
  > 不难看出
  >
  > - よ : $C \xrightarrow{Cat} (C^{op} \xrightarrow{Set} Set)$
  > $c_2 \longmapsto (c_2 \xrightarrow{C^{op}} \_) = (\_ \xrightarrow{C} c_2)$ 构成一个函子
  > $f_2 \longmapsto (f_2 \xrightarrow{C^{op}} \_) = (\_ \xrightarrow{C} f_2) = (\_ \overset{C}{\circ} f_2)$ 构成一个函子间映射，即自然变换
  >
  >   该函子称作是**米田嵌入**。

- $(c_1 \xrightarrow{C} \_) : \cancel{C^{op}} \overset{Cat}{\times} C \xrightarrow{Cat} Set$ 为函子且
  $(c_1 \xrightarrow{C} \_) : c \longmapsto (c_1 \xrightarrow{C} c)$，且对任意 $f : c \xrightarrow{C} c'$ 有
  $(c_1 \xrightarrow{C} \_) : f \longmapsto (c_1 \xrightarrow{C} f) = ({}_{:c_1}\mathrm{id} \xrightarrow{C} f) = c_1^{(\_ \overset{C}{\circ} f)}$
  图 2 有助于理解。
  $(f_1 \xrightarrow{C} \_) : \cancel{C^{op}} \overset{Cat}{\times} C \xrightarrow{Cat} Set$，
  $(f_1 \xrightarrow{C} \_) : c \longmapsto (f_1 \xrightarrow{C} c) = (f_1 \xrightarrow{C} {}_{:c}\mathrm{id}) = c^{(f_1 \overset{C}{\circ} \_)}$ 且对任意 $f : c \xrightarrow{C} c'$ 有
  $(f_1 \xrightarrow{C} \_) : f \longmapsto (f_1 \xrightarrow{C} f) = (f_1 \overset{C}{\circ} \_) \overset{C \xrightarrow{} Set}{\circ} (\_ \overset{C}{\circ} f) = (\_ \overset{C}{\circ} f) \overset{C \xrightarrow{} Set}{\circ} (f_1 \overset{C}{\circ} \_)$
  图 1 有助于理解。

  > **Note**
  >
  > 不难看出
  >
  > - 尤 : $C^{op} \xrightarrow{Cat} (C \xrightarrow{Set} Set)$
  > $c_1 \longmapsto (c_1 \xrightarrow{C} \_)$ 构成一个函子
  > $f_1 \longmapsto (f_1 \xrightarrow{C} \_) = (f_1 \overset{C}{\circ} \_)$ 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**。

07 递归类型

LaTeX Definitions are here.

08-09 函子和自然变换

$\LaTeX$ Definitions are here.

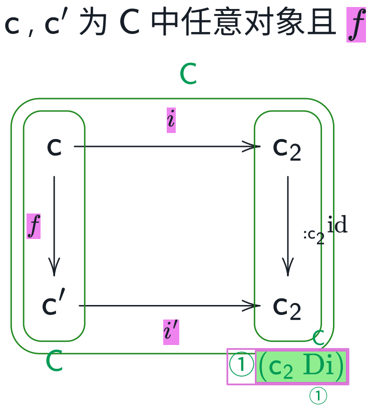
一些特殊的范畴

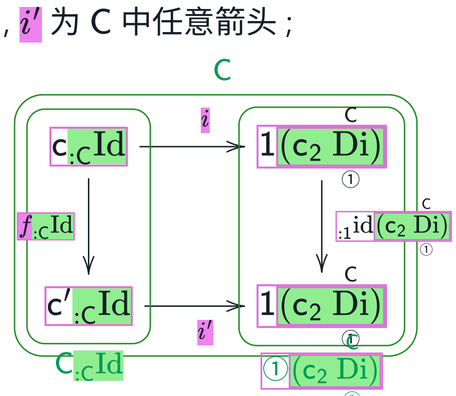
现在规定几种特殊的范畴。

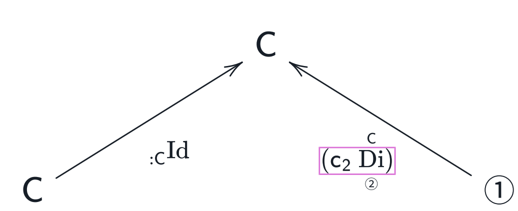
- **离散范畴**：只有对象不含箭头（恒等箭头除外）的范畴。
- Set：**所有集合构成的范畴**，为局部小范畴，满足
  - Set 中对象为任意集合；
  - Set 中箭头为集合间映射。
- Cat：**所有范畴构成的范畴**，满足
  - Cat 中任何对象都构成一个范畴；
  - Cat 中任何箭头都构成一个函子。

若 C，D 为 Cat 中对象，则：

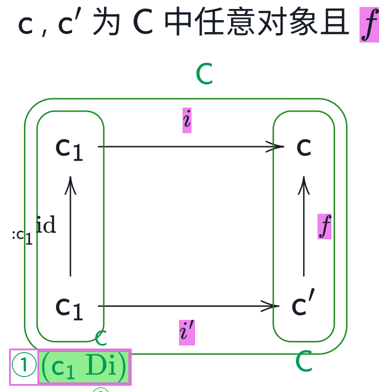
- $\boxed{C^{\mathrm{op}}}$：**反范畴**，满足
  - $\boxed{C^{\mathrm{op}}}$ 中对象皆形如 c，
    c 为任意 C 中的对象；
  - $\boxed{C^{\mathrm{op}}}$ 中箭头皆形如 $\boxed{i^{\mathrm{op}}} : \boxed{c_2 \xrightarrow{C^{\mathrm{op}}} c_1}$，
    $i : \boxed{c_1 \xrightarrow{C} c_2}$ 可为任意 C 中的箭头。
- $\boxed{C \overset{\mathrm{Cat}}{\times} D}$：**积范畴**，满足
  - $\boxed{C \overset{\mathrm{Cat}}{\times} D}$ 中对象皆形如 $\boxed{c \,.\, d}$，
    c，d 分别为任意 C，D 中的对象；
  - $\boxed{C \overset{\mathrm{Cat}}{\times} D}$ 中箭头皆形如 $\boxed{i \,.\, j}$，
    i，j 分别为任意 C，D 中的箭头。
- $\boxed{C \xrightarrow{\mathrm{Cat}} D}$：**所有 C 到 D 的函子的范畴**，满足
  - $\boxed{C \xrightarrow{\mathrm{Cat}} D}$ 中任何对象
    都是 C 到 D 的函子；
  - $\boxed{C \xrightarrow{\mathrm{Cat}} D}$ 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_2 中对象皆形如 $\boxed{\cancel{c \,.\, 1} \,.\, i}$，其中 c 和
    $i : \boxed{c \xrightarrow{C} c_2}$ 分别为 C 中任意的对象和箭头；
  - c_2/C 中箭头皆形如 $f\ \cancel{._{:c_2}\mathrm{id}}$ 且满足下述交换图，其中
    c，c′ 为 C 中任意对象且 f，i，i' 为 C 中任意箭头；

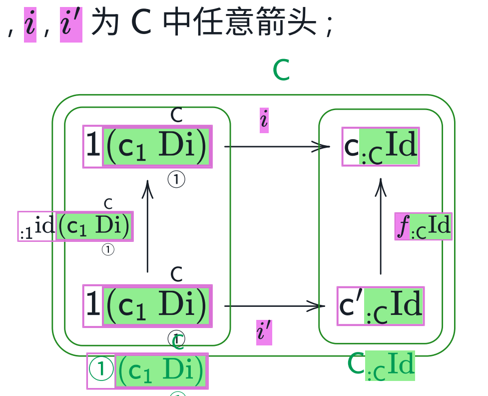


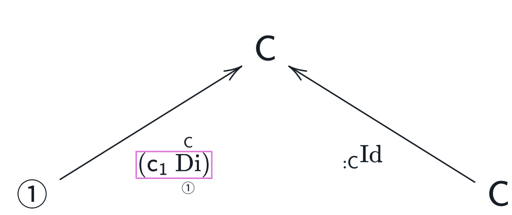




- c_1/C：**仰范畴**，这里 c 为任意 C 中对象；满足
  - c_1/C 中对象皆形如 $\boxed{\cancel{1 \,.\, c} \,.\, i}$，其中 c 和
    $i : \boxed{c_1 \xrightarrow{C} c}$ 分别为 C 中任意的对象和箭头；
  - C/c_1 中箭头皆形如 $\cancel{{}_{:c_1}\mathrm{id}\,.}\ f$ 且满足下述交换图，其中
    c，c′ 为 C 中任意对象且 f，i，i' 为 C 中任意箭头；







函子

接下来我们来提供函子的正式定义：

- $F : C \xrightarrow{\text{Cat}} D$ 为**函子**当且仅当
  - 对任意 C 中对象 c，cF 为 D 中对象且 ${}_{:c}\mathrm{id}F = {}_{:cF}\mathrm{id}$；
  - 对任意 C 中箭头 $i_1 : c_1 \xrightarrow{C} c_2$ 和 $i_2 : c_2 \xrightarrow{C} c_3$，始终都有等式 $(i_1 \overset{C}{\circ} i_2)F = i_1F \overset{D}{\circ} i_2F$ 成立。

若已确信 $F : C \xrightarrow{\text{Cat}} D$ 为函子且
还知 C 中有对象 c_1, c_2
以及 C 中有箭头 $i : c_1 \xrightarrow{C} c_2$ 则

- 若 i 为单态 / 满态 / 同构
  则 iF 为单态 / 满态 / 同构；
- 若 iF 为同构
  则 i 为同构。

> ⓘ **Note**
>
> 不难发现函子具有保持
> 对象 / 态射性质的能力。

函子的复合运算

若还知道 $G : D \xrightarrow{\text{Cat}} E$ 为函子则

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

恒等函子

对于函子我们也有恒等映射，即：

- $${}_{:C}\mathrm{Id} \overset{\text{Cat}}{\circ} F = F = F \overset{\text{Cat}}{\circ} {}_{:D}\mathrm{Id}$$

忠实，完全和本质满函子

若 C，D，E 皆为**局部小范畴**，则

- F 是**忠实的**当且仅当对任意 C 中的对象 c_1, c_2，$c_1 \xrightarrow{C} c_2$ 与 $c_1F \xrightarrow{D} c_2F$ 之间始终都存在单射；
- F 是**完全的**当且仅当对任意 C 中的对象 c_1, c_2，$c_1 \xrightarrow{C} c_2$ 与 $c_1F \xrightarrow{D} c_2F$ 之间始终都存在满射；
- F 是**完全忠实的**当且仅当任意 C 中对象 c_1, c_2，$c_1 \xrightarrow{C} c_2$ 与 $c_1F \xrightarrow{D} c_2F$ 之间始终都存在双射。

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

- F 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 $cF \xrightarrow{D} d$ 之间有双射。

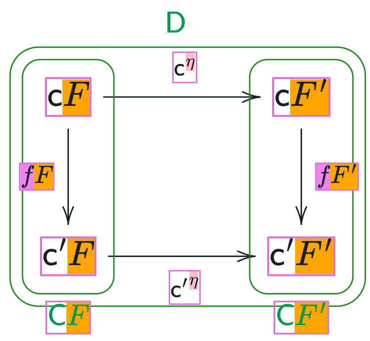
根据刚才的信息我们不难得知

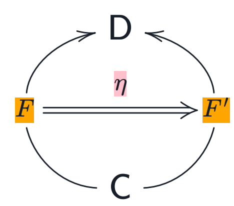
- 若 F, G 为忠实 / 完全 / 完全忠实 / 本质满函子
  则 $F \overset{\text{Cat}}{\circ} G$ 为忠实 / 完全 / 完全忠实 / 本质满 函子；
- 若 $F \overset{\text{Cat}}{\circ} G$ 为完全忠实函子
  且知道 G 为完全忠实函子
  则可知 F 为完全忠实函子；

自然变换

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

- η : $F \xrightarrow{\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{D}} F'$ 为自然变换当且仅当对任意 C 中对象 c，c′ 始终都会有下述交换图成立：

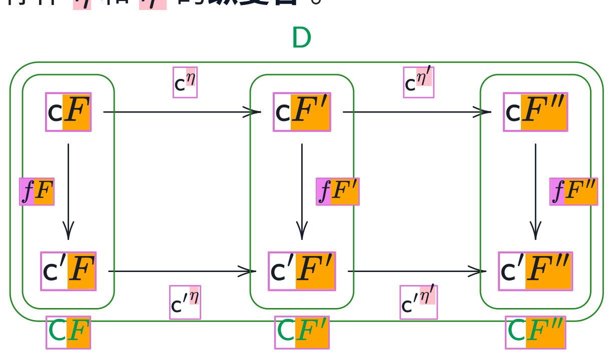


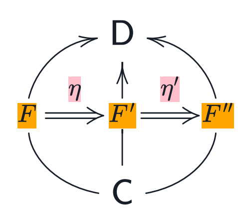


自然变换的复合

若已知 η : $F \xrightarrow{\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{D}} F'$ 构成自然变换且
还知道 η' : $F' \xrightarrow{\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{D}} F''$ 为自然变换则

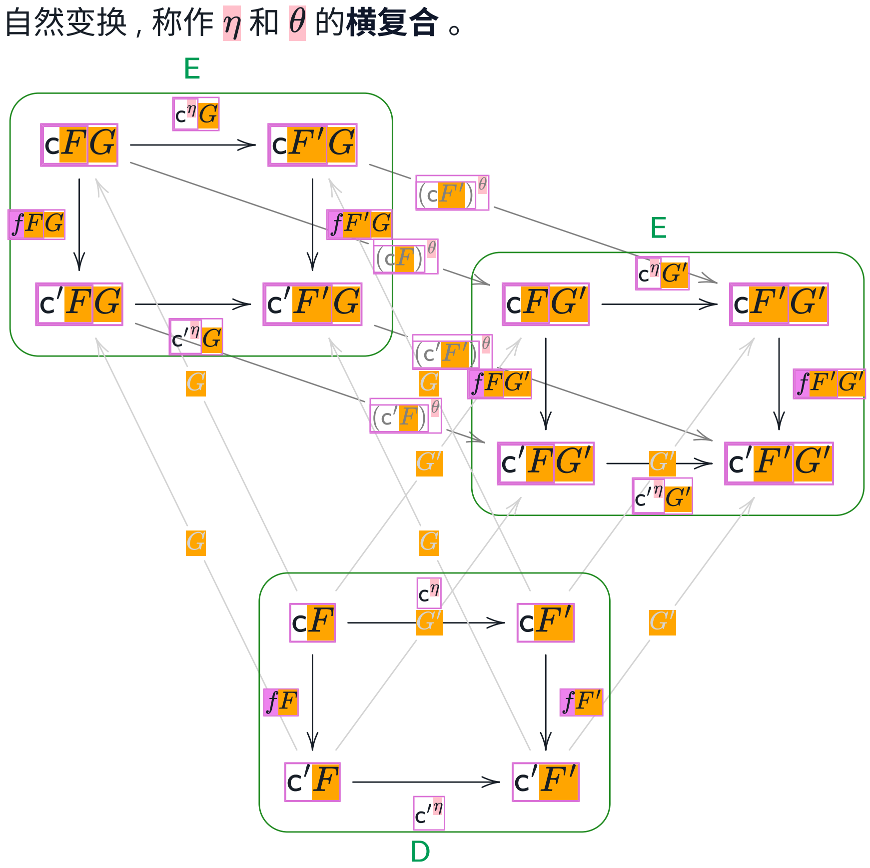
- $\eta \overset{\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{D}}{\circ} \eta'$: $F \xrightarrow{\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{D}} F''$ 为自然变换，称作 η 和 η' 的**纵复合**。

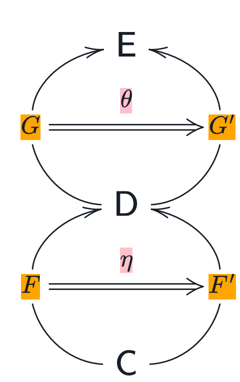




如果还知道 G' : $\mathsf{D} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{E}$ 也是个函子
及自然变换 θ : $G \xrightarrow{\mathsf{D} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{E}} G'$ 那么便有

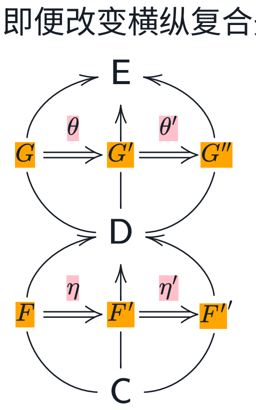
- $\eta \circ \theta$: $F \overset{\mathsf{Cat}}{\circ} G \xrightarrow{\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{E}} F' \overset{\mathsf{Cat}}{\circ} G'$ 为自然变换，称作 η 和 θ 的**横复合**。





若 θ' : $G \xrightarrow{\mathsf{D} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{E}} G'$ 为自然变换则

- $(\eta \circ \theta) \overset{\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{E}}{\circ} (\eta' \circ \theta') = (\eta \overset{\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{D}}{\circ} \eta') \circ (\theta \overset{\mathsf{D} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{E}}{\circ} \theta')$，
即便改变横纵复合先后顺序也不影响最终结果。



恒等自然变换

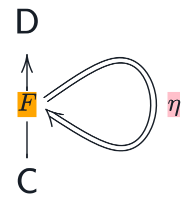
同样对于自然变换也有恒等映射。

- ${}_{:F}\iota : F \xrightarrow{\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{D}} F$ 为恒等自然变换当且仅当
  对范畴 C 中任意对象 c 都有下述交换图成立:

D

$$\begin{tikzcd}
\mathsf{c}F \arrow[r, "\mathsf{c}^{\eta} =_{:(\mathsf{c}F)} \mathrm{id}"] \arrow[d, "fF"'] & \mathsf{c}F \arrow[d, "fF"] \\
\mathsf{c}'F \arrow[r, "\mathsf{c}'^{\eta} =_{:(\mathsf{c}'F)} \mathrm{id}"'] & \mathsf{c}'F
\end{tikzcd}$$

$\mathsf{C}F$ $\mathsf{C}F$



自然同构

自然同构与你想象中的同构不太像。

- $\eta : F \xrightarrow{\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{D}} F'$ 为**自然同构**当且仅当
  c^{η} 总是同构，这里 c 为任意 C 中对象。

  此时 F, F' 的关系可用 $F \underset{\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{D}}{\cong} F'$ 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 $F : \mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{D}$ 及 $F' : \mathsf{D} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{C}$
  使 $F \overset{\mathsf{Cat}}{\circ} F' \underset{\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{C}}{\cong} {}_{:\mathsf{C}}\mathrm{id}$ 并且有 $F' \overset{\mathsf{Cat}}{\circ} F \underset{\mathsf{D} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{D}}{\cong} {}_{:\mathsf{D}}\mathrm{id}$。

米田引理

假如知道 $F : \mathrm{C} \xrightarrow{\mathrm{C}} \mathrm{Set}$ 则

反变米田引理的陈述如下：

- $\underbrace{((\_ \xrightarrow{\mathrm{C}} c_2) \xrightarrow{\mathrm{C} \xrightarrow{\mathrm{Cat}} \mathrm{Set}} F)}_{一堆自然变换} \overset{\mathrm{Set}}{\cong} \underbrace{(c_2 F)}_{一堆元素}$

反变米田引理的证明如下：

1. $\Leftarrow$：考虑任意 $(c_2 F)$ 中的 etc：根据 etc 及其所对应的上方右侧的交换图
我们可为每个对象 c' 定义其所对应的 c'^{η_2}，于是便可构建一个完整的 η_2。
易知 η_2 是一个自然变换。

$$\mathrm{Set}$$
$$\begin{tikzcd}
c \xrightarrow{\mathrm{C}} c_2 \arrow[r, "c^{\eta_2}"] \arrow[d, "f \xrightarrow{\mathrm{C}} c_2"'] & cF \arrow[d, "fF"] \\
c' \xrightarrow{\mathrm{C}} c_2 \arrow[r, "c'^{\eta_2}"'] & c'F \\
\mathrm{C} \xrightarrow{\mathrm{C}} c_2 & \mathrm{C}F
\end{tikzcd}$$

2. $\Rightarrow$：考虑任意等式左侧的 η_1：若上述交换图成立
则可对任意 η_1 指派 $\mathrm{etc} = {:_{c_1}}\mathrm{id}(c^{\eta_1})$ 为 $c_2 F$ 中与之对应的元素；

$$\begin{tikzcd}
c_2 \xrightarrow{\mathrm{C}} c_2 \arrow[r, "c^{\eta_2}"] \arrow[d, "f \xrightarrow{\mathrm{C}} c_2"'] & c_2 F \arrow[d, "fF"] & {:_{c_2}}\mathrm{id} \arrow[r, "c^{\eta_2}"] \arrow[d, "f \xrightarrow{\mathrm{C}} c_2"'] & {:_{c_2}}\mathrm{id}(c^{\eta_2}) \arrow[d, "fF"] \\
c' \xrightarrow{\mathrm{C}} c_2 \arrow[r, "c'^{\eta_2}"'] & c'F & f \arrow[r, "c'^{\eta_2}"'] & \mathrm{etc}(fF)
\end{tikzcd}$$

为何构成同构呢？因为 1 和 2 的自然变换表达式本质上是一样的！
c_2 唯一地确定了 η_2，反之 η_2 也唯一确定了 c_2。

协变米田引理的陈述如下：

- $\underbrace{((c_1 \xrightarrow{\mathrm{C}} \_) \xrightarrow{\mathrm{C} \xrightarrow{\mathrm{Cat}} \mathrm{Set}} F)}_{一堆自然变换} \overset{\mathrm{Set}}{\cong} \underbrace{(c_1 F)}_{一堆元素}$

协变米田引理的证明如下：

1. $\Leftarrow$：考虑任意 $(c_1 F)$ 中的 etc：根据 etc 及其所对应的上方右侧的交换图
我们可为每个对象 c' 定义其所对应的 c'^{η_1}，于是便可构建一个完整的 η_1。
易知 η_1 是一个自然变换。

$$\mathrm{Set}$$
$$\begin{tikzcd}
c_1 \xrightarrow{\mathrm{C}} c \arrow[r, "c^{\eta_1}"] \arrow[d, "c_1 \xrightarrow{\mathrm{C}} f"'] & cF \arrow[d, "fF"] \\
c_1 \xrightarrow{\mathrm{C}} c' \arrow[r, "c'^{\eta_1}"'] & c'F \\
c_1 \xrightarrow{\mathrm{C}} \mathrm{C} & \mathrm{C}F
\end{tikzcd}$$

2. $\Rightarrow$：考虑任意等式左侧的 η_1：若上述交换图成立
则可对任意 η_1 指派 $\mathrm{etc} = {:_{c_1}}\mathrm{id}(c^{\eta_1})$ 为 $c_1 F$ 中与之对应的元素；

$$\begin{tikzcd}
c_1 \xrightarrow{\mathrm{C}} c_1 \arrow[r, "c^{\eta_1}"] \arrow[d, "c_1 \xrightarrow{\mathrm{C}} f"'] & c_1 F \arrow[d, "fF"] & {:_{c_1}}\mathrm{id} \arrow[r, "c^{\eta_1}"] \arrow[d, "c_1 \xrightarrow{\mathrm{C}} f"'] & {:_{c_1}}\mathrm{id}(c^{\eta_1}) \arrow[d, "fF"] \\
c_1 \xrightarrow{\mathrm{C}} c' \arrow[r, "c'^{\eta_1}"'] & c'F & f \arrow[r, "c'^{\eta_1}"'] & \mathrm{etc}(fF)
\end{tikzcd}$$

为何构成同构呢？因为 1 和 2 的自然变换表达式本质上是一样的！
c_1 唯一地确定了 η_1，反之 η_1 也唯一确定了 c_1。

米田嵌入

根据前面的内容我们可知

- $\text{よ} : \mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} (\mathsf{C}^{\mathrm{op}} \xrightarrow{\mathsf{Set}} \mathsf{Set})$
  $\mathsf{c}_2 \longmapsto (\mathsf{c}_2 \xrightarrow{\mathsf{C}^{\mathrm{op}}} \_) = (\_ \xrightarrow{\mathsf{C}} \mathsf{c}_2)$ 　　构成一个函子，称作预层
  $f_2 \longmapsto (f_2 \xrightarrow{\mathsf{C}^{\mathrm{op}}} \_) = (\_ \xrightarrow{\mathsf{C}} f_2) = (\_ \overset{\mathsf{C}}{\circ} f_2)$ 　　构成一个函子间映射，即自然变换
  构成一个完全忠实函子，该函子称作是**米田嵌入**。

证明如下：

- よ 是函子，因为
  - $_{:\mathsf{c}_2}\mathrm{id}\text{よ} = (\_ \overset{\mathsf{C}}{\circ} {}_{:\mathsf{c}_2}\mathrm{id}) = {}_{:(\mathsf{c}_2\text{よ})}\mathrm{id}$
  - $(f_2 \overset{\mathsf{C}}{\circ} f_2')\text{よ} = (\_ \overset{\mathsf{C}}{\circ} (f_2 \overset{\mathsf{C}}{\circ} f_2')) = (\_ \overset{\mathsf{C}}{\circ} f_2) \overset{\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{Set}}{\circ} (\_ \overset{\mathsf{C}}{\circ} f_2')$,

  由于函子具有保持对象 / 映射性质的能力，
  故便可知 $f_2\text{よ}$ 为同构当且仅当 f_2 为同构。
- よ 是完全忠实的，因为
  将协变米田引理中的 c_1 / C / F
  分别换成 c_2 / C^{op} / $(\mathsf{c}_2' \xrightarrow{\mathsf{C}^{\mathrm{op}}} \_)$
  即可获得下述公式：

$$\underbrace{((\mathsf{c}_2 \xrightarrow{\mathsf{C}^{\mathrm{op}}} \_) \xrightarrow{\mathsf{C}^{\mathrm{op}} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{Set}} (\mathsf{c}_2' \xrightarrow{\mathsf{C}^{\mathrm{op}}} \_))}_{\text{预层范畴的 hom-set}} \overset{\mathsf{Set}}{\cong} \underbrace{(\mathsf{c}_2' \xrightarrow{\mathsf{C}^{\mathrm{op}}} \mathsf{c}_2)}_{\mathsf{C}\text{ 的 hom-set}}$$

  也就是

$$\underbrace{((\mathsf{c}_2\text{よ}) \xrightarrow{\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{Set}} (\mathsf{c}_2'\text{よ}))}_{\text{一堆自然变换}} \overset{\mathsf{Set}}{\cong} \underbrace{(\mathsf{c}_2' \xrightarrow{\mathsf{C}^{\mathrm{op}}} \mathsf{c}_2)}_{\mathsf{C}\text{ 的 hom-set}} = \underbrace{(\mathsf{c}_2(\mathsf{c}_2'\text{よ}))}_{\text{一堆元素}}$$

> ⓘ **Note**
>
> 由于函子能够保持态射的性质，
> 对任意左侧集合中的自然同构
> 右侧集合也会有同构与之对应，反之亦然。
> 这也就证明了前面自然同构相关定理省略的部分。

根据前面的内容我们可知

- $\text{尤} : \mathsf{C}^{\mathrm{op}} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} (\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Set}} \mathsf{Set})$
  $\mathsf{c}_1 \longmapsto (\mathsf{c}_1 \xrightarrow{\mathsf{C}} \_)$ 　　构成一个函子
  $f_1 \longmapsto (f_1 \xrightarrow{\mathsf{C}} \_) = (f_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} \_)$ 　　构成一个函子间映射，即自然变换
  构成一个完全忠实函子，该函子称作是**尤达嵌入**。

证明如下：

- 尤 是函子，因为
  - $_{:\mathsf{c}_1}\mathrm{id}\text{尤} = (\_ \overset{\mathsf{C}}{\circ} {}_{:\mathsf{c}_1}\mathrm{id}) = {}_{:(\mathsf{c}_1\text{尤})}\mathrm{id}$
  - $(f_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} f_1')\text{尤} = (\_ \overset{\mathsf{C}}{\circ} (f_1 \overset{\mathsf{C}}{\circ} f_1')) = (\_ \overset{\mathsf{C}}{\circ} f_1) \overset{\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{Set}}{\circ} (\_ \overset{\mathsf{C}}{\circ} f_1')$,
- 尤 是完全且忠实的，因为
  将协变米田引理中的 F
  换成 $(\mathsf{c}_1' \xrightarrow{\mathsf{C}} \_)$
  即可获得下述公式：

$$\underbrace{((\mathsf{c}_1 \xrightarrow{\mathsf{C}} \_) \xrightarrow{\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{Set}} (\mathsf{c}_1' \xrightarrow{\mathsf{C}} \_))}_{\text{一堆自然变换}} \overset{\mathsf{Set}}{\cong} \underbrace{(\mathsf{c}_1' \xrightarrow{\mathsf{C}} \mathsf{c}_1)}_{\text{一堆元素}}$$

  也就是

$$\underbrace{((\mathsf{c}_1\text{尤}) \xrightarrow{\mathsf{C} \xrightarrow{\mathsf{Cat}} \mathsf{Set}} (\mathsf{c}_1'\text{尤}))}_{\text{一堆自然变换}} \overset{\mathsf{Set}}{\cong} \underbrace{(\mathsf{c}_1' \xrightarrow{\mathsf{C}} \mathsf{c}_1)}_{\text{一堆元素}} = \underbrace{(\mathsf{c}_1(\mathsf{c}_1'\text{尤}))}_{\text{一堆元素}}$$

> ⓘ **Note**
>
> 由于函子能够保持态射的性质，
> 对任意左侧集合中的自然同构
> 右侧集合也会有同构与之对应，反之亦然。
> 这也就证明了前面自然同构相关定理省略的部分。