metavariable, x, y

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| term, t, u | ::= | | | term |
| | \| | v | | value |
| | \| | x | | variable |
| | \| | t u | | application |
| | \| | t ⨟ u | | effect sequencing |
| | \| | case t of $\{\star \mapsto u\}$ | | pattern-matching on unit |
| | \| | case t of $\{$ Ur x $\mapsto u\}$ | | pattern-matching on exponentiated value |
| | \| | case t of $\{$ Inl $x_1 \mapsto u_1$, Inr $x_2 \mapsto u_2\}$ | | pattern-matching on sum |
| | \| | case t of $\{\langle x_1, x_2\rangle \mapsto u\}$ | | pattern-matching on product |
| | \| | case t of $\{$ @R x $\mapsto u\}$ | | unroll for recursive types |
| | \| | alloc x . t <br> D | | allocate data |
| | \| | t $\triangleleft^{p}$ $\star$ | | fill destination with unit |
| | \| | t $\triangleleft^{p}$ $\lambda$x : A . u | | fill destination with function |
| | \| | t $\triangleleft^{p}$ u | | |
| | \| | t $\triangleleft^{p}$ Ur y . u | | fill destination with exponential |
| | \| | t $\triangleleft^{p}$ Inl y . u | | fill sum-type destination with variant 1 |
| | \| | t $\triangleleft^{p}$ Inr y . u | | fill sum-type destination with variant 2 |
| | \| | t $\triangleleft^{p}$ $\langle y_1, y_2\rangle$ . u | | fill product-type destination |
| | \| | t $\triangleleft^{p}$ @R y . u | | fill destination with recursive type |
| | \| | (t) | S | |
| | \| | t[subs] | M | |
| *hole*, *h* | ::= | | | |
| val, v | ::= | | | unreducible value |
| | \| | $\bullet$ | | no-effect effect |
| | \| | d | | data structure |
| data, d | ::= | | | |
| | \| | $\lfloor h \rfloor$ | | |
| | \| | $\star$ | | |
| | \| | $\lambda$x : A . t | | |
| | \| | Ur d | | |
| | \| | Inl d | | |
| | \| | Inr d | | |
| | \| | $\langle d_1, d_2\rangle$ | | |
| | \| | @R d | | |
| | \| | (d) | S | |
| *multiplicity*, *p* | ::= | | | multiplicity |
| | \| | *1* | | |
| | \| | $\omega$ | | |
| sub | ::= | | | substitution |
| | \| | x := t | | |
| | \| | $h := d_h$ | | |
| subs | ::= | | | substitutions |
| | \| | sub | | |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | \| | sub, subs | | |
| data_with_hole, $d_h$ | ::= | | | |
| | \| | d | | |
| | \| | $h$ | | |
| | \| | Ur $d_h$ | | |
| | \| | Inl $d_h$ | | |
| | \| | Inr $d_h$ | | |
| | \| | $\langle d_{h1}, d_{h2} \rangle$ | | |
| | \| | @R $d_h$ | | |
| | \| | $(d_h)$ | S | |
| store_affect, sa | ::= | | | store cell |
| | \| | $x : D = d_h$ | | |
| store_affects | ::= | | | store cells |
| | \| | sa | | |
| | \| | sa, store_affects | | |
| store, $\mathbb{S}$ | ::= | | | store contents |
| | \| | $\emptyset$ | | |
| | \| | {store_affects} | | |
| | \| | $\mathbb{S}_1 \sqcup \mathbb{S}_2$ | | |
| | \| | $\mathbb{S}$[subs] | M | |
| type, A | ::= | | | |
| | \| | $\perp$ | | bottom type |
| | \| | D | | data type |
| data_type, D | ::= | | | |
| | \| | 1 | | unit type |
| | \| | R | | recursive type bound to a name |
| | \| | $D_1 \otimes D_2$ | | product type |
| | \| | $D_1 \oplus D_2$ | | sum type |
| | \| | $A_1 \multimap A_2$ | | linear function type |
| | \| | $\lfloor D_1 \rfloor^p$ | | destination type |
| | \| | !D | | exponential |
| | \| | (D) | S | |
| | \| | $D_V[X := D]$ | M | |
| type_with_var, $A_V$ | ::= | | | |
| | \| | $\perp$ | | |
| | \| | $D_V$ | | |
| data_type_with_var, $D_V$ | ::= | | | |
| | \| | X | | type variable in recursive definition |
| | \| | 1 | | unit type |
| | \| | R | | recursive type bound to a name |
| | \| | $D_{V1} \otimes D_{V2}$ | | product type |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | $\vert$ | $\mathsf{D}_{\mathsf{V}1} \oplus \mathsf{D}_{\mathsf{V}2}$ | sum type |
| | $\vert$ | $\mathsf{A}_{\mathsf{V}1} \multimap \mathsf{A}_{\mathsf{V}2}$ | linear function type |
| | $\vert$ | $\lfloor \mathsf{D}_{\mathsf{V}} \rfloor^{p}$ | destination type |
| | $\vert$ | $!\mathsf{D}_{\mathsf{V}}$ | exponential |
| | $\vert$ | $(\mathsf{D}_{\mathsf{V}})$ | S |
| rec_type_bound, R | ::= | | recursive type bound to a name |
| rec_type_def | ::= | | |
| | $\vert$ | $\mu \mathsf{X} \,.\, \mathsf{D}_{\mathsf{V}}$ | |
| type_affect, ta | ::= | | type affectation |
| | $\vert$ | $\mathsf{x} : \mathsf{A}$ | variable |
| | $\vert$ | $h\ ^{p}\!: \ \mathsf{D}$ | hole |
| type_affects | ::= | | type affectations |
| | $\vert$ | ta | |
| | $\vert$ | ta, type_affects | |
| typing_context, $\Gamma$, $\mho$, $\Gamma_h$, P, N | ::= | | typing context |
| | $\vert$ | $\emptyset$ | |
| | $\vert$ | {type_affects} | |
| | $\vert$ | $\Gamma_1 \sqcup \Gamma_2$ | |
| command | ::= | | |
| | $\vert$ | $\mathbb{S} \mid \mathsf{t}$ | |
| terminals | ::= | | |
| | $\vert$ | $()$ | |
| | $\vert$ | $\mapsto$ | |
| | $\vert$ | $\oplus$ | |
| | $\vert$ | $\multimap$ | |
| | $\vert$ | $:=$ | |
| | $\vert$ | $\vdash$ | |
| | $\vert$ | $\dashv$ | |
| | $\vert$ | $\dashv\vdash$ | |
| | $\vert$ | $\sqcup$ | |
| | $\vert$ | $\emptyset$ | |
| | $\vert$ | $\neq$ | |
| | $\vert$ | $\in$ | |
| | $\vert$ | $\notin$ | |
| | $\vert$ | \n | |
| | $\vert$ | $\langle$ | |
| | $\vert$ | $\rangle$ | |
| | $\vert$ | Inl | |
| | $\vert$ | Inr | |
| | $\vert$ | Ur | |
| | $\vert$ | Dest | |
| | $\vert$ | $\triangleleft$ | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | $\vert$ | $\vert$ | |
| | $\vert$ | $\overset{c}{\rightharpoondown}$ | |
| | $\vert$ | $\Downarrow$ | |
| | $\vert$ | $\overset{\mathsf{fix}}{\equiv}$ | |
| | $\vert$ | $\perp$ | |
| | $\vert$ | $\bullet$ | |
| | $\vert$ | $\subset$ | |
| | $\vert$ | $\mathcal{N}$ | |
| | $\vert$ | $\Longrightarrow$ | |
| | $\vert$ | @ | |
| | $\vert$ | $\wedge$ | |
| formula | ::= | | |
| | $\vert$ | judgement | |
| Ctx | ::= | | |
| | $\vert$ | $\mathsf{x} \in \mathcal{N}(\Gamma)$ | |
| | $\vert$ | $\mathsf{x} \notin \mathcal{N}(\Gamma)$ | |
| | $\vert$ | type_affect $\in \Gamma$ | |
| | $\vert$ | $\mathcal{N}(\Gamma_1) \cap \mathcal{N}(\Gamma_2) = \emptyset$ | $\Gamma_1$ and $\Gamma_2$ are disjoint typing contexts with nc |
| | $\vert$ | $p_1 = p_2 \implies \Gamma_1 = \Gamma_2$ | |
| | $\vert$ | $p_1 = p_2 \implies (\Gamma_1 = \Gamma_2 \wedge \Gamma_3 = \Gamma_4)$ | |
| Store | ::= | | |
| | $\vert$ | fresh $h$ | |
| | $\vert$ | store_affect $\in \mathbb{S}$ | |
| | $\vert$ | $\mathsf{x} \notin \mathcal{N}(\mathbb{S})$ | |
| Eq | ::= | | |
| | $\vert$ | $\mathsf{A}_1 = \mathsf{A}_2$ | |
| | $\vert$ | $\mathsf{A}_1 \neq \mathsf{A}_2$ | |
| | $\vert$ | $\mathsf{t} = \mathsf{u}$ | |
| | $\vert$ | $\Gamma = \mathsf{D}$ | |
| Ty | ::= | | |
| | $\vert$ | $\mathsf{R} \overset{\mathsf{fix}}{\equiv}$ rec_type_def | |
| | $\vert$ | $\mho ; \Gamma \vdash$ command : $\mathsf{A}$ | |
| | $\vert$ | $\mathrm{P} ; \mathrm{N} \dashv\vdash \mathsf{d_h} \overset{p}{:} \mathsf{D}$ | P stands for "provides", N for "needs" |
| | $\vert$ | $\Gamma_h \dashv \mathbb{S}$ | |
| | $\vert$ | $\mho ; \Gamma_h \sqcup \Gamma \vdash \mathsf{t} : \mathsf{A}$ | |
| Sem | ::= | | |
| | $\vert$ | command $\Downarrow$ command$'$ | |
| judgement | ::= | | |
| | $\vert$ | Ctx | |
| | $\vert$ | Store | |
| | $\vert$ | Eq | |
| | $\vert$ | Ty | |

| Sem

user_syntax ::=
| metavariable
| term
| *hole*
| val
| data
| *multiplicity*
| sub
| subs
| data_with_hole
| store_affect
| store_affects
| store
| type
| data_type
| type_with_var
| data_type_with_var
| rec_type_bound
| rec_type_def
| type_affect
| type_affects
| typing_context
| command
| terminals

$\boxed{x \in \mathcal{N}(\Gamma)}$

$\boxed{x \notin \mathcal{N}(\Gamma)}$

$\boxed{\text{type\_affect} \in \Gamma}$

$\boxed{\mathcal{N}(\Gamma_1) \cap \mathcal{N}(\Gamma_2) = \emptyset}$ $\Gamma_1$ and $\Gamma_2$ are disjoint typing contexts with no clashing variable names or labels

$\boxed{p_1 = p_2 \implies \Gamma_1 = \Gamma_2}$

$\boxed{p_1 = p_2 \implies (\Gamma_1 = \Gamma_2 \wedge \Gamma_3 = \Gamma_4)}$

$\boxed{\text{fresh } h}$

$\boxed{\text{store\_affect} \in \mathbb{S}}$

$\boxed{x \notin \mathcal{N}(\mathbb{S})}$

$\boxed{A_1 = A_2}$

$\boxed{A_1 \neq A_2}$

$\boxed{t = u}$

$\boxed{\Gamma = D}$

$\boxed{R \overset{\text{fix}}{=} \text{rec\_type\_def}}$

$\boxed{\mho ; \Gamma \vdash \text{command} : A}$

$$\frac{\Gamma_h \dashv \mathbb{S} \qquad \mho ; \Gamma_h \sqcup \Gamma \vdash t : A}{\mho ; \Gamma \vdash \mathbb{S} \,|\, t : A} \quad \text{TyComm\_Def}$$

$\boxed{P ; N \dashVdash d_h \overset{p}{:} D}$ P stands for "provides", N for "needs"

$$\dfrac{}{\{h\ {}^{p}\!\!:\ \mathsf{D}\}\ ;\ \emptyset\ \dashv\vdash\ h\ {}^{p}\!\!:\ \mathsf{D}}\ \textsc{TyDh\_H}$$

$$\dfrac{}{\{h\ {}^{p}\!\!:\ \mathsf{D}\}\ ;\ \{h\ {}^{p}\!\!:\ \mathsf{D}\}\ \dashv\vdash\ \lfloor h\rfloor\ {}^{1}\!\!:\ \lfloor\mathsf{D}\rfloor^{p}}\ \textsc{TyDh\_Dest}$$

$$\dfrac{}{\emptyset\ ;\ \emptyset\ \dashv\vdash\ \star\ {}^{p}\!\!:\ \mathsf{1}}\ \textsc{TyDh\_U}$$

$$\dfrac{\emptyset\ ;\ \Gamma_h \sqcup \{\mathsf{x} : \mathsf{A}_1\} \vdash \mathsf{t} : \mathsf{A}_2 \qquad p = \omega \implies \Gamma_h = \emptyset}{\emptyset\ ;\ \Gamma_h\ \dashv\vdash\ \lambda\mathsf{x} : \mathsf{D}\,.\,\mathsf{t}\ {}^{p}\!\!:\ \mathsf{A}_1 \multimap \mathsf{A}_2}\ \textsc{TyDh\_Fn}$$

$$\dfrac{\mathrm{P}\ ;\ \mathrm{N}\ \dashv\vdash\ \mathsf{d_h}\ {}^{\omega}\!\!:\ \mathsf{D}}{\mathrm{P}\ ;\ \mathrm{N}\ \dashv\vdash\ \mathsf{Ur}\ \mathsf{d_h}\ {}^{p}\!\!:\ !\mathsf{D}}\ \textsc{TyDh\_E}$$

$$\dfrac{\mathrm{P}\ ;\ \mathrm{N}\ \dashv\vdash\ \mathsf{d_h}\ {}^{p}\!\!:\ \mathsf{D}_1}{\mathrm{P}\ ;\ \mathrm{N}\ \dashv\vdash\ \mathsf{Inl}\,\mathsf{d_h}\ {}^{p}\!\!:\ \mathsf{D}_1 \oplus \mathsf{D}_2}\ \textsc{TyDh\_Inl}$$

$$\dfrac{\mathrm{P}\ ;\ \mathrm{N}\ \dashv\vdash\ \mathsf{d_h}\ {}^{p}\!\!:\ \mathsf{D}_2}{\mathrm{P}\ ;\ \mathrm{N}\ \dashv\vdash\ \mathsf{Inr}\,\mathsf{d_h}\ {}^{p}\!\!:\ \mathsf{D}_1 \oplus \mathsf{D}_2}\ \textsc{TyDh\_Inr}$$

$$\dfrac{\mathrm{P}_1\ ;\ \mathrm{N}_1\ \dashv\vdash\ \mathsf{d_{h1}}\ {}^{p}\!\!:\ \mathsf{D}_1 \qquad \mathrm{P}_2\ ;\ \mathrm{N}_2\ \dashv\vdash\ \mathsf{d_{h2}}\ {}^{p}\!\!:\ \mathsf{D}_2}{\mathrm{P}_1 \sqcup \mathrm{P}_2\ ;\ \mathrm{N}_1 \sqcup \mathrm{N}_2\ \dashv\vdash\ \langle \mathsf{d_{h1}}, \mathsf{d_{h2}} \rangle\ {}^{p}\!\!:\ \mathsf{D}_1 \otimes \mathsf{D}_2}\ \textsc{TyDh\_P}$$

$$\dfrac{\mathsf{R} \overset{\mathsf{fix}}{=} \mu\mathsf{X}\,.\,\mathsf{D_V} \qquad \mathrm{P}\ ;\ \mathrm{N}\ \dashv\vdash\ \mathsf{d_h}\ {}^{p}\!\!:\ \mathsf{D_V}[\mathsf{X} := \mathsf{R}]}{\mathrm{P}\ ;\ \mathrm{N}\ \dashv\vdash\ @\mathsf{R}\,\mathsf{d_h}\ {}^{p}\!\!:\ \mathsf{R}}\ \textsc{TyDh\_R}$$

$\boxed{\Gamma_h \dashv \mathbb{S}}$

$$\dfrac{}{\emptyset \dashv \emptyset}\ \textsc{TyStore\_Empty}$$

$$\dfrac{\Gamma_h \sqcup \mathrm{N} \dashv \mathbb{S} \qquad \mathrm{P}\ ;\ \mathrm{N}\ \dashv\vdash\ \mathsf{d_h}\ {}^{1}\!\!:\ \mathsf{D}}{\Gamma_h \sqcup \mathrm{P} \dashv \mathbb{S} \sqcup \{\mathsf{x} : \mathsf{D} = \mathsf{d_h}\}}\ \textsc{TyStore\_Root}$$

$\boxed{\mho\ ;\ \Gamma_h \sqcup \Gamma \vdash \mathsf{t} : \mathsf{A}}$

$$\dfrac{}{\mho\ ;\ \emptyset \sqcup \emptyset \vdash \bullet : \bot}\ \textsc{TyTerm\_NoEff}$$

$$\dfrac{}{\mho\ ;\ \{h\ {}^{p}\!\!:\ \mathsf{D}\} \sqcup \emptyset \vdash \lfloor h\rfloor : \lfloor\mathsf{D}\rfloor^{p}}\ \textsc{TyTerm\_Dest}$$

$$\dfrac{}{\mho\ ;\ \emptyset \sqcup \emptyset \vdash \star : \mathsf{1}}\ \textsc{TyTerm\_U}$$

$$\dfrac{\emptyset\ ;\ \Gamma_h \sqcup \{\mathsf{x} : \mathsf{A}_1\} \vdash \mathsf{t} : \mathsf{A}_2}{\mho\ ;\ \Gamma_h \sqcup \emptyset \vdash \lambda\mathsf{x} : \mathsf{A}_1\,.\,\mathsf{t} : \mathsf{A}_1 \multimap \mathsf{A}_2}\ \textsc{TyTerm\_Fn}$$

$$\dfrac{\emptyset\ ;\ \emptyset \sqcup \emptyset \vdash \mathsf{d} : \mathsf{D}}{\mho\ ;\ \emptyset \sqcup \emptyset \vdash \mathsf{Ur}\ \mathsf{d} : !\mathsf{D}}\ \textsc{TyTerm\_E}$$

$$\dfrac{\emptyset\ ;\ \Gamma_h \sqcup \emptyset \vdash \mathsf{d} : \mathsf{D}_1}{\mho\ ;\ \Gamma_h \sqcup \emptyset \vdash \mathsf{Inl}\,\mathsf{d} : \mathsf{D}_1 \oplus \mathsf{D}_2}\ \textsc{TyTerm\_Inl}$$

$$\dfrac{\emptyset\ ;\ \Gamma_h \sqcup \emptyset \vdash \mathsf{d} : \mathsf{D}_2}{\mho\ ;\ \Gamma_h \sqcup \emptyset \vdash \mathsf{Inr}\,\mathsf{d} : \mathsf{D}_1 \oplus \mathsf{D}_2}\ \textsc{TyTerm\_Inr}$$

$$\frac{\begin{array}{c}\emptyset \,;\, \Gamma_{h1} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \emptyset \vdash \mathsf{d}_1 : \mathsf{D}_1 \\ \emptyset \,;\, \Gamma_{h2} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \emptyset \vdash \mathsf{d}_2 : \mathsf{D}_2\end{array}}{\mho \,;\, \Gamma_{h1} \sqcup \Gamma_{h2} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \emptyset \vdash \langle \mathsf{d}_1, \mathsf{d}_2 \rangle : \mathsf{D}_1 \otimes \mathsf{D}_2} \quad \textsc{TyTerm\_P}$$

$$\frac{\begin{array}{l}\mathsf{R} \overset{\text{fix}}{=} \mu \mathsf{X} \,.\, \mathsf{D}_\mathsf{V} \\ \emptyset \,;\, \Gamma_h \,{\scriptstyle\sqcup}\, \emptyset \vdash \mathsf{d} : \mathsf{D}_\mathsf{V}[\mathsf{X} := \mathsf{R}]\end{array}}{\mho \,;\, \Gamma_h \,{\scriptstyle\sqcup}\, \emptyset \vdash @\mathsf{R}\,\mathsf{d} : \mathsf{R}} \quad \textsc{TyTerm\_R}$$

$$\frac{}{\mho \,;\, \emptyset \,{\scriptstyle\sqcup}\, \{\mathsf{x} : \mathsf{A}\} \vdash \mathsf{x} : \mathsf{A}} \quad \textsc{TyTerm\_Id}$$

$$\frac{}{\mho \sqcup \{\mathsf{x} : \mathsf{A}\} \,;\, \emptyset \,{\scriptstyle\sqcup}\, \emptyset \vdash \mathsf{x} : \mathsf{A}} \quad \textsc{TyTerm\_Id'}$$

$$\frac{\begin{array}{l}\mho \,;\, \Gamma_{h1} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma_1 \vdash \mathsf{t} : \mathsf{A}_1 \multimap \mathsf{A}_2 \\ \mho \,;\, \Gamma_{h2} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma_2 \vdash \mathsf{u} : \mathsf{A}_1\end{array}}{\mho \,;\, \Gamma_{h1} \sqcup \Gamma_{h2} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma_1 \sqcup \Gamma_2 \vdash \mathsf{t}\,\mathsf{u} : \mathsf{A}_2} \quad \textsc{TyTerm\_App}$$

$$\frac{\begin{array}{l}\mho \,;\, \Gamma_{h1} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma_1 \vdash \mathsf{t} : \bot \\ \mho \,;\, \Gamma_{h2} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma_2 \vdash \mathsf{u} : \mathsf{A}_2\end{array}}{\mho \,;\, \Gamma_{h1} \sqcup \Gamma_{h2} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma_1 \sqcup \Gamma_2 \vdash \mathsf{t} \fatsemi \mathsf{u} : \mathsf{A}_2} \quad \textsc{TyTerm\_EffSeq}$$

$$\frac{\begin{array}{l}\mho \,;\, \Gamma_{h1} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma_1 \vdash \mathsf{t} : \mathsf{1} \\ \mho \,;\, \Gamma_{h2} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma_2 \vdash \mathsf{u} : \mathsf{A}\end{array}}{\mho \,;\, \Gamma_{h1} \sqcup \Gamma_{h2} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma_1 \sqcup \Gamma_2 \vdash \mathsf{case}\ \mathsf{t}\ \mathsf{of}\ \{\star \mapsto \mathsf{u}\} : \mathsf{A}} \quad \textsc{TyTerm\_PatU}$$

$$\frac{\begin{array}{l}\mho \,;\, \Gamma_{h1} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma_1 \vdash \mathsf{t} : !\mathsf{D} \\ \mho \sqcup \{\mathsf{x} : \mathsf{D}\} \,;\, \Gamma_{h2} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma_2 \vdash \mathsf{u} : \mathsf{A}\end{array}}{\mho \,;\, \Gamma_{h1} \sqcup \Gamma_{h2} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma_1 \sqcup \Gamma_2 \vdash \mathsf{case}\,\mathsf{t}\,\mathsf{of}\,\{\,\mathsf{Ur}\ \mathsf{x} \mapsto \mathsf{u}\} : \mathsf{A}} \quad \textsc{TyTerm\_PatE}$$

$$\frac{\begin{array}{l}\mho \,;\, \Gamma_{h1} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma_1 \vdash \mathsf{t} : \mathsf{D}_1 \oplus \mathsf{D}_2 \\ \mho \,;\, \Gamma_{h2} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma_2 \sqcup \{\mathsf{x}_1 : \mathsf{D}_1\} \vdash \mathsf{u}_1 : \mathsf{A} \\ \mho \,;\, \Gamma_{h2} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma_2 \sqcup \{\mathsf{x}_2 : \mathsf{D}_2\} \vdash \mathsf{u}_2 : \mathsf{A}\end{array}}{\mho \,;\, \Gamma_{h1} \sqcup \Gamma_{h2} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma_1 \sqcup \Gamma_2 \vdash \mathsf{case}\,\mathsf{t}\,\mathsf{of}\,\{\,\mathsf{Inl}\,\mathsf{x}_1 \mapsto \mathsf{u}_1,\ \mathsf{Inr}\,\mathsf{x}_2 \mapsto \mathsf{u}_2\} : \mathsf{A}} \quad \textsc{TyTerm\_PatS}$$

$$\frac{\begin{array}{l}\mho \,;\, \Gamma_{h1} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma_1 \vdash \mathsf{t} : \mathsf{D}_1 \otimes \mathsf{D}_2 \\ \mho \,;\, \Gamma_{h2} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma_2 \sqcup \{\mathsf{x}_1 : \mathsf{D}_1, \mathsf{x}_2 : \mathsf{D}_2\} \vdash \mathsf{u} : \mathsf{A}\end{array}}{\mho \,;\, \Gamma_{h1} \sqcup \Gamma_{h2} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma_1 \sqcup \Gamma_2 \vdash \mathsf{case}\,\mathsf{t}\,\mathsf{of}\,\{\langle \mathsf{x}_1, \mathsf{x}_2 \rangle \mapsto \mathsf{u}\} : \mathsf{A}} \quad \textsc{TyTerm\_PatP}$$

$$\frac{\begin{array}{l}\mathsf{R} \overset{\text{fix}}{=} \mu \mathsf{X} \,.\, \mathsf{D}_\mathsf{V} \\ \mho \,;\, \Gamma_{h1} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma_1 \vdash \mathsf{t} : \mathsf{R} \\ \mho \,;\, \Gamma_{h2} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma_2 \sqcup \{\mathsf{x} : \mathsf{D}_\mathsf{V}[\mathsf{X} := \mathsf{R}]\} \vdash \mathsf{u} : \mathsf{A}\end{array}}{\mho \,;\, \Gamma_{h1} \sqcup \Gamma_{h2} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma_1 \sqcup \Gamma_2 \vdash \mathsf{case}\,\mathsf{t}\,\mathsf{of}\,\{@\mathsf{R}\,\mathsf{x} \mapsto \mathsf{u}\} : \mathsf{A}} \quad \textsc{TyTerm\_PatR}$$

$$\frac{\mho \,;\, \Gamma_h \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma \sqcup \{\mathsf{x} : \lfloor \mathsf{D} \rfloor^{\mathit{1}}\} \vdash \mathsf{t} : \bot}{\mho \,;\, \Gamma_h \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma \vdash \underset{\mathsf{D}}{\mathsf{alloc}}\ \mathsf{x} \,.\, \mathsf{t} : \mathsf{D}} \quad \textsc{TyTerm\_Alloc}$$

$$\frac{\mho \,;\, \Gamma_h \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma \vdash \mathsf{t} : \lfloor \mathsf{1} \rfloor^{p}}{\mho \,;\, \Gamma_h \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma \vdash \mathsf{t} \lhd^{p} \star : \bot} \quad \textsc{TyTerm\_FillU}$$

$$\frac{\begin{array}{l}\mho \,;\, \Gamma_{h1} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma_1 \vdash \mathsf{t} : \lfloor \mathsf{A}_1 \multimap \mathsf{A}_2 \rfloor^{p} \\ \mho \,;\, \Gamma_{h2} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma_2 \sqcup \{\mathsf{x} : \mathsf{A}_1\} \vdash \mathsf{u} : \mathsf{A}_2 \\ p = \omega \implies (\Gamma_{h2} = \emptyset \wedge \Gamma_2 = \emptyset)\end{array}}{\mho \,;\, \Gamma_{h1} \sqcup \Gamma_{h2} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma_1 \sqcup \Gamma_2 \vdash \mathsf{t} \lhd^{p} \lambda \mathsf{x} : \mathsf{A}_1 \,.\, \mathsf{u} : \bot} \quad \textsc{TyTerm\_FillFn}$$

$$\frac{\begin{array}{l}\mho \,;\, \Gamma_{h1} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma_1 \vdash \mathsf{t} : \lfloor \mathsf{D} \rfloor^{p} \\ \mho \,;\, \Gamma_{h2} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma_2 \vdash \mathsf{u} : \mathsf{D} \\ p = \omega \implies (\Gamma_{h2} = \emptyset \wedge \Gamma_2 = \emptyset)\end{array}}{\mho \,;\, \Gamma_{h1} \sqcup \Gamma_{h2} \,{\scriptstyle\sqcup}\, \Gamma_1 \sqcup \Gamma_2 \vdash \mathsf{t} \lhd^{p} \mathsf{u} : \bot} \quad \textsc{TyTerm\_FillL}$$

$$\dfrac{\begin{array}{c}\mho\ ;\ \Gamma_{h1} \sqcup \Gamma_1 \vdash \mathsf{t} : \lfloor !\mathsf{D} \rfloor^{p} \\ \mho\ ;\ \Gamma_{h2} \sqcup \Gamma_2 \sqcup \{\mathsf{x} : \lfloor \mathsf{D} \rfloor^{\omega}\} \vdash \mathsf{u} : \mathsf{A}\end{array}}{\mho\ ;\ \Gamma_{h1} \sqcup \Gamma_{h2} \sqcup \Gamma_1 \sqcup \Gamma_2 \vdash \mathsf{t} \triangleleft^{p} \mathsf{Ur}\ \mathsf{x} \,.\, \mathsf{u} : \mathsf{A}} \quad \textsc{TyTerm\_FillE}$$

$$\dfrac{\begin{array}{c}\mho\ ;\ \Gamma_{h1} \sqcup \Gamma_1 \vdash \mathsf{t} : \lfloor \mathsf{D}_1 \oplus \mathsf{D}_2 \rfloor^{p} \\ \mho\ ;\ \Gamma_{h2} \sqcup \Gamma_2 \sqcup \{\mathsf{x} : \lfloor \mathsf{D}_1 \rfloor^{p}\} \vdash \mathsf{u} : \mathsf{A}\end{array}}{\mho\ ;\ \Gamma_{h1} \sqcup \Gamma_{h2} \sqcup \Gamma_1 \sqcup \Gamma_2 \vdash \mathsf{t} \triangleleft^{p} \mathsf{Inl}\ \mathsf{x} \,.\, \mathsf{u} : \mathsf{A}} \quad \textsc{TyTerm\_FillInl}$$

$$\dfrac{\begin{array}{c}\mho\ ;\ \Gamma_{h1} \sqcup \Gamma_1 \vdash \mathsf{t} : \lfloor \mathsf{D}_1 \oplus \mathsf{D}_2 \rfloor^{p} \\ \mho\ ;\ \Gamma_{h2} \sqcup \Gamma_2 \sqcup \{\mathsf{x} : \lfloor \mathsf{D}_2 \rfloor^{p}\} \vdash \mathsf{u} : \mathsf{A}\end{array}}{\mho\ ;\ \Gamma_{h1} \sqcup \Gamma_{h2} \sqcup \Gamma_1 \sqcup \Gamma_2 \vdash \mathsf{t} \triangleleft^{p} \mathsf{Inr}\ \mathsf{x} \,.\, \mathsf{u} : \mathsf{A}} \quad \textsc{TyTerm\_FillInr}$$

$$\dfrac{\begin{array}{l}\mho\ ;\ \Gamma_{h1} \sqcup \Gamma_1 \vdash \mathsf{t} : \lfloor \mathsf{D}_1 \otimes \mathsf{D}_2 \rfloor^{p} \\ \mho\ ;\ \Gamma_{h2} \sqcup \Gamma_2 \sqcup \{\mathsf{x}_1 : \lfloor \mathsf{D}_1 \rfloor^{p}, \mathsf{x}_2 : \lfloor \mathsf{D}_2 \rfloor^{p}\} \vdash \mathsf{u} : \mathsf{A}\end{array}}{\mho\ ;\ \Gamma_{h1} \sqcup \Gamma_{h2} \sqcup \Gamma_1 \sqcup \Gamma_2 \vdash \mathsf{t} \triangleleft^{p} \langle \mathsf{x}_1, \mathsf{x}_2 \rangle \,.\, \mathsf{u} : \mathsf{A}} \quad \textsc{TyTerm\_FillP}$$

$$\dfrac{\begin{array}{l}\mathsf{R} \overset{\text{fix}}{=} \mu \mathsf{X} \,.\, \mathsf{D}_{\mathsf{V}} \\ \mho\ ;\ \Gamma_{h1} \sqcup \Gamma_1 \vdash \mathsf{t} : \lfloor \mathsf{R} \rfloor^{p} \\ \mho\ ;\ \Gamma_{h2} \sqcup \Gamma_2 \sqcup \{\mathsf{x} : \lfloor \mathsf{D}_{\mathsf{V}}[\mathsf{X} := \mathsf{R}] \rfloor^{p}\} \vdash \mathsf{u} : \mathsf{A}\end{array}}{\mho\ ;\ \Gamma_{h1} \sqcup \Gamma_{h2} \sqcup \Gamma_1 \sqcup \Gamma_2 \vdash \mathsf{t} \triangleleft^{p} @\mathsf{R}\ \mathsf{x} \,.\, \mathsf{u} : \mathsf{A}} \quad \textsc{TyTerm\_FillR}$$

$\boxed{\mathsf{command} \ \Downarrow\ \mathsf{command}'}$

$$\dfrac{}{\mathbb{S} \mid \mathsf{v} \ \Downarrow\ \mathbb{S} \mid \mathsf{v}} \quad \textsc{SemOp\_Val}$$

$$\dfrac{\begin{array}{c}\mathbb{S}_0 \mid \mathsf{t} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_1 \mid \lambda \mathsf{x} : \mathsf{A} \,.\, \mathsf{t}' \\ \mathbb{S}_1 \mid \mathsf{u} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_2 \mid \mathsf{v}_2 \\ \mathbb{S}_2 \mid \mathsf{t}'[\mathsf{x} := \mathsf{v}_2] \ \Downarrow\ \mathbb{S}_3 \mid \mathsf{v}_3\end{array}}{\mathbb{S}_0 \mid \mathsf{t}\ \mathsf{u} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_3 \mid \mathsf{v}_3} \quad \textsc{SemOp\_App}$$

$$\dfrac{\begin{array}{c}\mathbb{S}_0 \mid \mathsf{t} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_1 \mid \bullet \\ \mathbb{S}_1 \mid \mathsf{u} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_2 \mid \mathsf{v}_2\end{array}}{\mathbb{S}_0 \mid \mathsf{t} \fatsemi \mathsf{u} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_2 \mid \mathsf{v}_2} \quad \textsc{SemOp\_EffSeq}$$

$$\dfrac{\begin{array}{c}\mathbb{S}_0 \mid \mathsf{t} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_1 \mid \star \\ \mathbb{S}_1 \mid \mathsf{u} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_2 \mid \mathsf{v}_2\end{array}}{\mathbb{S}_0 \mid \mathsf{case}\ \mathsf{t}\ \mathsf{of}\ \{\star \mapsto \mathsf{u}\} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_2 \mid \mathsf{v}_2} \quad \textsc{SemOp\_PatU}$$

$$\dfrac{\begin{array}{c}\mathbb{S}_0 \mid \mathsf{t} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_1 \mid \mathsf{Ur}\ \mathsf{d} \\ \mathbb{S}_1 \mid \mathsf{u}[\mathsf{y} := \mathsf{d}] \ \Downarrow\ \mathbb{S}_2 \mid \mathsf{v}_2\end{array}}{\mathbb{S}_0 \mid \mathsf{case}\ \mathsf{t}\ \mathsf{of}\ \{\mathsf{Ur}\ \mathsf{y} \mapsto \mathsf{u}\} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_2 \mid \mathsf{v}_2} \quad \textsc{SemOp\_PatE}$$

$$\dfrac{\begin{array}{c}\mathbb{S}_0 \mid \mathsf{t} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_1 \mid \mathsf{Inl}\ \mathsf{d} \\ \mathbb{S}_1 \mid \mathsf{u}_1[\mathsf{y}_1 := \mathsf{d}] \ \Downarrow\ \mathbb{S}_2 \mid \mathsf{v}_2\end{array}}{\mathbb{S}_0 \mid \mathsf{case}\ \mathsf{t}\ \mathsf{of}\ \{\mathsf{Inl}\ \mathsf{y}_1 \mapsto \mathsf{u}_1,\ \mathsf{Inr}\ \mathsf{y}_2 \mapsto \mathsf{u}_2\} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_2 \mid \mathsf{v}_2} \quad \textsc{SemOp\_PatInl}$$

$$\dfrac{\begin{array}{c}\mathbb{S}_0 \mid \mathsf{t} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_1 \mid \mathsf{Inr}\ \mathsf{d} \\ \mathbb{S}_1 \mid \mathsf{u}_2[\mathsf{y}_2 := \mathsf{d}] \ \Downarrow\ \mathbb{S}_2 \mid \mathsf{v}_2\end{array}}{\mathbb{S}_0 \mid \mathsf{case}\ \mathsf{t}\ \mathsf{of}\ \{\mathsf{Inl}\ \mathsf{y}_1 \mapsto \mathsf{u}_1,\ \mathsf{Inr}\ \mathsf{y}_2 \mapsto \mathsf{u}_2\} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_2 \mid \mathsf{v}_2} \quad \textsc{SemOp\_PatInr}$$

$$\dfrac{\begin{array}{c}\mathbb{S}_0 \mid \mathsf{t} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_1 \mid \langle \mathsf{d}_1, \mathsf{d}_2 \rangle \\ \mathbb{S}_1 \mid \mathsf{u}[\mathsf{y}_1 := \mathsf{d}_1, \mathsf{y}_2 := \mathsf{d}_2] \ \Downarrow\ \mathbb{S}_2 \mid \mathsf{v}_2\end{array}}{\mathbb{S}_0 \mid \mathsf{case}\ \mathsf{t}\ \mathsf{of}\ \{\langle \mathsf{y}_1, \mathsf{y}_2 \rangle \mapsto \mathsf{u}\} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_2 \mid \mathsf{v}_2} \quad \textsc{SemOp\_PatP}$$

$$\dfrac{\begin{array}{c}\mathbb{S}_0 \mid \mathsf{t} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_1 \mid @\mathsf{R}\ \mathsf{d} \\ \mathbb{S}_1 \mid \mathsf{u}[\mathsf{y} := \mathsf{d}] \ \Downarrow\ \mathbb{S}_2 \mid \mathsf{v}_2\end{array}}{\mathbb{S}_0 \mid \mathsf{case}\ \mathsf{t}\ \mathsf{of}\ \{@\mathsf{R}\ \mathsf{y} \mapsto \mathsf{u}\} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_2 \mid \mathsf{v}_2} \quad \textsc{SemOp\_PatR}$$

$$\dfrac{\begin{array}{l}\text{fresh } h\\ \mathbb{S}_0 \sqcup \{\mathsf{x} : \mathsf{D} = h\} \mid \mathsf{t}[\mathsf{x} := \lfloor h \rfloor] \ \Downarrow\ \mathbb{S}_1 \sqcup \{\mathsf{x} : \mathsf{D} = \mathsf{d}\} \mid \bullet\end{array}}{\mathbb{S}_0 \mid \mathsf{alloc}_{\mathsf{D}}\ \mathsf{x} \,.\, \mathsf{t} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_1 \mid \mathsf{d}} \quad \textsc{SemOp\_Alloc}$$

$$\dfrac{\mathbb{S}_0 \mid \mathsf{t} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_1 \mid \lfloor h \rfloor}{\mathbb{S}_0 \mid \mathsf{t} \lhd^p \star \ \Downarrow\ \mathbb{S}_1[h := \star] \mid \bullet} \quad \textsc{SemOp\_FillU}$$

$$\dfrac{\mathbb{S}_0 \mid \mathsf{t} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_1 \mid \lfloor h \rfloor}{\mathbb{S}_0 \mid \mathsf{t} \lhd^p \lambda \mathsf{x} : \mathsf{A} \,.\, \mathsf{u} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_1[h := \lambda \mathsf{x} : \mathsf{A} \,.\, \mathsf{u}] \mid \bullet} \quad \textsc{SemOp\_FillFn}$$

$$\dfrac{\begin{array}{l}\mathbb{S}_0 \mid \mathsf{t} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_1 \mid \lfloor h \rfloor\\ \mathbb{S}_1 \mid \mathsf{u} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_2 \mid \mathsf{d}_2\end{array}}{\mathbb{S}_0 \mid \mathsf{t} \lhd^p \mathsf{u} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_2[h := \mathsf{d}_2] \mid \bullet} \quad \textsc{SemOp\_FillL}$$

$$\dfrac{\begin{array}{l}\text{fresh } h'\\ \mathbb{S}_0 \mid \mathsf{t} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_1 \mid \lfloor h \rfloor\\ \mathbb{S}_1[h := \mathsf{Ur}\ h'] \mid \mathsf{u}[\mathsf{y} := \lfloor h' \rfloor] \ \Downarrow\ \mathbb{S}_2 \mid \mathsf{v}_2\end{array}}{\mathbb{S}_0 \mid \mathsf{t} \lhd^p \mathsf{Ur}\ \mathsf{y} \,.\, \mathsf{u} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_2 \mid \mathsf{v}_2} \quad \textsc{SemOp\_FillE}$$

$$\dfrac{\begin{array}{l}\text{fresh } h'\\ \mathbb{S}_0 \mid \mathsf{t} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_1 \mid \lfloor h \rfloor\\ \mathbb{S}_1[h := \mathsf{Inl}\ h'] \mid \mathsf{u}[\mathsf{y} := \lfloor h' \rfloor] \ \Downarrow\ \mathbb{S}_2 \mid \mathsf{v}_2\end{array}}{\mathbb{S}_0 \mid \mathsf{t} \lhd^p \mathsf{Inl}\ \mathsf{y} \,.\, \mathsf{u} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_2 \mid \mathsf{v}_2} \quad \textsc{SemOp\_FillInl}$$

$$\dfrac{\begin{array}{l}\text{fresh } h'\\ \mathbb{S}_0 \mid \mathsf{t} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_1 \mid \lfloor h \rfloor\\ \mathbb{S}_1[h := \mathsf{Inr}\ h'] \mid \mathsf{u}[\mathsf{y} := \lfloor h' \rfloor] \ \Downarrow\ \mathbb{S}_2 \mid \mathsf{v}_2\end{array}}{\mathbb{S}_0 \mid \mathsf{t} \lhd^p \mathsf{Inr}\ \mathsf{y} \,.\, \mathsf{u} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_2 \mid \mathsf{v}_2} \quad \textsc{SemOp\_FillInr}$$

$$\dfrac{\begin{array}{l}\text{fresh } h_1\\ \text{fresh } h_2\\ \mathbb{S}_0 \mid \mathsf{t} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_1 \mid \lfloor h \rfloor\\ \mathbb{S}_1[h := \langle h_1, h_2 \rangle] \mid \mathsf{u}[\mathsf{y}_1 := \lfloor h_1 \rfloor, \mathsf{y}_2 := \lfloor h_2 \rfloor] \ \Downarrow\ \mathbb{S}_2 \mid \mathsf{v}_2\end{array}}{\mathbb{S}_0 \mid \mathsf{t} \lhd^p \langle \mathsf{y}_1, \mathsf{y}_2 \rangle \,.\, \mathsf{u} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_2 \mid \mathsf{v}_2} \quad \textsc{SemOp\_FillP}$$

$$\dfrac{\begin{array}{l}\text{fresh } h'\\ \mathbb{S}_0 \mid \mathsf{t} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_1 \mid \lfloor h \rfloor\\ \mathbb{S}_1[h := \mathsf{@R}\ h'] \mid \mathsf{u}[\mathsf{y} := \lfloor h' \rfloor] \ \Downarrow\ \mathbb{S}_2 \mid \mathsf{v}_2\end{array}}{\mathbb{S}_0 \mid \mathsf{t} \lhd^p \mathsf{@R}\ \mathsf{x} \,.\, \mathsf{u} \ \Downarrow\ \mathbb{S}_2 \mid \mathsf{v}_2} \quad \textsc{SemOp\_FillR}$$

```
Definition rules:         57 good    0 bad
Definition rule clauses: 152 good    0 bad
```