

# IB013 Logické programování I

Hana Rudová

jaro 2011

## Základní informace

- **Přednáška:** účast není povinná nicméně ...
- **Cvičení:** účast povinná, zápočet udělen za zápočtový projekt
  - individuální doplňující příklady za zmeškaná cvičení
- **Web předmětu: interaktivní osnova v ISu**
  - průsvitky dostupné postupně v průběhu semestru
  - harmonogram výuky, předběžný obsah výuky pro jednotlivé přednášky během semestru
  - elektronicky dostupné materiály
  - informace o zápočtových projektech
- **Obsah přednášky**
  - základy programování v jazyce Prolog
  - teorie logického programování
  - logické programování s omezujícími podmínkami
  - implementace logického programování

## Hodnocení předmětu

- **Zápočtový projekt:** celkem až 40 bodů
- **Průběžná písemná práce:** až 30 bodů (základy programování v Prologu)
  - pro každého jediný termín: **22.března**
  - alternativní termín pouze v případech závažných důvodů pro neúčast
  - vzor písemky na webu předmětu
- **Závěrečná písemná práce:** až 150 bodů
  - vzor písemky na webu předmětu
  - opravný termín možný jako ústní zkouška
- **Hodnocení:** součet bodů za projekt a za obě písemky
  - známka A za cca 175 bodů, známka F za cca 110 bodů
  - známka bude zapsána pouze těm, kteří dostanou zápočet za projekt

## Literatura

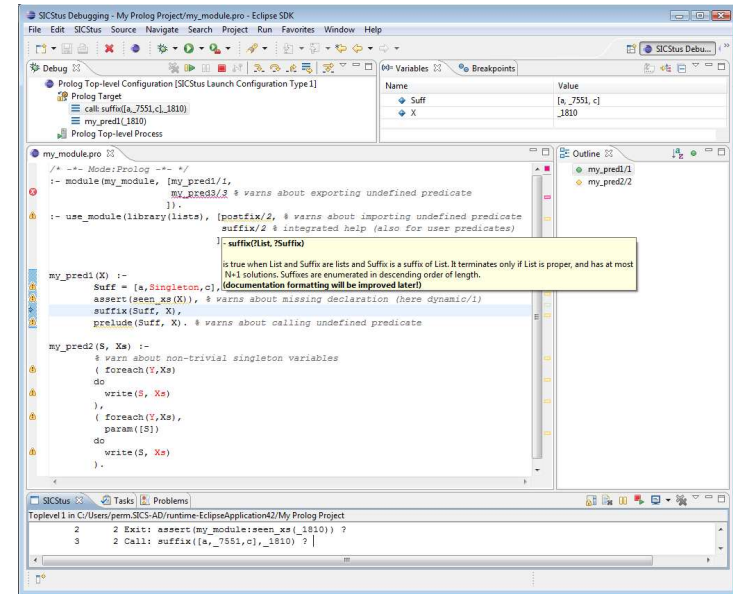
- **Bratko, I. Prolog Programming for Artificial Intelligence.** Addison-Wesley, 2001.
  - prezenčně v knihovně
- **Clocksin, W. F. – Mellish, Ch. S. Programming in Prolog.** Springer, 1994.
- **Sterling, L. – Shapiro, E. Y. The art of Prolog : advanced programming techniques.** MIT Press, 1987.
- **Nerode, A. – Shore, R. A. Logic for applications.** Springer-Verlag, 1993.
  - prezenčně v knihovně
- **Dechter, R. Constraint Processing.** Morgan Kaufmann Publishers, 2003.
  - prezenčně v knihovně

+ Elektronicky dostupné materiály (viz web předmětu)

# Software: SICStus Prolog

- Doporučovaná implementace Prologu
- Dokumentace: <http://www.fi.muni.cz/~hanka/sicstus/doc/html>
- Komerční produkt
  - Zakoupena licence pro instalace na domácí počítače studentů
- Nové IDE pro SICStus Prolog SPIDER
  - dostupné až s poslední verzí SICStus 4.1.3
  - <http://www.sics.se/sicstus/spider>
  - používá Eclipse SDK
- Podrobné informace dostupné přes web předmětu
  - stažení SICStus Prologu (sw + licenční klíče)
  - pokyny k instalaci (SICStus Prolog, Eclipse, Spider)

# SICStus IDE SPIDER



## Cvičení

- Zaměřeno na praktické aspekty, u počítačů
- Skupiny:
  - skupina 01, sudý pátek, první cvičení **25.února**
  - skupina 02, lichý pátek, první cvičení **4.března**
  - zápis do skupin: **dnes od 17:00**
- Zápočtové projekty: **Adriana Strejčková <ada@fi.muni.cz>**
  - zápočtové projekty dostupné přes web předmětu
  - zahájení registrace řešitelů projektu: **9. března, 19:00**
  - předběžná analýza řešeného problému: **13. dubna**
  - termín pro odevzdání projektů: **20. května**
  - předvádění projektů (po registraci): **25.května – 17.června**

## Zápočtové projekty

### Projekty

- týmová práce na projektech, až 3 řešitelé
- lp a clp projekty
- podrobné pokyny k zápočtovým projektům na webu předmětu
  - bodování, obsah předběžné zprávy a projektu

### Předběžná zpráva

- podrobné zadání
- v jakém rozsahu chcete úlohu řešit
- které vstupní informace bude program používat a co bude výstupem programu
- scénáře použití programu (tj. ukázky dvojic konkrétních vstupů a výstupů)

## Průběžná písemná práce

- Pro každého jediný termín **22. března**
- Alternativní termín pouze v závažných důvodech pro neúčast
- Celkem až 30 bodů (150 závěrečná písemka, 40 projekt)
- 3 příklady, 40 minut
- Napsat zadaný predikát, porovnat chování programů
- Obsah: první čtyři přednášky a první dvě cvičení
- Oblasti, kterých se budou příklady zejména týkat
  - unifikace
  - seznamy
  - backtracking
  - optimalizace posledního volání
  - řez
  - aritmetika
- Ukázka průběžné písemné práce na webu

## Prolog

- PROgramming in LOGic
  - část predikátové logiky prvního řádu
- Deklarativní programování
  - specifikační jazyk, jasná sémantika, nevhodné pro procedurální postupy
  - **Co dělat** namísto **Jak dělat**
- Základní mechanismy
  - unifikace, stromové datové struktury, automatický backtracking

## Úvod do Prologu

## Logické programování

### Historie

- Rozvoj začíná po roce 1970
- Robert Kowalski – teoretické základy
- Alain Colmerauer, David Warren (*Warren Abstract Machine*) – implementace
- SICStus Prolog vyvíjen od roku 1985
- Logické programování s omezujícími podmínkami – od poloviny 80. let

### Aplikace

- rozpoznávání řeči, telekomunikace, biotechnologie, logistika, plánování, data mining, business rules, ...
- SICStus Prolog — the first 25 years, Mats Carlsson, Per Mildner. To appear in Theory and Practice of Logic Programming, 2010. <http://arxiv.org/abs/1011.5640>.

## Program = fakta + pravidla

- **(Prologovský) program je seznam programových klauzulí**
  - programové klauzule: fakt, pravidlo
- **Fakt:** deklaruje vždy pravdivé věci
  - `clovek( novak, 18, student ).`
- **Pravidlo:** deklaruje věci, jejichž pravdivost závisí na daných podmínkách
  - `studies( X ) :- clovek( X, _Vek, student ).`
  - **alternativní (obousměrný) význam pravidel**

pro každé X,	pro každé X,
X studuje, jestliže	X je student, potom
X je student	X studuje
  - `pracuje( X ) :- clovek( X, _Vek, CoDeLa ), prace( CoDeLa ).`
- **Predikát:** seznam pravidel a faktů se stejným **funktoem a aritou**
  - značíme: `clovek/3, student/1`; analogie **procedury** v procedurálních jazycích,

## Dotaz

- **Dotaz:** uživatel se ptá programu, zda jsou věci pravdivé
  - `?- studies( novak ).`                    % yes        **splnitelný dotaz**
  - `?- studies( novotny ).`                % no         **nesplnitelný dotaz**
- **Odpověď** na dotaz
  - pozitivní – **dotaz je splnitelný a uspěl**
  - negativní – **dotaz je nesplnitelný a neuspěl**
- Proměnné jsou během výpočtu **instanciovány** (= nahrazeny objekty)
  - `?- clovek( novak, 18, Prace ).`  
Prace = student
  - výsledkem dotazu je **instanciace proměnných** v dotazu
  - dosud nenainstanciovaná proměnná: **volná proměnná**
- Prolog umí generovat více odpovědí pokud existují
  - `?- clovek( novak, Vek, Prace ).`                    % všechna řešení přes ";"

## Komentáře k syntaxi

- Klauzule ukončeny tečkou
- Základní příklady argumentů
  - **konstanty:** (tomas, anna) ... začínají malým písmenem
  - **proměnné**
    - X, Y ... začínají velkým písmenem
    - \_, \_A, \_B ... začínají podtržítkem (nezajímá nás vracená hodnota)
- Psaní komentářů
  - `clovek( novak, 18, student ).`                    % komentář na konci řádku
  - `clovek( novotny, 30, ucitel ).`                    /\* komentář \*/

## Klauzule = fakt, pravidlo, dotaz

- **Klauzule** se skládá z **hlavy a těla**
- Tělo je **seznam cílů** oddělených čárkami, čárka = konjunkce
- **Fakt:** pouze hlava, prázdné tělo
  - `rodic( pavla, robert ).`
- **Pravidlo:** hlava i tělo
  - `upracovany_clovek( X ) :- clovek( X, _Vek, Prace ), prace( Prace, tezka ).`
- **Dotaz:** prázdná hlava, pouze tělo
  - `?- clovek( novak, Vek, Prace ).`  
`?- rodic( pavla, Dite ), rodic( Dite, Vnuk ).`

## Rekurzivní pravidla

```

predek( X, Z ) :- rodic( X, Z ).           % (1)

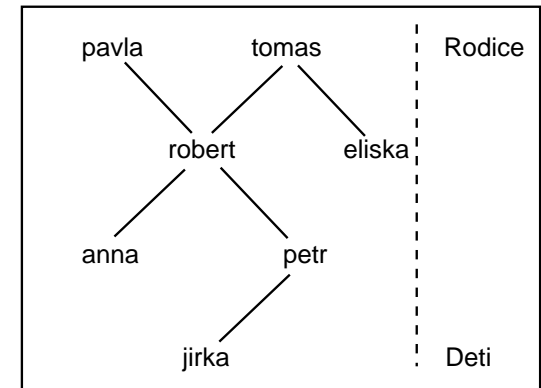
predek( X, Z ) :- rodic( X, Y ),         % (2)
                  rodic( Y, Z ).

predek( X, Z ) :- rodic( X, Y ),         % (2')
                  predek( Y, Z ).
    
```

## Příklad: rodokmen

```

rodic( pavla, robert ).
rodic( tomas, robert ).
rodic( tomas, eliska ).
rodic( robert, anna ).
rodic( robert, petr ).
rodic( petr, jirka ).
    
```



```

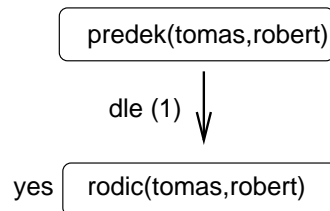
predek( X, Z ) :- rodic( X, Z ).           % (1)

predek( X, Z ) :- rodic( X, Y ),         % (2')
                  predek( Y, Z ).
    
```

## Výpočet odpovědi na dotaz ?- predek(tomas,robert)

```

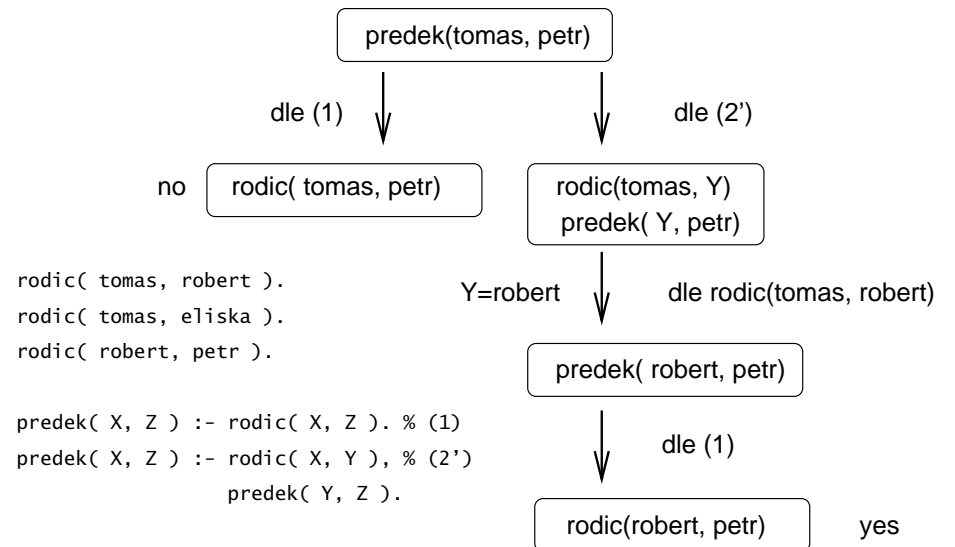
rodic( pavla, robert ).
rodic( tomas, robert ).
rodic( tomas, eliska ).
rodic( robert, anna ).
rodic( robert, petr ).
rodic( petr, jirka ).
    
```



```

predek( X, Z ) :- rodic( X, Z ).           % (1)
predek( X, Z ) :- rodic( X, Y ),         % (2')
                  predek( Y, Z ).
    
```

## Výpočet odpovědi na dotaz ?- predek(tomas, petr)



```

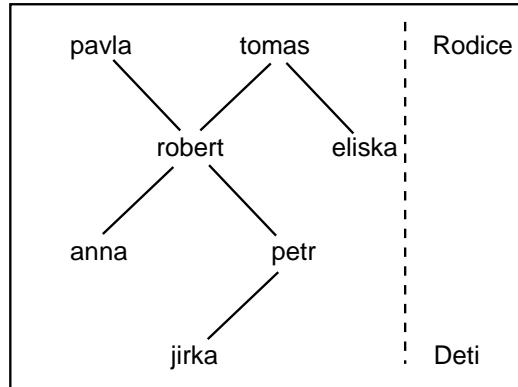
rodic( tomas, robert ).
rodic( tomas, eliska ).
rodic( robert, petr ).
    
```

```

predek( X, Z ) :- rodic( X, Z ).           % (1)
predek( X, Z ) :- rodic( X, Y ),         % (2')
                  predek( Y, Z ).
    
```

## Odpoď na dotaz ?- predek(robert, Potomek)

```
rodic( pavla, robert ).
rodic( tomas, robert ).
rodic( tomas, eliska ).
rodic( robert, anna ).
rodic( robert, petr ).
rodic( petr, jirka ).
```



```
predek( X, Z ) :- rodic( X, Z ).      % (1)
predek( X, Z ) :- rodic( X, Y ),      % (2')
                        predek( Y, Z ).
```

```
predek(robert, Potomek) --> ???
```

## Syntaxe Prologovských programů

- **Typy objektů jsou rozpoznávány podle syntaxe**
- **Atom**
  - řetězce písmen, čísel, „\_“ začínající malým písmenem: `pavel`, `pavel_novak`, `x25`
  - řetězce speciálních znaků: `<->`, `====>`
  - řetězce v apostrofech: `'Pavel'`, `'Pavel Novák'`
- **Celá a reálná čísla:** `0`, `-1056`, `0.35`
- **Proměnná**
  - řetězce písmen, čísel, „\_“ začínající velkým písmenem nebo „\_“
  - **anonymní proměnná:** `ma_dite(X) :- rodic( X, _ ).`
    - hodnotu anonymní proměnné Prolog na dotaz nevrací: `?- rodic( X, _ )`
  - lexikální rozsah proměnné je pouze jedna klauzule:  
`prvni(X,X,X).`  
`prvni(X,X,_).`

## Syntaxe a význam Prologovských programů

### Termy

- **Term** – datové objekty v Prologu: `datum( 1, kveten, 2003 )`
  - **funktor:** `datum`
  - **argumenty:** `1, kveten, 2003`
  - **arita** – počet argumentů: `3`
- Všechny strukturované objekty v Prologu jsou **stromy**
  - `trojuhelnik( bod(4,2), bod(6,4), bod(7,1) )`
- **Hlavní funktor** termu – funktor v kořenu stromu odpovídající termu
  - `trojuhelnik` je hlavní funktor v `trojuhelnik( bod(4,2), bod(6,4), bod(7,1) )`

# Unifikace

- Termíny jsou **unifikovatelné**, jestliže
  - jsou identické nebo
  - proměnné v obou termínech mohou být instanciovány tak, že termíny jsou po substituci identické
  - $\text{datum}(D1, M1, 2003) = \text{datum}(1, M2, Y2)$     **operátor** =  
 $D1 = 1, M1 = M2, Y2 = 2003$
- Hledáme **nejobecnější unifikátor** (*most general unifier (MGU)*)
  - jiné instanciaci? ...  $D1 = 1, M1 = 5, Y2 = 2003$  ... není MGU
  - ?-  $\text{datum}(D1, M1, 2003) = \text{datum}(1, M2, Y2), D1 = M1$ .
- **Test výskytu** (*occurs check*)
  - ?-  $X=f(X)$ .
  - $X = f(f(f(f(f(f(f(f(\dots))))))))))$

# Unifikace

Termíny S a T jsou unifikovatelné, jestliže

1. S a T jsou konstanty a tyto konstanty jsou identické;
2. S je proměnná a T cokoliv jiného – S je instanciována na T;  
T je proměnná a S cokoliv jiného – T je instanciována na S
3. S a T jsou termíny
  - S a T mají stejný funktor a aritu a
  - všechny jejich odpovídající argumenty jsou unifikovatelné
  - výsledná substituce je určena unifikací argumentů

Příklady:

$k = k$  ... yes,  $k1 = k2$  ... no,  $A = k(2,3)$  ... yes,  $k(s,a,l(1)) = A$  ... yes  
 $s(sss(2),B,ss(2)) = s(sss(2),4,ss(2),s(1))$  ... no  
 $s(sss(A),4,ss(3)) = s(sss(2),4,ss(A))$  ... no  
 $s(sss(A),4,ss(C)) = s(sss(t(B)),4,ss(A))$  ... A=t(B),C=t(B) ... yes

## Deklarativní a procedurální význam programů

- $p :- q, r$ .
- Deklarativní: **Co** je výstupem programu?
  - p je pravdivé, jestliže q a r jsou pravdivé
  - Z q a r plyne p⇒ význam mají logické relace
- Procedurální: **Jak** vypočítáme výstup programu?
  - p vyřešíme tak, že **nejprve** vyřešíme q a **pak** r⇒ kromě logických relací je významné i pořadí cílů
  - výstup
    - indikátor yes/no určující, zda byly cíle splněny
    - instanciaci proměnných v případě splnění cílů

## Deklarativní význam programu

**Instance klauzule:** proměnné v klauzuli jsou substituovány termem

- $\text{ma\_dite}(X) :- \text{rodic}(X, Y)$ .                   % klauzule
- $\text{ma\_dite}(\text{petr}) :- \text{rodic}(\text{petr}, Z)$ .           % instance klauzule

Máme-li program a cíl G, pak **deklarativní význam** říká:

cíl G je splnitelný právě tehdy, když cíl ?-  $\text{ma\_dite}(\text{petr})$ .  
existuje klauzule C v programu taková, že  
existuje instance I klauzule C taková, že  
hlava I je identická s G a  
všechny cíle v těle I jsou pravdivé.

## Konjunce "," vs. disjunkce ";" cílů

- **Konjunce** = nutné splnění všech cílů

- $p :- q, r.$

- **Disjunkce** = stačí splnění libovolného cíle

- $p :- q; r.$

- $p :- q.$

- $p :- r.$

- priorita středníku je vyšší:

- $p :- q, r; s, t, u.$

- $p :- (q, r) ; (s, t, u).$

- $p :- q, r.$

- $p :- s, t, u.$

## Pořadí klauzulí a cílů

(a)  $a(1).$   $?- a(1).$

$a(X) :- b(X,Y), a(Y).$

$b(1,1).$

(b)  $a(X) :- b(X,Y), a(Y).$  % změněné pořadí klauzulí v programu vzhledem k (a)

$a(1).$

$b(1,1).$

% nenalezení odpovědi: nekonečný cyklus

(c)  $a(X) :- b(X,Y), c(Y).$   $?- a(X).$

$b(1,1).$

$c(2).$

$c(1).$

(d)  $a(X) :- c(Y), b(X,Y).$  % změněné pořadí cílů v těle klauzule vzhledem k (c)

$b(1,1).$

$c(2).$

$c(1).$

% náročnější nalezení první odpovědi než u (c)

**V obou případech stejný deklarativní ale odlišný procedurální význam**

## Pořadí klauzulí a cílů II.

(1)  $a(X) :- c(Y), b(X,Y).$

$?- a(X).$

(2)  $b(1,1).$

$a(X)$

(3)  $c(2).$

dle (1) |

(4)  $c(1).$

$c(Y), b(X,Y)$

dle (3) / Y=2

dle (4) \ Y=1

$b(X,2)$

$b(X,1)$

no

dle (2) | X=1

yes

Vyzkoušejte si:

(1)  $a(X) :- b(X,X), c(X).$

(3)  $a(X) :- b(Y,X), c(X).$

(4)  $b(2,2).$

(5)  $b(2,1).$

(6)  $c(1).$

## Operátory, aritmetika



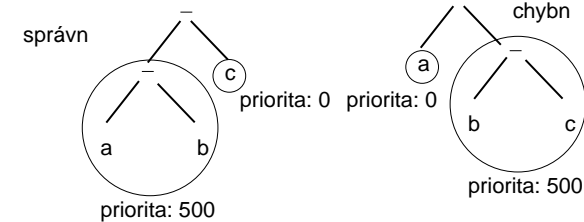
# Operátory

- Infixová notace:  $2 * a + b * c$
- Prefixová notace:  $+( *(2, a), *(b, c) )$       prioritá +: 500, prioritá \*: 400
- **Priorita operátorů:** operátor s **nejvyšší** prioritou je hlavní funktor
- Uživatelsky definované operátory: `zna petr zna alese. zna( petr, alese).`
- Definice operátoru: `:- op( 600, xfx, zna ).`      prioritá: 1..1200
  - `:- op( 1100, xfy, ; ).`      nestrukturované objekty: 0
  - `:- op( 1000, xfy, , ).`
  - `p :- q,r; s,t. p :- (q,r) ; (s,t).` ; má vyšší prioritou než ,
  - `:- op( 1200, xfx, :- ).`      :- má nejvyšší prioritou
- Definice operátoru není spojena s datovými manipulacemi (kromě speciálních případů)

# Typy operátorů

- Typy operátorů
  - infixové operátory:  $xfx, xfy, yfx$       př.  $xfx = yfx -$
  - prefixové operátory:  $fx, fy$       př.  $fx ?- fy -$
  - postfixové operátory:  $xf, yf$
- **x a y určují prioritou argumentu**

- x reprezentuje argument, jehož prioritá musí být **striktně menší** než u operátoru
- y reprezentuje argument, jehož prioritá je **menší nebo rovna** operátoru
- $a-b-c$  odpovídá  $(a-b)-c$  a ne  $a-(b-c)$ ; „-“ odpovídá  $yfx_$



# Aritmetika

- Předdefinované operátory
  - $+, -, *, /, **$  mocnina,  $//$  celočíselné dělení,  $\text{mod}$  zbytek po dělení
- `?- X = 1 + 2.`       $X = 1 + 2$  = odpovídá unifikaci
- `?- X is 1 + 2.`
  - $X = 3$  „is“ je **speciální předdefinovaný operátor**, který vynutí evaluaci
    - porovnej:  $N = (1+1+1+1)$        $N \text{ is } (1+1+1+1)$
    - pravá strana musí být vyhodnotitelný výraz (bez proměnné)
    - volání `?- X is Y + 1.` způsobí chybu
- Další speciální předdefinované operátory
  - $>, <, >=, =, =:=$  **aritmetická rovnost**,  $=\backslash=$  **aritmetická nerovnost**
    - porovnej:  $1+2 =:= 2+1$        $1+2 = 2+1$
    - obě strany musí být vyhodnotitelný výraz: volání `?- 1 < A + 2.` způsobí chybu

# Různé typy rovností a porovnání

- $X = Y$       X a Y jsou unifikovatelné
- $X \backslash= Y$       X a Y nejsou unifikovatelné, (také  $\backslash+ X = Y$ )
- $X == Y$       X a Y jsou identické
  - porovnej: `?- A == B. ... no`      `?- A=B, A==B. ... B = A yes`
- $X \backslash== Y$       X a Y nejsou identické
  - porovnej: `?- A \== B. ... yes`      `?- A=B, A \== B. ... A no`
- $X \text{ is } Y$       Y je aritmeticky vyhodnoceno a výsledek je přiřazen X
- $X := Y$       X a Y jsou si aritmeticky rovny
- $X \backslash= Y$       X a Y si aritmeticky nejsou rovny
- $X < Y$       aritmetická hodnota X je menší než Y ( $=<, >, >=$ )
- $X @< Y$       term X předchází term Y ( $@=<, @>, @>=$ )
  1. porovnání termů: podle abecedního n. aritmetického uspořádání
  2. porovnání struktur: podle arity, pak hlavního funktoru a pak zleva podle argumentů
  - `?- f( pavel, g(b) ) @< f( pavel, h(a) ). ... yes`

## Prolog: příklady

## Příklad: průběh výpočtu

```
a :- b,c,d.  
b :- e,c,f,g.  
b :- g,h.  
c.  
d.  
e :- i.  
e :- h.  
g.  
h.  
i.
```

Jak vypadá průběh výpočtu pro dotaz ?- a.

## Příklad: věž z kostek

Příklad: postavte věž zadané velikosti ze tří různě velkých kostek tak, že kostka smí ležet pouze na větší kostce.

```
kostka(mala). kostka(stredni). kostka(velka).
```

```
vetsi(zeme,velka). vetsi(zeme,stredni). vetsi(zeme,mala).  
vetsi(velka,stredni). vetsi(velka,mala).  
vetsi(stredni,mala).
```

```
% ?- postav_vez(vez(zeme,0), vez(Kostka,0)).  
% ?- postav_vez(vez(zeme,0), vez(Kostka,3)).
```

```
postav_vez( Vez, Vez ).
```

```
postav_vez( Vstup, Vystup ) :- pridej_kostku( Vstup, Pridani ),  
                             postav_vez( Pridani, Vystup ).
```

```
pridej_kostku( Vstup, Pridani ) :- Vstup = vez( Vrcho1, Vyska ),  
                                  kostka( Kostka ),  
                                  vetsi( Vrcho1, Kostka ),  
                                  NovaVyska is Vyska + 1,  
                                  Pridani = vez( Kostka, NovaVyska ).
```

## Řez, negace

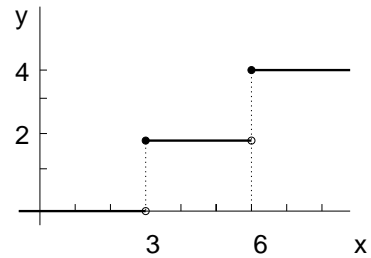
## Řez a upnutí

$f(X,0) :- X < 3, !.$

$f(X,2) :- 3 \leq X, X < 6, !.$

$f(X,4) :- 6 \leq X.$

přidání **operátoru řezu** `,,!''`



?-  $f(1,Y), Y>2.$

$f(X,0) :- X < 3, !. \quad \% (1)$

$f(X,2) :- X < 6, !. \quad \% (2)$

$f(X,4).$

?-  $f(1,Y).$

- Smazání řezu v (1) a (2) změní chování programu
- Upnutí:** po splnění podcílů před řezem se už další klauzule neuvažují

## Řez a ořezání

$f(X,Y) :- s(X,Y).$

$s(X,Y) :- Y \text{ is } X + 1.$

$s(X,Y) :- Y \text{ is } X + 2.$

$f(X,Y) :- s(X,Y), !.$

$s(X,Y) :- Y \text{ is } X + 1.$

$s(X,Y) :- Y \text{ is } X + 2.$

?-  $f(1,Z).$

$Z = 2 ? ;$

$Z = 3 ? ;$

no

?-  $f(1,Z).$

$Z = 2 ? ;$

no

- Ořezání:** po splnění podcílů před řezem se už neuvažuje další možné splnění těchto podcílů
- Smazání řezu změní chování programu

## Chování operátoru řezu

- Předpokládejme, že klauzule  $H :- T1, T2, \dots, Tm, !, \dots, Tn.$  je aktivována voláním cíle  $G$ , který je unifikovatelný s  $H$ .  $G=h(X,Y)$
- V momentě, kdy je nalezen řez, existuje řešení cílů  $T1, \dots, Tm$   $X=1, Y=1$
- Ořezání:** při provádění řezu se už další možné splnění cílů  $T1, \dots, Tm$  nehledá a všechny ostatní alternativy jsou odstraněny  $Y=2$
- Upnutí:** dále už nevyvolávám další klauzule, jejichž hlava je také unifikovatelná s  $G$   $X=2$

?-  $h(X,Y).$

$h(X,Y)$

$h(1,Y) :- t1(Y), !.$

$X=1 / \quad \backslash \quad X=2$

$h(2,Y) :- a.$

$t1(Y) \quad a$  (vynechej: upnutí)

$Y=1 / \quad \backslash \quad Y=2$

$t1(1) :- b.$

$b \quad c$  (vynechej: ořezání)

$t1(2) :- c.$

/

## Řez: návrat na rodiče

?-  $a(X).$

(1)  $a(X) :- h(X,Y).$

(2)  $a(X) :- d.$

(3)  $h(1,Y) :- t1(Y), !, e(X).$

(4)  $h(2,Y) :- a.$

(5)  $t1(1) :- b.$

(6)  $t1(2) :- c.$

(7)  $b :- c.$

(8)  $b :- d.$

(9)  $d.$

(10)  $e(1).$

(11)  $e(2).$

- Po zpracování klauzule s řezem se vracím až na rodiče této klauzule, tj.  $a(X)$

## Řez: příklad

```
c(X) :- p(X).           c1(X) :- p(X), !.
c(X) :- v(X).           c1(X) :- v(X).

                p(1).  p(2).      v(2).

?- c(2).           ?- c1(2).
true ? ; %p(2)     true ? ; %p(2)
true ? ; %v(2)     no
no

?- c(X).           ?- c1(X).
X = 1 ? ; %p(1)    X = 1 ? ; %p(1)
X = 2 ? ; %p(2)    no
X = 2 ? ; %v(2)
no
```

## Typy řezu

- Zlepšení efektivity programu: určíme, které alternativy nemá smysl zkoušet  
Poznámka: na vstupu pro X očekávám číslo
- **Zelený řez:** odstraní pouze neúspěšná odvození
  - $f(X,1) :- X \geq 0, !. f(X,-1) :- X < 0.$   
bez řezu zkouším pro nezáporná čísla 2. klauzuli
- **Modrý řez:** odstraní redundantní řešení
  - $f(X,1) :- X \geq 0, !. f(0,1). f(X,-1) :- X < 0.$  bez řezu vrátí  $f(0,1)$  2x
- **Červený řez:** odstraní úspěšná řešení
  - $f(X,1) :- X \geq 0, !. f(_X,-1).$  bez řezu uspěje 2. klauzule pro nezáporná čísla

## Řez: cvičení

1. Porovnejte chování uvedených programů pro zadané dotazy.

```
a(X,X) :- b(X).      a(X,X) :- b(X),!.    a(X,X) :- b(X),c.
a(X,Y) :- Y is X+1.  a(X,Y) :- Y is X+1.  a(X,Y) :- Y is X+1.
b(X) :- X > 10.      b(X) :- X > 10.      b(X) :- X > 10.
c :- !.

?- a(X,Y).
?- a(1,Y).
?- a(11,Y).
```

2. Napište predikát pro výpočet maxima  $\max(X, Y, Max)$

## Negace jako neúspěch

- **Speciální cíl pro nepravdu (neúspěch) fail a pravdu true**
- X a Y nejsou unifikovatelné:  $\text{different}(X, Y)$
- $\text{different}(X, Y) :- X = Y, !, \text{fail}.$   
 $\text{different}(_X, _Y).$
- X je muž:  $\text{muz}(X)$   
 $\text{muz}(X) :- \text{zena}(X), !, \text{fail}.$   
 $\text{muz}(_X).$

## Negace jako neúspěch: operátor \+

- different(X,Y) :- X = Y, !, fail.      muz(X) :- zena(X), !, fail.  
different(\_X,\_Y).                      muz(\_X).
- Unární operátor \+ P
  - jestliže P uspěje, potom \+ P neuspěje  
 \+(P) :- P, !, fail.
  - v opačném případě \+ P uspěje  
 \+(\_).
- different( X, Y ) :- \+ X=Y.
- muz( X ) :- \+ zena( X ).
- Pozor: takto definovaná negace \+P vyžaduje **konečné odvození P**

## Negace a proměnné

```
\+(P) :- P, !, fail. % (I)
\+(_).           % (II)

dobre( citroen ).      % (1)
dobre( bmw ).         % (2)
drahe( bmw ).         % (3)
rozumne( Auto ) :-   % (4)
    \+ drahe( Auto ).

?- dobre( X ), rozumne( X ).
```

```
dobre(X),rozumne(X)
|
dle (1), X/citroen
|
rozumne(citroen)
|
dle (4)
|
\+ drahe(citroen)
|
dle (I)
|
drahe(citroen),!, fail
|
no
yes
```

## Negace a proměnné

```
\+(P) :- P, !, fail. % (I)
\+(_).           % (II)

dobre( citroen ).      % (1)
dobre( bmw ).         % (2)
drahe( bmw ).         % (3)
rozumne( Auto ) :-   % (4)
    \+ drahe( Auto ).

?- rozumne( X ), dobre( X ).
```

```
rozumne(X), dobre(X)
|
dle (4)
|
\+ drahe(X), dobre(X)
|
dle (I)
|
drahe(X),!,fail,dobre(X)
|
dle (3), X/bmw
|
!, fail, dobre(bmw)
|
fail,dobre(bmw)
|
no
```

## Bezpečný cíl

- ?- \+ drahe( citroen ).                      yes
- ?- \+ drahe( X ).                              no
- ?- rozumne( citroen ).                      yes
- ?- rozumne( X ).                              no
- \+ P je bezpečný: proměnné P jsou v okamžiku volání P instanciovány
  - negaci používáme pouze pro bezpečný cíl P

## Chování negace

- `?- \+ drahe( citroen ).` yes
  - `?- \+ drahe( X ).` no
  - Negace jako neúspěch používá **předpoklad uzavřeného světa**  
pravdivé je pouze to, co je dokazatelné
  - `?- \+ drahe( X ).` `\+ drahe( X ) :- drahe(X),!,fail.` `\+ drahe( X ).`  
z definice `\+` plyne: není dokazatelné, že existuje  $X$  takové, že `drahe( X )` platí  
tj. **pro všechna  $X$  platí `\+ drahe( X )`**
  - `?- drahe( X ).`  
PTÁME SE: existuje  $X$  takové, že `drahe( X )` platí
  - ALE: pro cíle s negací neplatí **existuje**  $X$  takové, že `\+ drahe( X )`
- ⇒ **negace jako neúspěch není ekvivalentní negaci v matematické logice**

## Predikáty na řízení běhu programu I.

- řez „!”
- `fail`: cíl, který vždy neuspěje `true`: cíl, který vždy uspěje
- `\+ P`: negace jako neúspěch  
`\+ P :- P, !, fail; true.`
- `once(P)`: vrátí pouze jedno řešení cíle  $P$   
`once(P) :- P, !.`
- Vyjádření **podmínky**:  $P \rightarrow Q ; R$ 
  - jestliže platí  $P$  tak  $Q$  `(P -> Q ; R) :- P, !, Q.`
  - v opačném případě  $R$  `(P -> Q ; R) :- R.`
  - příklad: `min(X,Y,Z) :- X < Y -> Z = X ; Z = Y.`
- $P \rightarrow Q$ 
  - odpovídá: `(P -> Q; fail)`
  - příklad: `zaporne(X) :- number(X) -> X < 0.`

## Predikáty na řízení běhu programu II.

- `call(P)`: zavolá cíl  $P$  a uspěje, pokud uspěje  $P$
- nekonečná posloupnost backtrackovacích voleb: `repeat`  
`repeat.`  
`repeat :- repeat.`

klasické použití: **generuj akci  $X$ , proved' ji a otestuj, zda neskončit**

```
Hlava :- ...
    uloz_stav( StaryStav ),
    repeat,
    generuj( X ),           % deterministické: generuj, provadej, testuj
    provadej( X ),
    testuj( X ),
    !,
    obnov_stav( StaryStav ),
    ...
```

## Seznamy

## Reprezentace seznamu

- **Seznam:** [ a , b , c ], prázdný seznam []
- **Hlava (libovolný objekt), tělo (seznam):** . (Hlava, TeĽo)
  - všechny strukturované objekty stromy – i seznamy
  - funktor ".", dva argumenty
  - .(a, .(b, .(c, []))) = [ a , b , c ]
  - notace: [ Hlava | TeĽo ] = [ a | TeĽo ]  
TeĽo je v [ a | TeĽo ] seznam, tedy píšeme [ a , b , c ] = [ a | [ b , c ] ]
- Lze psát i: [ a , b | TeĽo ]
  - před "|" je libovolný počet prvků seznamu , za "|" je seznam zbývajících prvků
  - [ a , b , c ] = [ a | [ b , c ] ] = [ a , b | [ c ] ] = [ a , b , c | [ ] ]
  - pozor: [ [ a , b ] | [ c ] ] ≠ [ a , b | [ c ] ]
- Seznam jako **neúplná datová struktura:** [ a , b , c | T ]
  - Seznam = [ a , b , c | T ], T = [ d , e | S ], Seznam = [ a , b , c , d , e | S ]

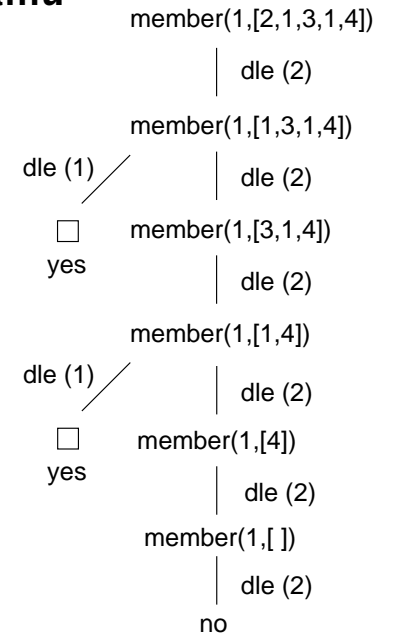
## Spojení seznamů

- `append( L1, L2, L3 )`
- Platí: `append( [ a , b ], [ c , d ], [ a , b , c , d ] )`
- Neplatí: `append( [ b , a ], [ c , d ], [ a , b , c , d ] )`,  
`append( [ a , [ b ] ], [ c , d ], [ a , b , c , d ] )`
- Definice:
  - pokud je 1. argument prázdný seznam, pak 2. a 3. argument jsou stejné seznamy:  
`append( [], S, S )`.
  - pokud je 1. argument neprázdný seznam, pak má 3. argument stejnou hlavu jako 1.:  
`append( [ X | S1 ], S2, [ X | S3 ] ) :- append( S1, S2, S3 )`.



## Prvek seznamu

- `member( X, S )`
- platí: `member( b, [ a , b , c ] )`.
- neplatí: `member( b, [ [ a , b ] | [ c ] ] )`.
- X je prvek seznamu S, když
  - X je hlava seznamu S nebo  
`member( X, [ X | _ ] )`. % (1)
  - X je prvek těla seznamu S  
`member( X, [ _ | TeĽo ] ) :- member( X, TeĽo )`. % (2)
- Příklady použití:
  - `member( 1, [ 2 , 1 , 3 ] )`.
  - `member( X, [ 1 , 2 , 3 ] )`.



## Příklady použití append

- `append( [], S, S )`.  
`append( [ X | S1 ], S2, [ X | S3 ] ) :- append( S1, S2, S3 )`.
- **Spojení seznamů:** `append( [ a , b , c ], [ 1 , 2 , 3 ], S )`.  
S = [ a , b , c , 1 , 2 , 3 ]  
`append( [ a , [ b , c ], d ], [ a , [], b ], S )`.  
S = [ a , [ b , c ], d , a , [], b ]
- **Dekompozice seznamu na dva seznamy:** `append( S1, S2, [ a , b ] )`.  
S1 = [], S2 = [ a , b ] ;  
S1 = [ a ], S2 = [ b ] ? ;  
S1 = [ a , b ], S2 = []
- **Vyhledávání v seznamu:** `append( Pred, [ c | Za ], [ a , b , c , d , e ] )`.  
Pred = [ a , b ], Za = [ d , e ]
- **Předchůdce a následník:** `append( _, [ Pred, c, Za | _ ], [ a , b , c , d , e ] )`.  
Pred = b, Za = d

## Smazání prvku seznamu delete( X, S, S1 )

- Seznam S1 odpovídá seznamu S, ve kterém je smazán prvek X
  - jestliže X je hlava seznamu S, pak výsledkem je tělo S  
delete( X, [X|Telo], Telo).
  - jestliže X je v těle seznamu, pak X je smazán až v těle  
delete( X, [Y|Telo], [Y|Telo1] ) :- delete( X, Telo, Telo1 ).
- delete smaže libovolný výskyt prvku pomocí backtrackingu  
?- delete(a, [a,b,a,a], S).  
S = [b,a,a];  
S = [a,b,a];  
S = [a,b,a]
- delete, který smaže pouze první výskyt prvku X
  - delete( X, [X|Telo], Telo) :- !.  
delete( X, [Y|Telo], [Y|Telo1] ) :- delete( X, Telo, Telo1).

## Optimalizace posledního volání

- Last Call Optimization (LCO)**
- Implementační technika snižující nároky na paměť
- Mnoho vnořených rekurzivních volání je náročné na paměť
- Použití LCO umožňuje vnořenou rekurzi s konstantními paměťovými nároky
- Typický příklad, kdy je možné použití LCO:
  - procedura musí mít pouze jedno rekurzivní volání: v **posledním cíli poslední klauzule**
  - cíle předcházející tomuto rekurzivnímu volání musí být **deterministické**
  - p( ... ) :- ... % žádné rekurzivní volání v těle klauzule  
p( ... ) :- ... % žádné rekurzivní volání v těle klauzule  
...  
p(...) :- ..., !, p( ... ). % řez zajišťuje determinismus
- Tento typ rekurze lze převést na iteraci

## Cvičení: append/2

```
append( [], S, S ). % (1)
append( [X|S1], S2, [X|S3] ) :- append( S1, S2, S3). % (2)

:- append([1,2],[3,4],A).
| (2)
| A=[1|B]
|
:- append([2],[3,4],B).
| (2)
| B=[2|C] => A=[1,2|C]
|
:- append([], [3,4],C).
| (1)
| C=[3,4] => A=[1,2,3,4],
|
yes
```

## LCO a akumulátor

- Reformulace rekurzivní procedury, aby umožnila LCO
- Výpočet délky seznamu length( Seznam, Delka )  
length( [], 0 ).  
length( [ H | T ], Delka ) :- length( T, Delka0 ), Delka is 1 + Delka0.
- Upravená procedura, tak aby umožnila LCO:  
% length( Seznam, ZapocitanaDelka, CelkovaDelka ):  
% CelkovaDelka = ZapocitanaDelka + ,,počet prvků v Seznam''  
  
length( Seznam, Delka ) :- length( Seznam, 0, Delka ). % pomocný predikát  
length( [], Delka, Delka ). % celková délka = započítaná délka  
length( [ H | T ], A, Delka ) :- A0 is A + 1, length( T, A0, Delka ).
- Přídavný argument se nazývá **akumulátor**



## max\_list s akumulátorem

Výpočet největšího prvku v seznamu `max_list(Seznam, Max)`

`max_list([X], X).`

```
max_list([X|T], Max) :-
    max_list(T, MaxT),
    ( MaxT >= X, !, Max = MaxT
    ;
      Max = X ).
```

---

`max_list([H|T], Max) :- max_list(T, H, Max).`

`max_list([], Max, Max).`

```
max_list([H|T], CastecnyMax, Max) :-
    ( H > CastecnyMax, !,
      max_list(T, H, Max )
    ;
      max_list(T, CastecnyMax, Max) ).
```

## Neefektivita při spojování seznamů

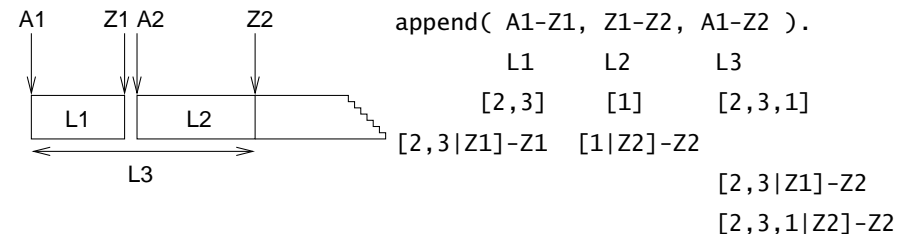
- Sjednocení dvou seznamů
- `append( [], S, S ).`  
`append( [X|S1], S2, [X|S3] ) :- append( S1, S2, S3 ).`
- ?- `append( [2,3], [1], S ).`  
postupné volání cílů:  
`append( [2,3], [1], S ) → append( [3], [1], S' ) → append( [], [1], S'' )`
- Vždy je nutné projít celý první seznam

## Akumulátor jako seznam

- Nalezení seznamu, ve kterém jsou prvky v opačném pořadí `reverse( Seznam, OpacnySeznam )`
  - `reverse( [], [] ).`  
`reverse( [ H | T ], Opacny ) :-`  
`reverse( T, OpacnyT ),`  
`append( OpacnyT, [ H ], Opacny ).`
  - naivní reverse s kvadratickou složitostí
- reverse pomocí akumulátoru s lineární složitostí
  - `reverse( Seznam, Akumulator, Opacny ) :`  
% Opacny obdržíme přidáním prvků ze Seznam do Akumulator v opacnem poradí  
`reverse( Seznam, OpacnySeznam ) :- reverse( Seznam, [], OpacnySeznam).`  
`reverse( [], S, S ).`  
`reverse( [ H | T ], A, Opacny ) :-`  
`reverse( T, [ H | A ], Opacny ).` % přidání H do akumulátoru
  - zpětná konstrukce seznamu (srovnej s předchozí dopřednou konstrukcí, např. `append`)

## Rozdílové seznamy

- Zapamatování konce a připojení na konec: **rozdílové seznamy**
- $[a, b] = L1 - L2 = [a, b | T] - T = [a, b, c | S] - [c | S] = [a, b, c] - [c]$
- Reprezentace prázdného seznamu:  $L - L$



- ?- `append( [2,3|Z1]-Z1, [1|Z2]-Z2, S ).`  
 $S = A1 - Z2 = [2, 3 | Z1] - Z2 = [2, 3 | [1 | Z2] ] - Z2$   
 $Z1 = [1 | Z2] \quad S = [2, 3, 1 | Z2] - Z2$
- Jednotková složitost, oblíbená technika ale není tak flexibilní

## Akumulátor vs. rozdílové seznamy: reverse

```
reverse( [], [] ).
reverse( [ H | T ], Opacny ) :-
    reverse( T, OpacnyT ),
    append( OpacnyT, [ H ], Opacny ).
```

---

```
reverse( Seznam, Opacny ) :- reverse0( Seznam, [], Opacny ).
reverse0( [], S, S ).
reverse0( [ H | T ], A, Opacny ) :-
    reverse0( T, [ H | A ], Opacny ).
```

---

```
reverse( Seznam, Opacny ) :- reverse0( Seznam, Opacny-[] ).
reverse0( [], S-S ).
reverse0( [ H | T ], Opacny-OpacnyKonec ) :-
    reverse0( T, Opacny-[ H | OpacnyKonec ] ).
```

kvadratická složitost

akumulátor (lineární)

rozdílové seznamy

(lineární)

Příklad: operace pro manipulaci s frontou

- test na prázdnot, přidání na konec, odebrání ze začátku

## Vestavěné predikáty

- Predikáty pro řízení běhu programu
  - fail, true, ...
- Různé typy rovností
  - unifikace, aritmetická rovnost, ...
- Databázové operace
  - změna programu (programové databáze) za jeho běhu
- Vstup a výstup
- Všechna řešení programu
- Testování typu termu
  - proměnná?, konstanta?, struktura?, ...
- Konstrukce a dekompozice termu
  - argumenty?, funktor?, ...

## Vestavěné predikáty

## Databázové operace

- Databáze: specifikace množiny relací
- Prologovský program: **programová databáze**, kde jsou relace specifikovány explicitně (fakty) i implicitně (pravidly)
- Vestavěné predikáty pro změnu databáze během provádění programu:
  - assert( Klauzule )      přidání Klauzule do programu
  - asserta( Klauzule )    přidání na začátek
  - assertz( Klauzule )    přidání na konec
  - retract( Klauzule )    smazání klauzule unifikovatelné s Klauzule
- Pozor: nadměrné použití těchto operací snižuje srozumitelnost programu

## Příklad: databázové operace

- **Caching:** odpovědi na dotazy jsou přidány do programové databáze
  - `?- solve( problem, Solution ),`  
`asserta( solve( problem, Solution ) ).`
  - `:- dynamic solve/2.` % nezbytné při použití v SICStus Prologu
- Příklad:

```
uloz_trojice( Seznam1, Seznam2 ) :-
    member( X1, Seznam1 ),
    member( X2, Seznam2 ),
    spocitej_treti( X1, X2, X3 ),
    assertz( trojice( X1, X2, X3 ) ),
    fail.
uloz_trojice( _, _ ) :- !.
```

## Vstup a výstup

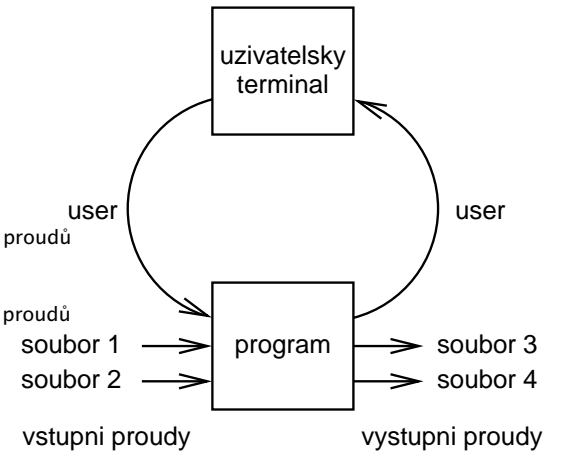
- program může číst data ze **vstupního proudu** (*input stream*)
- program může zapisovat data do **výstupního proudu** (*output stream*)

- dva **aktivní proudy**

- aktivní vstupní proud
- aktivní výstupní proud

- **uživatelský terminál** – user

- datový vstup z terminálu  
chápán jako jeden ze vstupních proudů
- datový výstup na terminál  
chápán jako jeden z výstupních proudů



## Vstupní a výstupní proudy: vestavěné predikáty

- změna (**otevření**) aktivního vstupního/výstupního proudu: `see(S)/tell(S)`

```
cteni( Soubor ) :- see( Soubor ),
                  cteni_ze_souboru( Informace ),
                  see( user ).
```
- **uzavření** aktivního vstupního/výstupního proudu: `seen/told`
- **zjištění** aktivního vstupního/výstupního proudu: `seeing(S)/telling(S)`

```
cteni( Soubor ) :- seeing( StarySoubor ),
                  see( Soubor ),
                  cteni_ze_souboru( Informace ),
                  seen,
                  see( StarySoubor ).
```

## Sekvenční přístup k textovým souborům

- **čtení dalšího termu:** `read(Term)`
    - při čtení jsou termy odděleny tečkou
      - | `?- read(A), read( ahoj(B) ), read( [C,D] ).`
      - |: `ahoj. ahoj( petre ). [ ahoj( 'Petre!' ), jdeme ].`
      - A = ahoj, B = petre, C = ahoj('Petre!'), D = jdeme
    - po dosažení konce souboru je vrácen atom `end_of_file`
  - **zápis dalšího termu:** `write(Term)`
    - ?- `write( ahoj ).`    ?- `write( 'Ahoj Petre!' ).`
- nový řádek na výstup: `n`  
N mezer na výstup: `tab(N)`- **čtení/zápis dalšího znaku:** `get0(Znak), get(NeprazdnyZnak)/put(Znak)`
  - po dosažení konce souboru je vrácena `-1`

## Příklad čtení ze souboru

```
process_file( Soubor ) :-
    seeing( StarySoubor ),      % zjištění aktivního proudu
    see( Soubor ),              % otevření souboru Soubor
    repeat,
        read( Term ),           % čtení termu Term
        process_term( Term ),   % manipulace s termem
        Term == end_of_file,    % je konec souboru?
    !,
    seen,                        % uzavření souboru
    see( StarySoubor ).         % aktivace původního proudu

repeat.                          % opakování
repeat :- repeat.
```

## Všechna řešení

- Backtracking vrací pouze jedno řešení po druhém
- Všechna řešení dostupná najednou: `bagof/3`, `setof/3`, `findall/3`
- `bagof( X, P, S )`: vrátí seznam S, všech objektů X takových, že P je splněno

```
vek( petr, 7 ).
vek( anna, 5 ).
vek( tomas, 5 ).
```

```
?- bagof( Dite, vek( Dite, 5 ), Seznam ).
   Seznam = [ anna, tomas ]
```

- Volné proměnné v cíli P jsou **všeobecně kvantifikovány**

```
?- bagof( Dite, vek( Dite, Vek ), Seznam ).
   Vek = 7, Seznam = [ petr ];
   Vek = 5, Seznam = [ anna, tomas ]
```

## Čtení programu ze souboru

- **Interpretování** kódu programu
  - `?- consult(program).`
  - `?- consult('program.pl').`
  - `?- consult( [program1, 'program2.pl'] ).`
- **Kompilace** kódu programu
  - `?- compile( [program1, 'program2.pl'] ).`
  - `?- [program].`
  - `?- [user].` **zadávaní kódu ze vstupu** ukončené CTRL+D
  - další varianty podobně jako u interpretování
  - typické zrychlení: 5 až 10 krát

## Všechna řešení II.

- Pokud neexistuje řešení `bagof(X,P,S)` neuspěje
- `bagof`: pokud nějaké řešení existuje několikrát, pak S obsahuje duplicity

- `bagof`, `setof`, `findall`:

P je libovolný cíl

```
vek( petr, 7 ).
vek( anna, 5 ).
vek( tomas, 5 ).
```

```
?- bagof( Dite, ( vek( Dite, 5 ), Dite \= anna ), Seznam ).
   Seznam = [ tomas ]
```

- `bagof`, `setof`, `findall`:

na objekty shromažďované v X nejsou žádná omezení

```
?- bagof( Dite-Vek, vek( Dite, Vek ), Seznam ).
   Seznam = [petr-7,anna-5,tomas-5]
```

## Existenční kvantifikátor „ $\exists$ ”

- Přidání **existenčního kvantifikátoru** „ $\exists$ ”  $\Rightarrow$  hodnota proměnné nemá význam

?- bagof( Dite, Vek<sup>^</sup>vek( Dite, Vek ), Seznam ).

Seznam = [petr,anna,tomas]

- Anonymní proměnné jsou všeobecně kvantifikovány, i když jejich hodnota není (jako vždy) vrácena na výstup

?- bagof( Dite, vek( Dite, \_Vek ), Seznam ).

Seznam = [petr] ;

Seznam = [anna,tomas]

- Před operátorem „ $\exists$ ” může být i seznam

?- bagof( Vek ,[Jmeno,Prijmeni]<sup>^</sup>vek( Jmeno, Prijmeni, Vek ), Seznam ).

Seznam = [7,5,5]

## Všechna řešení III.

- setof( X, P, S ): rozdíl od bagof

- S je uspořádaný podle @<

- případné duplicity v S jsou eliminovány

- findall( X, P, S ): rozdíl od bagof

- všechny proměnné jsou existenčně kvantifikovány

?- findall( Dite, vek( Dite, Vek ), Seznam ).

$\Rightarrow$  v S jsou shromažďovány všechny možnosti i pro různá řešení

$\Rightarrow$  findall úspěje přesně jednou

- výsledný seznam může být prázdný  $\Rightarrow$  pokud neexistuje řešení, úspěje a vrátí S = []

- ?- bagof( Dite, vek( Dite, Vek ), Seznam ).

Vek = 7, Seznam = [ petr ];

Vek = 5, Seznam = [ anna, tomas ]

?- findall( Dite, vek( Dite, Vek ), Seznam ).

Seznam = [petr,anna,tomas]

## Testování typu termu

var(X) X je volná proměnná

nonvar(X) X není proměnná

atom(X) X je atom (pavel, 'Pavel Novák', <-->)

integer(X) X je integer

float(X) X je float

atomic(X) X je atom nebo číslo

compound(X) X je struktura

## Určení počtu výskytů prvku v seznamu

count( X, S, N ) :- count( X, S, 0, N ).

count( \_, [], N, N ).

count( X, [X|S], N0, N ) :- !, N1 is N0 + 1, count( X, S, N1, N ).

count( X, [\_|S], N0, N ) :- count( X, S, N0, N ).

:-? count( a, [a,b,a,a], N )                    :-? count( a, [a,b,X,Y], N ).

N=3

N=3

count( \_, [], N, N ).

count( X, [Y|S], N0, N ) :- nonvar(Y), X = Y, !,

N1 is N0 + 1, count( X, S, N1, N ).

count( X, [\_|S], N0, N ) :- count( X, S, N0, N ).



## Cvičení: dekompozice termu

- Napište predikát `substitute( Podterm, Term, Podterm1, Term1)`, který nahradí všechny výskyty `Podterm` v `Term` termem `Podterm1` a výsledek vrátí v `Term1`
- Předpokládejte, že `Term` a `Podterm` jsou termy bez proměnných
- ?- `substitute( sin(x), 2*sin(x)*f(sin(x)), t, F ).`      $F=2*t*f(t)$

## Technika a styl programování v Prologu

- Styl programování v Prologu
  - některá pravidla správného stylu
  - správný vs. špatný styl
  - komentáře
- Ladění
- Efektivita

## Technika a styl programování v Prologu

### Styl programování v Prologu I.

- Cílem stylistických konvencí je
  - redukce nebezpečí programovacích chyb
  - psaní čitelných a srozumitelných programů, které se dobře ladí a modifikují
- Některá pravidla správného stylu
  - krátké klauzule
  - krátké procedury; dlouhé procedury pouze s uniformní strukturou (tabulka)
  - klauzule se základními (hraničními) případy psát před rekurzivními klauzulemi
  - vhodná jména procedur a proměnných
    - nepoužívat seznamy (`[...]`) nebo závorky (`{...}`, `(...)`) pro termy pevné arity
  - vstupní argumenty psát před výstupními
  - **struktura programu – jednotné konvence** v rámci celého programu, např.
    - mezery, prázdné řádky, odsazení
    - klauzule stejné procedury na jednom místě; prázdné řádky mezi klauzulemi; každý cíl na zvláštním řádku

## Správný styl programování

- konstrukce setříděného seznamu Seznam3 ze setříděných seznamů Seznam1, Seznam2: `merge( Seznam1, Seznam2, Seznam3 )`
- `merge( [2,4,7], [1,3,4,8], [1,2,3,4,4,7,8] )`
- `merge( [], Seznam, Seznam ) :-`  
!`.` % prevence redundantních řešení  
`merge( Seznam, [], Seznam ).`
- `merge( [X|Telo1], [Y|Telo2], [X|Telo3] ) :-`  
X < Y, !,  
merge( Telo1, [Y|Telo2], Telo3 ).
- `merge( Seznam1, [Y|Telo2], [Y|Telo3] ) :-`  
merge( Seznam1, Telo2, Telo3 ).

## Špatný styl programování

```
merge( S1, S2, S3 ) :-  
    S1 = [], !, S3 = S2; % první seznam je prázdný  
    S2 = [], !, S3 = S1; % druhý seznam je prázdný  
    S1 = [X|T1],  
    S2 = [Y|T2],  
    ( X < Y, !,  
      Z = X, % Z je hlava seznamu S3  
      merge( T1, S2, T3 );  
      Z = Y,  
      merge( S1, T2, T3) ),  
    S3 = [ Z | T3 ].
```

## Styl programování v Prologu II.

- **Středník „;“** může způsobit nesrozumitelnost klauzule
  - nedávat středník na konec řádku, používat závorky
  - v některých případech: rozdělení klauzule se středníkem do více klauzulí
- Opatrné používání **operátoru řezu**
  - preferovat použití zeleného řezu (nemění deklarativní sémantiku)
  - červený řez používat v jasně definovaných konstruktech  
`negace: P, !, fail; true` \+ P  
alternativy: Podminka, !, Ci11 ; Ci12 Podminka -> Ci11 ; Ci12
- Opatrné používání **negace „\+“**
  - negace jako neúspěch: negace není ekvivalentní negaci v matematické logice
- Pozor na **assert a retract**: snižují transparentnost chování programu

## Dokumentace a komentáře

- co program dělá, jak ho používat (jaký cíl spustit a jaké jsou očekávané výsledky), příklad použití
- které predikáty jsou hlavní (*top-level*)
- jak jsou hlavní koncepty (objekty) reprezentovány
- doba výpočtu a paměťové nároky
- jaké jsou limitace programu
- zda jsou použity nějaké speciální rysy závislé na systému
- jaký je význam predikátů v programu, jaké jsou jejich argumenty, které jsou vstupní a které výstupní (pokud víme)
  - vstupní argumenty „+“, výstupní „-“ `merge( +Seznam1, +Seznam2, -Seznam3 )`
  - `JmenoPredikatu/Arity` `merge/3`
- algoritnické a implementační podrobnosti

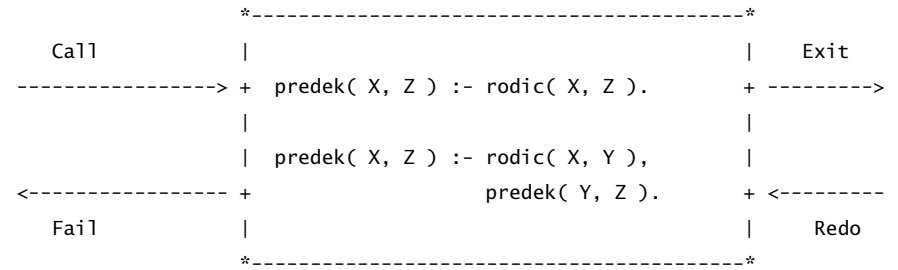


## Ladění

- Přepínače na trasování: `trace/0`, `notrace/0`
- Trasování specifického predikátu: `spy/1`, `nospy/1`
  - `spy( merge/3 )`
- `debug/0`, `nodebug/0`: pro trasování pouze predikátů zadaných `spy/1`
- Libovolná část programu může být spuštěna zadáním vhodného dotazu: **trasování cíle**
  - vstupní informace: jméno predikátu, hodnoty argumentů při volání
  - výstupní informace
    - při úspěchu hodnoty argumentů splňující cíl
    - při neúspěchu indikace chyby
  - nové vyvolání přes `;`: stejný cíl je volán při backtrackingu

## Krabičkový (4-branový) model

- Vizualizace řídicího toku (backtrackingu) na úrovni predikátu
  - `Call`: volání cíle
  - `Exit`: úspěšné ukončení volání cíle
  - `Fail`: volání cíle neuspělo
  - `Redo`: jeden z následujících cílů neuspěl a systém backtrackuje, aby našel alternativy k předchozímu řešení



## Příklad: trasování

```

a(X) :- nonvar(X).
a(X) :- c(X).
a(X) :- d(X).
c(1).
d(2).

*-----*
Call  |                               |      Exit
-----> + a(X) :- nonvar(X). | ----->
          | a(X) :- c(X).      |
<-----+ a(X) :- d(X).      + <-----
Fail  |                               |      Redo
*-----*

| ?- a(X).
|      1      1 Call: a(_463) ?
|      2      2 Call: nonvar(_463) ?
|      2      2 Fail: nonvar(_463) ?
|      3      2 Call: c(_463) ?
|      3      2 Exit: c(1) ?
|      ?      1      1 Exit: a(1) ?
|      X = 1 ? ;
|      1      1 Redo: a(1) ?
|      4      2 Call: d(_463) ?
|      4      2 Exit: d(2) ?
|      1      1 Exit: a(2) ?
|      X = 2 ? ;
|      no
|      % trace
|      | ?-
  
```

## Efektivita

- Čas výpočtu, paměťové nároky, a také časové nároky na vývoj programu
  - u Prologu můžeme častěji narazit na problémy s časem výpočtu a pamětí
  - Prologovské aplikace redukují čas na vývoj
  - vhodnost pro symbolické, nenumernické výpočty se strukturovanými objekty a relacemi mezi nimi
- Pro zvýšení efektivity je nutno se zabývat **procedurálními aspekty**
  - **zlepšení efektivity při prohledávání**
    - odstranění zbytečného backtrackingu
    - zrušení provádění zbytečných alternativ co nejdříve
  - návrh **vhodnějších datových struktur**, které umožní efektivnější operace s objekty

## Zlepšení efektivity: základní techniky

- **Optimalizace posledního volání (LCO) a akumulátory**
- **Rozdílové seznamy** při spojování seznamů
- **Caching**: uložení vypočítaných výsledků do programové databáze
- **Indexace** podle prvního argumentu
  - např. v SICStus Prologu
  - při volání predikátu s prvním nainstancovaným argumentem se používá hašovací tabulka zpřístupňující pouze odpovídající klauzule
  - `zamestnanec( Prijmeni, KrestniJmeno, OddeLeni, ...)`
- **Determinismus**:
  - rozhodnout, které klauzule mají uspět vícekrát, ověřit požadovaný determinismus

## Predikátová logika 1.řádu

## Teorie logického programování

- **PROLOG**: PROgramming in LOGic, část predikátové logiky 1.řádu
  - fakta: `rodic(petr,petrik)`,  $\forall Xa(X)$
  - klauzule:  $\forall X \forall Y \text{rodic}(X,Y) \Rightarrow \text{predek}(X,Y)$
- **Predikátová logika I. řádu (PL1)**
  - soubory objektů: lidé, čísla, body prostoru, ...
  - syntaxe PL1, sémantika PL1, pravdivost a dokazatelnost
- **Rezoluce ve výrokové logice, v PL1**
  - dokazovací metoda
- **Rezoluce v logickém programování**
- **Backtracking, řez, negace vs. rezoluce**

## Predikátová logika I. řádu (PL1)

Abeceda  $\mathcal{A}$  jazyka  $\mathcal{L}$  PL1 se skládá ze symbolů:

- **proměnné**  $X, Y, \dots$  označují libovolný objekt z daného oboru
- **funkční symboly**  $f, g, \dots$  označují operace (příklad:  $+$ ,  $\times$ )
  - **arita** = počet argumentů,  $n$ -ární symbol, značíme  $f/n$
  - nulární funkční symboly – **konstanty**: označují význačné objekty (příklad:  $0, 1, \dots$ )
- **predikátové symboly**  $p, q, \dots$  pro vyjádření vlastností a vztahů mezi objekty
  - **arita** = počet argumentů,  $n$ -ární symbol, značíme  $p/n$      příklad:  $<, \in$
- **logické spojky**  $\wedge, \vee, \neg, \Rightarrow, \equiv$
- **kvantifikátory**  $\forall, \exists$ 
  - logika I. řádu používá **kvantifikaci pouze pro individua** (odlišnost od logik vyššího řádu)
  - v logice I. řádu nelze:  $\forall \mathbb{R} : \forall A \subseteq \mathbb{R}, \forall f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$
- **závorky**:  $),($

# Jazyky PL1

- Specifikace jazyka  $\mathcal{L}$  je definována funkčními a predikátovými symboly  
symboly tedy určují oblast, kterou jazyk popisuje
- **Jazyky s rovností:** obsahují predikátový symbol pro rovnost „=”

## Příklady

- jazyk teorie uspořádání
  - jazyk  $s =$ , binární predikátový symbol  $<$
- jazyk teorie množin
  - jazyk  $s =$ , binární predikátový symbol  $\in$
- jazyk elementární aritmetiky
  - jazyk  $s =$ , nulární funkční symbol  $0$  pro nulu,  
unární funkční symbol  $s$  pro operaci následníka,  
binární funkční symboly pro sčítání  $+$  a násobení  $\times$

# Term, atomická formule, formule

- **Term** nad abecedou  $\mathcal{A}$ 
  - každá proměnná  $z \in \mathcal{A}$  je term
  - je-li  $f/n \in \mathcal{A}$  a  $t_1, \dots, t_n$  jsou termy, pak  $f(t_1, \dots, t_n)$  je také term
  - každý term vznikne konečným počtem užití přechodných kroků  $f(X, g(X, 0))$
- **Atomická formule (atom)** nad abecedou  $\mathcal{A}$ 
  - je-li  $p/n \in \mathcal{A}$  a  $t_1, \dots, t_n$  jsou termy, pak  $p(t_1, \dots, t_n)$  je atomická formule  $f(X) < g(X, 0)$
- **Formule** nad abecedou  $\mathcal{A}$ 
  - každá atomická formule je formule
  - jsou-li  $F$  a  $G$  formule, pak také  $(\neg F)$ ,  $(F \wedge G)$ ,  $(F \vee G)$ ,  $(F \Rightarrow G)$ ,  $(F \equiv G)$  jsou formule
  - je-li  $X$  proměnná a  $F$  formule, pak také  $(\forall X F)$  a  $(\exists X F)$  jsou formule
  - každá formule vznikne konečným počtem užití přechodných kroků  $(\exists X ((f(X) = 0) \wedge p(0)))$

# Interpretace

- **Interpretace**  $\mathcal{I}$  jazyka  $\mathcal{L}$  nad abecedou  $\mathcal{A}$  je dána
  - neprázdnou množinou  $\mathcal{D}$  (také značíme  $|\mathcal{I}|$ , nazývá se **univerzum**) a
  - zobrazením, které
    - každé konstantě  $c \in \mathcal{A}$  přiřadí nějaký **prvek**  $\mathcal{D}$
    - každému funkčnímu symbolu  $f/n \in \mathcal{A}$  přiřadí  $n$ -ární **operaci** nad  $\mathcal{D}$
    - každému predikátovému symbolu  $p/n \in \mathcal{A}$  přiřadí  $n$ -ární **relaci** nad  $\mathcal{D}$
- Příklad: uspořádání na  $\mathbb{R}$ 
  - jazyk: predikátový symbol  $mensi/2$
  - interpretace: univerzum  $\mathbb{R}$ ; zobrazení:  $mensi(x, y) := x < y$
- Příklad: elementární aritmetika nad množinou  $\mathbb{N}$  (včetně 0)
  - jazyk: konstanta  $zero$ , funkční symboly  $s/1$ ,  $plus/2$
  - interpretace:
    - univerzum  $\mathbb{N}$ ; zobrazení:  $zero := 0$ ,  $s(x) := 1 + x$ ,  $plus(x, y) := x + y$

# Sémantika formulí

- **Ohodnocení proměnné**  $\varphi(X)$ : každé proměnné  $X$  je přiřazen prvek  $|\mathcal{I}|$
- **Hodnota termu**  $\varphi(t)$ : každému termu je přiřazen prvek univerza
  - příklad: necht'  $\varphi(X) := 0$   
 $\varphi(plus(s(zero), X)) = \varphi(s(zero)) + \varphi(X) = (1 + \varphi(zero)) + 0 = (1 + 0) + 0 = 1$
- Každá **dobře utvořená formule** označuje **pravdivostní hodnotu** (**PRAVDA**, **NEPRAVDA**) v závislosti na své struktuře a interpretaci
  - Pravdivá formule**  $\mathcal{I} \models_{\varphi} Q$ : formule  $Q$  označena PRAVDA
  - Neravdivá formule**  $\mathcal{I} \not\models_{\varphi} Q$ : formule  $Q$  označena NEPRAVDA
    - příklad:  $p/1$  predikátový symbol, tj.  $p \subseteq |\mathcal{I}|$   $p := \{\langle 1 \rangle, \langle 3 \rangle, \langle 5 \rangle, \dots\}$   
 $\mathcal{I} \models p(zero) \wedge p(s(zero))$  iff  $\mathcal{I} \models p(zero)$  a  $\mathcal{I} \models p(s(zero))$   
iff  $\langle \varphi(zero) \rangle \in p$  a  $\langle \varphi(s(zero)) \rangle \in p$   
iff  $\langle \varphi(zero) \rangle \in p$  a  $\langle (1 + \varphi(zero)) \rangle \in p$   
iff  $\langle 0 \rangle \in p$  a  $\langle 1 \rangle \in p$   
 $\langle 1 \rangle \in p$  ale  $\langle 0 \rangle \notin p$ , tedy formule je neravdivá v  $\mathcal{I}$

## Model

- Interpretace se nazývá **modelem** formule, je-li v ní tato formule pravdivá
  - interpretace množiny  $\mathbb{N}$  s obvyklými operacemi je modelem formule  $(1 + s(0) = s(s(0)))$
  - interpretace, která se liší přiřazením  $s/1: s(x):=x$  není modelem této formule
- **Teorie  $\mathcal{T}$**  jazyka  $\mathcal{L}$  je množina formulí jazyka  $\mathcal{L}$ , tzv. **axiomů**
  - $\neg s(x) = 0$  je jeden z axiomů teorie elementární aritmetiky
- **Model teorie:** libovolná interpretace, která je modelem všech jejích axiomů
  - všechny axiomy teorie musí být v této interpretaci pravdivé
- **Pravdivá formule v teorii  $\mathcal{T} \models F$ :** pravdivá v každém z modelů teorie  $\mathcal{T}$ 
  - říkáme také formule **platí v teorii** nebo je **splněna v teorii**
  - formule  $1 + s(0) = s(s(0))$  je pravdivá v teorii elementárních čísel
- **Logicky pravdivá formule  $\models F$ :** libovolná interpretace je jejím modelem
  - nebo-li  $F$  je pravdivá v každém modelu libovolné teorie
  - formule  $G \vee \neg G$  je logicky pravdivá, formule  $1 + s(0) = s(s(0))$  není logicky pravdivá

## Zkoumání pravdivosti formulí

- Zjištění pravdivosti provádíme důkazem
  - **Důkaz:** libovolná posloupnost  $F_1, \dots, F_n$  formulí jazyka  $\mathcal{L}$ , v níž každé  $F_i$  je buď axiom teorie jazyka  $\mathcal{L}$  nebo lze  $F_i$  odvodit z předchozích  $F_j$  ( $j < i$ ) použitím určitých **odvozovacích pravidel**
- Odvozovací pravidla – příklady
  - **pravidlo modus ponens:** z formulí  $F$  a  $F \Rightarrow G$  lze odvodit  $G$
  - **rezoluční princip:** z formulí  $F \vee A$ ,  $G \vee \neg A$  odvodit  $F \vee G$
- $F$  je **dokazatelná z formulí  $A_1, \dots, A_n$**   $A_1, \dots, A_n \vdash F$ 
  - existuje-li důkaz  $F$  z  $A_1, \dots, A_n$
- Dokazatelné formule v teorii  $\mathcal{T}$  nazýváme **teorémy** teorie  $\mathcal{T}$

## Korektnost a úplnost

- **Uzavřená formule:** neobsahuje volnou proměnnou (bez kvantifikace)
  - $\forall Y ((0 < Y) \wedge (\exists X (X < Y)))$  je uzavřená formule
  - $(\exists X (X < Y))$  není uzavřená formule
- Množina odvozovacích pravidel se nazývá **korektní**, jestliže pro každou množinu uzavřených formulí  $\mathcal{P}$  a každou uzavřenou formuli  $F$  platí:  
$$\text{jestliže } \mathcal{P} \vdash F \text{ pak } \mathcal{P} \models F \quad (\text{jestliže je něco dokazatelné, pak to platí})$$
  
Odvozovací pravidla jsou **úplná**, jestliže  
$$\text{jestliže } \mathcal{P} \models F \text{ pak } \mathcal{P} \vdash F \quad (\text{jestliže něco platí, pak je to dokazatelné})$$
- PL1: úplná a korektní dokazatelnost, tj.  
pro teorii  $\mathcal{T}$  s množinou axiomů  $\mathcal{A}$  platí:  $\mathcal{T} \models F$  **právě když**  $\mathcal{A} \vdash F$

## Rezoluce v predikátové logice I. řádu

## Rezoluce

- rezoluční princip: z  $F \vee A, G \vee \neg A$  odvodit  $F \vee G$
- dokazovací metoda používaná
  - v Prologu
  - ve většině systémů pro automatické dokazování
- procedura pro **vyvrácení**
  - hledáme důkaz pro negaci formule
  - snažíme se dokázat, že negace formule je nespíitelná  
 $\Rightarrow$  formule je vždy pravdivá

## Splnitelnost

- [**Opakování:**] Interpretace  $\mathcal{I}$  jazyka  $\mathcal{L}$  je dána univerzem  $\mathcal{D}$  a zobrazením, které přiřadí konstantě  $c$  prvek  $\mathcal{D}$ , funkčnímu symbolu  $f/n$   $n$ -ární operaci v  $\mathcal{D}$  a predikátovému symbolu  $p/n$   $n$ -ární relaci.
  - příklad:  $F = \{ \{f(a, b) = f(b, a)\}, \{f(f(a, a), b) = a\} \}$   
interpretace  $\mathcal{I}_1$ :  $\mathcal{D} = \mathbb{Z}, a := 1, b := -1, f := "+"$
- Formule je **splnitelná**, existuje-li interpretace, pro kterou je pravdivá
  - formule je konjunkce klauzulí, tj. všechny klauzule musí být v dané interpretaci pravdivé
  - příklad (pokrač.):  $F$  je splnitelná (je pravdivá v  $\mathcal{I}_1$ )
- Formule je **nesplnitelná**, neexistuje-li interpretace, pro kterou je pravdivá
  - tj. formule je ve všech iterpretacích nepravdivá
  - tj. neexistuje interpretace, ve které by byly všechny klauzule pravdivé
  - příklad:  $G = \{ \{p(b)\}, \{p(a)\}, \{\neg p(a)\} \}$  je nespíitelná  
( $\{p(a)\}$  a  $\{\neg p(a)\}$  nemohou být zároveň pravdivé)

## Formule

- **literál**  $l$ 
  - **pozitivní literál** = atomická formule  $p(t_1, \dots, t_n)$
  - **negativní literál** = negace atomické formule  $\neg p(t_1, \dots, t_n)$
- **klauzule**  $C$  = konečná množina literálů reprezentující jejich disjunkci
  - příklad:  $p(X) \vee q(a, f) \vee \neg p(Y)$  notace:  $\{p(X), q(a, f), \neg p(Y)\}$
  - **klauzule je pravdivá**  $\Leftrightarrow$  je pravdivý alespoň jeden z jejích literálů
  - **prázdná klauzule** se značí  $\square$  a je vždy nepravdivá (neexistuje v ní pravdivý literál)
- **formule**  $F$  = množina klauzulí reprezentující jejich konjunkci
  - formule je v tzv. konjunktivní normální formě (konjunkce disjunkcí)
  - příklad:  $(p \vee q) \wedge (\neg p) \wedge (p \vee \neg q \vee r)$  notace:  $\{\{p, q\}, \{\neg p\}, \{p, \neg q, r\}\}$
  - **formule je pravdivá**  $\Leftrightarrow$  všechny klauzule jsou pravdivé
  - prázdná formule je vždy pravdivá (neexistuje klauzule, která by byla nepravdivá)
- **množinová notace**: literál je prvek klauzule, klauzule je prvek formule, ...

## Rezoluční princip ve výrokové logice

- **Rezoluční princip** = pravidlo, které umožňuje odvodit z klauzulí  $C_1 \cup \{l\}$  a  $\{\neg l\} \cup C_2$  klauzuli  $C_1 \cup C_2$

$$\frac{C_1 \cup \{l\} \quad \{\neg l\} \cup C_2}{C_1 \cup C_2}$$

- $C_1 \cup C_2$  se nazývá **rezolventou** původních klauzulí
- příklad:

$$\frac{\{p, r\} \quad \{\neg r, s\}}{\{p, s\}} \quad \frac{(p \vee r) \wedge (\neg r \vee s)}{p \vee s}$$

obě klauzule  $(p \vee r)$  a  $(\neg r \vee s)$  musí být pravdivé protože  $r$  nestačí k pravdivosti obou klauzulí, musí být pravdivé  $p$  (pokud je pravdivé  $\neg r$ ) nebo  $s$  (pokud je pravdivé  $r$ ), tedy platí klauzule  $p \vee s$

## Rezoluční důkaz

- **rezoluční důkaz klauzule  $C$  z formule  $F$**  je konečná posloupnost  $C_1, \dots, C_n = C$  klauzulí taková, že  $C_i$  je buď klauzule z  $F$  nebo rezolventa  $C_j, C_k$  pro  $k, j < i$ .
- příklad: rezoluční důkaz  $\{p\}$  z formule  $F = \{\{p, r\}, \{q, \neg r\}, \{\neg q\}\}$ 
  - $C_1 = \{p, r\}$  klauzule z  $F$
  - $C_2 = \{q, \neg r\}$  klauzule z  $F$
  - $C_3 = \{p, q\}$  rezolventa  $C_1$  a  $C_2$
  - $C_4 = \{\neg q\}$  klauzule z  $F$
  - $C_5 = \{p\} = C$  rezolventa  $C_3$  a  $C_4$

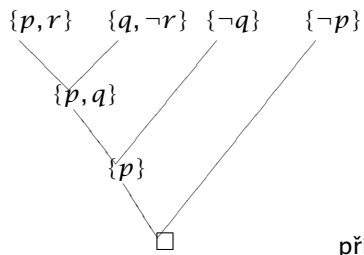
## Rezoluční vyvrácení

- důkaz pravdivosti formule  $F$  spočívá v **demonstraci nesplnitelnosti  $\neg F$** 
  - $\neg F$  nesplnitelná  $\Rightarrow \neg F$  je nepravdivá ve všech interpretacích  $\Rightarrow F$  je vždy pravdivá
- začneme-li z klauzulí reprezentujících  $\neg F$ , musíme postupným uplatňováním rezolučního principu **dospět k prázdné klauzuli  $\square$**
- Příklad:
  - $F \dots \neg a \vee a$
  - $\neg F \dots a \wedge \neg a$
  - $\neg F \dots \{\{a\}, \{\neg a\}\}$
  - $C_1 = \{a\}, C_2 = \{\neg a\}$
  - rezolventa  $C_1$  a  $C_2$  je  $\square$ , tj.  $F$  je vždy pravdivá
- rezoluční důkaz  $\square$  z formule  $G$  se nazývá **rezoluční vyvrácení formule  $G$** 
  - a tedy  $G$  je nepravdivá ve všech interpretacích, tj.  $G$  je nesplnitelná

## Strom rezolučního důkazu

- **strom rezolučního důkazu** klauzule  $C$  z formule  $F$  je binární strom:
  - kořen je označen klauzulí  $C$ ,
  - listy jsou označeny klauzulemi z  $F$  a
  - každý uzel, který není listem,
    - má bezprostředními potomky označené klauzulemi  $C_1$  a  $C_2$
    - je označen rezolventou klauzulí  $C_1$  a  $C_2$

- příklad:  $F = \{\{p, r\}, \{q, \neg r\}, \{\neg q\}, \{\neg p\}\}$       $C = \square$



strom rezolučního vyvrácení  
(rezoluční důkaz  $\square$  z  $F$ )

příklad:  $\{\{p, r\}, \{q, \neg r\}, \{\neg q\}, \{\neg p, t\}, \{\neg s\}, \{s, \neg t\}\}$

## Substituce

- **co s proměnnými? vhodná substituce a unifikace**
  - $f(X, a, g(Y)) < 1, f(h(c), a, Z) < 1, \quad X = h(c), Z = g(Y) \Rightarrow f(h(c), a, g(Y)) < 1$
- **substituce** je libovolná funkce  $\theta$  zobrazující výrazy do výrazů tak, že platí
  - $\theta(E) = E$  pro libovolnou konstantu  $E$
  - $\theta(f(E_1, \dots, E_n)) = f(\theta(E_1), \dots, \theta(E_n))$  pro libovolný funkční symbol  $f$
  - $\theta(p(E_1, \dots, E_n)) = p(\theta(E_1), \dots, \theta(E_n))$  pro libovolný predik. symbol  $p$
- **substituce** je tedy homomorfismus výrazů, který **zachová vše kromě proměnných** – ty lze nahradit čímkoliv
- substituce zapisujeme zpravidla ve tvaru seznamu  $[X_1/\xi_1, \dots, X_n/\xi_n]$  kde  $X_i$  jsou proměnné a  $\xi_i$  substituované termy
  - příklad:  $p(X)[X/f(a)] \equiv p(f(a))$
- **přejmenování proměnných**: speciální náhrada proměnných proměnnými
  - příklad:  $p(X)[X/Y] \equiv p(Y)$

## Unifikace

- Ztotožnění dvou literálů  $p, q$  pomocí vhodné substituce  $\sigma$  takové, že  $p\sigma = q\sigma$  nazýváme **unifikací** a příslušnou substituci **unifikátorem**.

- **Unifikátorem** množiny  $S$  literálů nazýváme substituce  $\theta$  takovou, že množina

$$S\theta = \{t\theta | t \in S\}$$

má jediný prvek.

- příklad:  $S = \{ \text{datum}(D1, M1, 2003), \text{datum}(1, M2, Y2) \}$   
unifikátor  $\theta = [D1/1, M1/2, M2/2, Y2/2003]$   $S\theta = \{ \text{datum}(1, 2, 2003) \}$

- Unifikátor  $\sigma$  množiny  $S$  nazýváme **nejobecnějším unifikátorem (mgu - most general unifier)**, jestliže pro libovolný unifikátor  $\theta$  existuje substituce  $\lambda$  taková, že  $\theta = \sigma\lambda$ .

- příklad (pokrač.): nejobecnější unifikátor  $\sigma = [D1/1, Y2/2003, M1/M2], \lambda = [M2/2]$

## Rezoluční princip v PL1

- základ:

$$\frac{C_1 \cup \{I\} \quad \{\neg I\} \cup C_2}{C_1 \cup C_2}$$

- substituce, unifikátor, nejobecnější unifikátor

- **rezoluční princip v PL1** je pravidlo, které

- připraví příležitost pro uplatnění vlastního rezolučního pravidla nalezením vhodného unifikátoru

- provede rezoluci a získá rezolventu

$$\frac{C_1 \cup \{A\} \quad \{\neg B\} \cup C_2}{C_1\rho\sigma \cup C_2\sigma}$$

- kde  $\rho$  je přejmenováním proměnných takové, že klauzule  $(C_1 \cup A)\rho$  a  $\{B\} \cup C_2$  nemají společné proměnné
- $\sigma$  je nejobecnější unifikátor klauzulí  $A\rho$  a  $B$

## Příklad: rezoluce v PL1

- příklad:  $C_1 = \{p(X, Y), q(Y)\}$   $C_2 = \{\neg q(a), s(X, W)\}$

- přejmenování proměnných:  $\rho = [X/Z]$

$$C_1 = \{p(Z, Y), q(Y)\} \quad C_2 = \{\neg q(a), s(X, W)\}$$

- nejobecnější unifikátor:  $\sigma = [Y/a]$

$$C_1 = \{p(Z, a), q(a)\} \quad C_2 = \{\neg q(a), s(X, W)\}$$

- rezoluční princip:  $C = \{p(Z, a), s(X, W)\}$

- vyzkoušejte si:

$$C_1 = \{q(X), \neg r(Y), p(X, Y), p(f(Z), f(Z))\}$$

$$C_2 = \{n(Y), \neg r(W), \neg p(f(W), f(W))\}$$

## Rezoluce v PL1

- **Obecný rezoluční princip v PL1**

$$\frac{C_1 \cup \{A_1, \dots, A_m\} \quad \{\neg B_1, \dots, \neg B_n\} \cup C_2}{C_1\rho\sigma \cup C_2\sigma}$$

- kde  $\rho$  je přejmenováním proměnných takové, že množiny klauzulí  $\{A_1\rho, \dots, A_m\rho, C_1\rho\}$  a  $\{B_1, \dots, B_n, C_2\}$  nemají společné proměnné

- $\sigma$  je nejobecnější unifikátor množiny  $\{A_1\rho, \dots, A_m\rho, B_1, \dots, B_n\}$

- příklad:  $A_1 = a(X)$  vs.  $\{\neg B_1, \neg B_2\} = \{\neg a(b), \neg a(Z)\}$

v jednom kroku potřebují vyrezolovat zároveň  $B_1$  i  $B_2$

- Rezoluce v PL1

- **korektní:** jestliže existuje rezoluční vyvrácení  $F$ , pak  $F$  je nesplnitelná

- **úplná:** jestliže  $F$  je nesplnitelná, pak existuje rezoluční vyvrácení  $F$

## Zefektivnění rezoluce

- rezoluce je intuitivně efektivnější než axiomatické systémy
  - axiomatické systémy: který z axiomů a pravidel použít?
  - rezoluce: pouze jedno pravidlo
- stále ale příliš mnoho možností, jak hledat důkaz v prohledávacím prostoru
- problém SAT =  $\{S \mid S \text{ je splnitelná}\}$  NP úplný, nicméně: menší prohledávací prostor vede k rychlejšímu nalezení řešení
- strategie pro zefektivnění prohledávání  $\Rightarrow$  varianty rezoluční metody
- vylepšení prohledávání
  - zastavit prohledávání cest, které nejsou slibné
  - specifikace pořadí, jak procházíme alternativními cestami

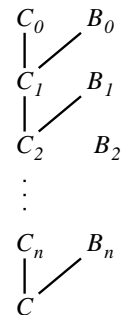
## Varianty rezoluční metody

- Věta:** Každé omezení rezoluce je korektní.
  - stále víme, že to, co jsme dokázali, platí
- T-rezoluce:** klauzule účastníci se rezoluce nejsou tautologie úplná
  - tautologie nepomůže ukázat, že formule je nespílitelná
- sémantická rezoluce:** úplná
  - zvolíme libovolnou interpretaci a pro rezoluci používáme jen takové klauzule, z nichž alespoň jedna je v této interpretaci nepravdivá
  - pokud jsou obě klauzule pravdivé, těžko odvodíme nespílitelnost formule
- vstupní (input) rezoluce:** neúplná
  - alespoň jedna z klauzulí, použitá při rezoluci, je z výchozí vstupní množiny  $S$
  - $\{\{p, q\}, \{\neg p, q\}, \{p, \neg q\}, \{\neg p, \neg q\}\}$  existuje rezoluční vyvrácení
  - neexistuje rezoluční vyvrácení pomocí vstupní rezoluce

## Rezoluce a logické programování

### Lineární rezoluce

- varianta rezoluční metody
  - snaha o generování lineární posloupnosti místo stromu
  - v každém kroku kromě prvního můžeme použít bezprostředně předcházející rezolventu a k tomu buď některou z klauzulí vstupní množiny  $S$  nebo některou z předcházejících rezolvent
- lineární rezoluční důkaz  $C$  z  $S$**  je posloupnost dvojic  $\langle C_0, B_0 \rangle, \dots, \langle C_n, B_n \rangle$  taková, že  $C = C_{n+1}$  a
  - $C_0$  a každá  $B_i$  jsou prvky  $S$  nebo některé  $C_j, j < i$
  - každá  $C_{i+1}, i \leq n$  je rezolventa  $C_i$  a  $B_i$
- lineární vyvrácení  $S$**  = lineární rezoluční důkaz  $\square$  z  $S$





## Lineární rezoluce II.

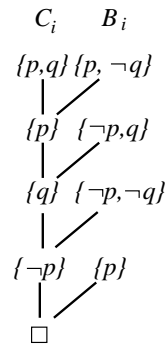
- příklad:  $S = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$

$$\begin{aligned} A_1 &= \{p, q\} \\ A_2 &= \{p, \neg q\} \\ A_3 &= \{\neg p, q\} \\ A_4 &= \{\neg p, \neg q\} \end{aligned}$$

- $S$ : vstupní množina klauzulí

- $C_i$ : střední klauzule

- $B_i$ : boční klauzule



## Prologovská notace

- Klauzule v matematické logice

$$\{H_1, \dots, H_m, \neg T_1, \dots, \neg T_n\} \quad H_1 \vee \dots \vee H_m \vee \neg T_1 \vee \dots \vee \neg T_n$$

- Hornova klauzule: nejvýše jeden pozitivní literál

$$\{H, \neg T_1, \dots, \neg T_n\} \quad \{H\} \quad \{\neg T_1, \dots, \neg T_n\}$$

$$\{H \vee \neg T_1 \vee \dots \vee \neg T_n\} \quad H \quad \neg T_1 \vee \dots \vee \neg T_n$$

- Pravidlo: jeden pozitivní a alespoň jeden negativní literál

$$\text{Prolog: } H : \neg T_1, \dots, T_n. \quad \text{Matematická logika: } H \Leftarrow T_1 \wedge \dots \wedge T_n$$

$$\{H \Leftarrow T \quad H \vee \neg T \quad H \vee \neg T_1 \vee \dots \vee \neg T_n \quad \text{Klauzule: } \{H, \neg T_1, \dots, \neg T_n\}$$

- Fakt: pouze jeden pozitivní literál

$$\text{Prolog: } H. \quad \text{Matematická logika: } H \quad \text{Klauzule: } \{H\}$$

- Cílová klauzule: žádný pozitivní literál

$$\text{Prolog: } :- T_1, \dots, T_n. \quad \text{Matematická logika: } \neg T_1 \vee \dots \vee \neg T_n \quad \text{Klauzule: } \{\neg T_1, \dots, \neg T_n\}$$

## Logický program

- Programová klauzule: právě jeden pozitivní literál (fakt nebo pravidlo)

- Logický program: konečná množina programových klauzulí

- Příklad:

- logický program jako množina klauzulí:

$$P = \{P_1, P_2, P_3\}$$

$$P_1 = \{p\}, \quad P_2 = \{p, \neg q\}, \quad P_3 = \{q\}$$

- logický program v prologovské notaci:

$$p.$$

$$p :- q.$$

$$q.$$

- cílová klauzule:  $G = \{\neg q, \neg p\} \quad :- \neg q, p.$

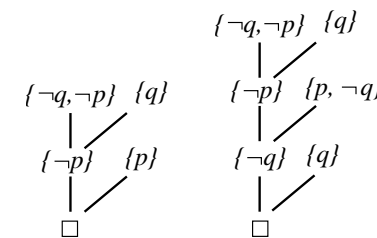
## Lineární rezoluce pro Hornovy klauzule

- Začneme s cílovou klauzulí:  $C_0 = G$

- Boční klauzule vybíráme z programových klauzulí  $P$

$$G = \{\neg q, \neg p\} \quad P = \{P_1, P_2, P_3\} : \quad P_1 = \{p\}, \quad P_2 = \{p, \neg q\}, \quad P_3 = \{q\}$$

$$:- \neg q, p. \quad p. \quad p :- q, \quad q.$$



- Střední klauzule jsou cílové klauzule

## Lineární vstupní rezoluce

- **Vstupní rezoluce na  $P \cup \{G\}$** 
  - (opakování:) alespoň jedna z klauzulí použitá při rezoluci je z výchozí vstupní množiny
  - začneme s cílovou klauzulí:  $C_0 = G$
  - boční klauzule jsou vždy z  $P$  (tj. jsou to programové klauzule)
- (Opakování:) **Lineární rezoluční důkaz  $C$  z  $P$**  je posloupnost dvojic  $\langle C_0, B_0 \rangle, \dots, \langle C_n, B_n \rangle$  taková, že  $C = C_{n+1}$  a
  - $C_0$  a každá  $B_i$  jsou prvky  $P$  nebo některé  $C_j, j < i$
  - každá  $C_{i+1}, i \leq n$  je rezolventa  $C_i$  a  $B_i$
- **Lineární vstupní (Linear Input) rezoluce (LI-rezoluce)  $C$  z  $P \cup \{G\}$**  posloupnost dvojic  $\langle C_0, B_0 \rangle, \dots, \langle C_n, B_n \rangle$  taková, že  $C = C_{n+1}$  a
  - $C_0 = G$  a každá  $B_i$  jsou prvky  $P$  lineární rezoluce + vstupní rezoluce
  - každá  $C_{i+1}, i \leq n$  je rezolventa  $C_i$  a  $B_i$

## Korektnost a úplnost

- **Věta:** Množina  $S$  Hornových klauzulí je nesplnitelná, právě když existuje rezoluční vyvrácení  $S$  pomocí vstupní rezoluce.
- **Korektnost** platí stejně jako pro ostatní omezení rezoluce
- **Úplnost LI-rezoluce pro Hornovy klauzule:**  
Necht'  $P$  je množina programových klauzulí a  $G$  cílová klauzule.  
Je-li množina  $P \cup \{G\}$  Hornových klauzulí nesplnitelná, pak existuje rezoluční vyvrácení  $P \cup \{G\}$  pomocí LI-rezoluce.
  - vstupní rezoluce pro (obecnou) formuli sama o sobě není úplná  
 $\Rightarrow$  LI-rezoluce aplikovaná na (obecnou) formuli nezaručuje, že nalezeneme důkaz, i když formule platí!
- **Význam LI-rezoluce pro Hornovy klauzule:**
  - $P = \{P_1, \dots, P_n\}, G = \{G_1, \dots, G_m\}$
  - LI-rezolucí ukážeme nesplnitelnost  $P_1 \wedge \dots \wedge P_n \wedge (\neg G_1 \vee \dots \vee \neg G_m)$
  - pokud tedy předpokládáme, že program  $\{P_1, \dots, P_n\}$  platí, tak musí být nepravdivá  $(\neg G_1 \vee \dots \vee \neg G_m)$ , tj. musí platit  $G_1 \wedge \dots \wedge G_m$

## Cíle a fakta při lineární rezoluci

- **Věta:** Je-li  $S$  nesplnitelná množina Hornových klauzulí, pak  $S$  obsahuje alespoň jeden cíl a jeden fakt.
  - pokud nepoužiji cíl, mám pouze fakta (1 pozit.literál) a pravidla (1 pozit.literál a alespoň jeden negat. literál), při rezoluci mi stále zůstává alespoň jeden pozit. literál
  - pokud nepoužiji fakt, mám pouze cíle (negat.literály) a pravidla (1 pozit.literál a alespoň jeden negat. literál), v rezolventě mi stále zůstávají negativní literály
- **Věta:** Existuje-li rezoluční důkaz prázdné množiny z množiny  $S$  Hornových klauzulí, pak tento rezoluční strom má v listech jedinou cílovou klauzuli.
  - pokud začnu důkaz pravidlem a faktem, pak dostanu zase pravidlo
  - pokud začnu důkaz dvěma pravidly, pak dostanu zase pravidlo
  - na dvou faktech rezolovat nelze  
 $\Rightarrow$  dokud nepoužiji cíl pracuji stále s množinou faktů a pravidel
  - pokud použiji v důkazu cílovou klauzuli, fakta mi ubírají negat.literály, pravidla mi je přidávají, v rezolventě mám stále samé negativní literály, tj. nelze rezolovat s dalším cílem

## Uspořádané klauzule (*definite clauses*)

- Klauzule = množina literálů
- **Uspořádaná klauzule (*definite clause*) = posloupnost literálů**
  - nelze volně měnit pořadí literálů
- **Rezoluční princip pro uspořádané klauzule:**

$$\frac{\{\neg A_0, \dots, \neg A_n\} \quad \{B, \neg B_0, \dots, \neg B_m\}}{\{\neg A_0, \dots, \neg A_{i-1}, \neg B_0\rho, \dots, \neg B_m\rho, \neg A_{i+1}, \dots, \neg A_n\}\sigma}$$
  - **uspořádaná rezolventa:**  $\{\neg A_0, \dots, \neg A_{i-1}, \neg B_0\rho, \dots, \neg B_m\rho, \neg A_{i+1}, \dots, \neg A_n\}\sigma$
  - $\rho$  je přejmenování proměnných takové, že klauzule  $\{A_0, \dots, A_n\}$  a  $\{B, B_0, \dots, B_m\}$  nemají společně proměnné
  - $\sigma$  je nejobecnější unifikátor pro  $A_i$  a  $B\rho$
  - **rezoluce je realizována na literálech  $\neg A_i\sigma$  a  $B\rho\sigma$**
  - je dodržováno pořadí literálů, tj.  
 $\{\neg B_0\rho, \dots, \neg B_m\rho\}\sigma$  jde do uspořádané rezolventy přesně na pozici  $\neg A_i\sigma$

## Uspořádané klauzule II.

- Uspořádané klauzule

$$\frac{\{\neg A_0, \dots, \neg A_n\} \quad \{B, \neg B_0, \dots, \neg B_m\}}{\{\neg A_0, \dots, \neg A_{i-1}, \neg B_0\rho, \dots, \neg B_m\rho, \neg A_{i+1}, \dots, \neg A_n\}\sigma}$$

Hornovy klauzule

$$\frac{: \neg A_0, \dots, A_n. \quad B : \neg B_0, \dots, B_m.}{: \neg(A_0, \dots, A_{i-1}, B_0\rho, \dots, B_m\rho, A_{i+1}, \dots, A_n)\sigma.}$$

- Příklad:

$$\frac{\{\neg s(X), \neg t(1), \neg u(X)\} \quad \{t(Z), \neg q(Z, X), \neg r(3)\}}{\{\neg s(X), \neg q(1, A), \neg r(3), \neg u(X)\}}$$

$$\frac{: \neg s(X), t(1), u(X). \quad t(Z) : \neg q(Z, X), r(3).}{: \neg s(X), q(1, A), r(3), u(X).}$$

$$\rho = [X/A] \quad \sigma = [Z/1]$$

## LD-rezoluce

- LD-rezoluční vyvrácení** množiny uspořádaných klauzulí  $P \cup \{G\}$  je posloupnost  $\langle G_0, C_0 \rangle, \dots, \langle G_n, C_n \rangle$  taková, že

- $G_i, C_i$  jsou uspořádané klauzule
- $G = G_0$
- $G_{n+1} = \square$
- $G_i$  je uspořádaná cílová klauzule
- $C_i$  je přejmenování klauzule z  $P$ 
  - $C_i$  neobsahuje proměnné, které jsou v  $G_j, j \leq i$  nebo v  $C_k, k \leq i$
- $G_{i+1}, 0 \leq i \leq n$  je uspořádaná rezolventa  $G_i$  a  $C_i$

- LD-rezoluce: korektní a úplná

## SLD-rezoluce

- Lineární rezoluce se selekčním pravidlem** = SLD-rezoluce (*Selected Linear resolution for Definite clauses*)

- rezoluce
- Selekční pravidlo**
- Lineární rezoluce**
- Definite** (uspořádané) klauzule
- vstupní rezoluce

- Selekční pravidlo**  $R$  je funkce, která každé neprázdné klauzuli  $C$  přiřazuje nějaký z jejích literálů  $R(C) \in C$

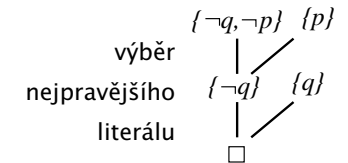
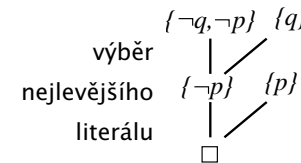
- při rezoluci vybírám z klauzule literál určený selekčním pravidlem

- Pokud se  $R$  neuvádí, pak se předpokládá výběr **nejlevějšího literálu**

- nejlevější literál vybírá i Prolog

## Lineární rezoluce se selekčním pravidlem

- $P = \{\{p\}, \{p, \neg q\}, \{q\}\}, \quad G = \{\neg q, \neg p\}$



- SLD-rezoluční vyvrácení**  $P \cup \{G\}$  pomocí selekčního pravidla  $R$  je LD-rezoluční vyvrácení  $\langle G_0, C_0 \rangle, \dots, \langle G_n, C_n \rangle$  takové, že  $G = G_0, G_{n+1} = \square$  a  $R(G_i)$  je literál rezolvovaný v kroku  $i$

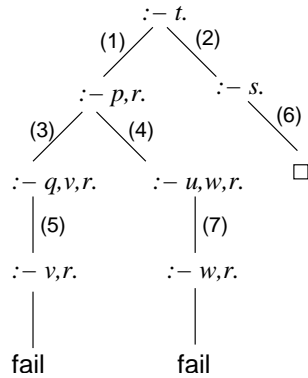
- SLD-rezoluce – korektní, úplná

- Efektivita SLD-rezoluce je závislá na

- selekčním pravidle  $R$
- způsobu výběru příslušné programové klauzule pro tvorbu rezolventy
  - v Prologu se vybírá vždy klauzule, která je v programu první

## Příklad: SLD-strom

- (1)  $t :- p, r.$
- (2)  $t :- s.$
- (3)  $p :- q, v.$
- (4)  $p :- u, w.$
- (5)  $q.$
- (6)  $s.$
- (7)  $u.$
- $:- t.$

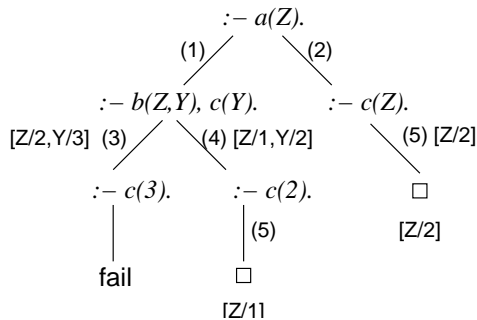


## Strom výpočtu (SLD-strom)

- **SLD-strom** je strom tvořený všemi možnými výpočetními posloupnostmi logického programu  $P$  vzhledem k cíli  $G$
- kořeny stromy jsou programové klauzule a cílová klauzule  $G$
- v uzlech jsou rezolventy
- výchozím kořenem rezoluce je cílová klauzule  $G$
- listy jsou dvojího druhu:
  - označené prázdnou klauzulí - jedná se o **úspěšné uzly** (*success nodes*)
  - označené neprázdnou klauzulí - jedná se o **neúspěšné uzly** (*failure nodes*)
- úplnost SLD-rezoluce zaručuje **existenci** cesty od kořene k úspěšnému uzlu pro každý možný výsledek příslušející cíli  $G$

## Příklad: SLD-strom a výsledná substituce

- $:- a(Z).$
- (1)  $a(X) :- b(X, Y), c(Y).$
- (2)  $a(X) :- c(X).$
- (3)  $b(2, 3).$
- (4)  $b(1, 2).$
- (5)  $c(2).$

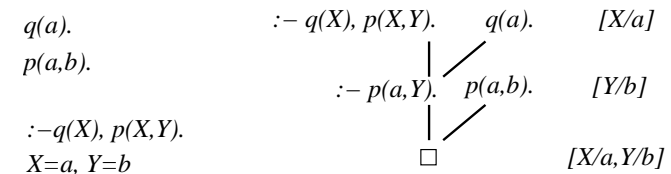


Cvičení:

- $p(B) :- q(A, B), r(B).$
- $p(A) :- q(A, A).$
- $q(a, a).$
- $q(a, b).$
- $r(b).$

ve výsledné substituci jsou pouze proměnné z dotazu  
výsledné substituce jsou  $[Z/1]$  a  $[Z/2]$   
nezajímá mě substituce  $[Y/2]$

## Výsledná substituce (*answer substitution*)



- Každý krok SLD-rezoluce vytváří novou unifikační substituci  $\theta_i$   
 $\Rightarrow$  potenciální instanciaci proměnné ve vstupní cílové klauzulí
- **Výsledná substituce** (*answer substitution*)

$$\theta = \theta_0 \theta_1 \cdots \theta_n$$

složení unifikací

## Význam SLD-rezolučního vyvrácení $P \cup \{G\}$

- Množina  $P$  programových klauzulí, cílová klauzule  $G$
- Dokazujeme nespelnitelnost**
  - $P \wedge (\forall \vec{X})(\neg G_1(\vec{X}) \vee \neg G_2(\vec{X}) \vee \dots \vee \neg G_n(\vec{X}))$   
kde  $G = \{\neg G_1, \neg G_2, \dots, \neg G_n\}$  a  $\vec{X}$  je vektor proměnných v  $G$   
nespelnitelnost (1) je ekvivalentní tvrzení (2) a (3)
  - $P \vdash \neg G$
  - $P \vdash (\exists \vec{X})(G_1(\vec{X}) \wedge \dots \wedge G_n(\vec{X}))$

a jedná se tak o **důkaz existence vhodných objektů**, které na základě vlastností množiny  $P$  splňují konjunkci literálů v cílové klauzuli
- Důkaz nespelnitelnosti  $P \cup \{G\}$  znamená **nalezení protipříkladu**  
ten pomocí SLD-stromu **konstruuje termy (odpověď)** splňující konjunkci v (3)

## SLD-rezoluce v Prologu: úplnost

- Prolog**: prohledávání stromu do hloubky  
⇒ **neúplnost** použité výpočetní strategie
- Implementace SLD-rezoluce v Prologu

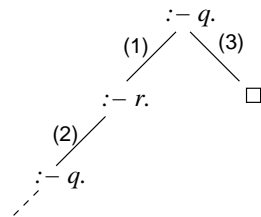
- není úplná**

logický program:  $q : -r.$  (1)

$r : -q.$  (2)

$q.$  (3)

dotaz:  $:-q.$



## Výpočetní strategie

- Korektní výpočetní strategie** prohledávání stromu výpočtu musí zaručit, že se každý (konečný) výsledek nalézt v konečném čase
- Korektní výpočetní strategie = **prohledávání stromu do šířky**
  - exponenciální paměťová náročnost
  - složité řídicí struktury
- Použitelná výpočetní strategie = **prohledávání stromu do hloubky**
  - jednoduché řídicí struktury (zásobník)
  - lineární paměťová náročnost
  - není ale úplná**: nenalezne vyvrácení i když existuje
    - procházení nekonečné větve stromu výpočtu  
⇒ na nekonečných stromech dojde k zacyklení
    - nedostaneme se tak na jiné existující úspěšné uzly

## Test výskytu

- Kontrola, zda se proměnná vyskytuje v termu, kterým ji substituujeme
  - dotaz:  $-a(B, B).$
  - logický program:  $a(X, f(X)).$
  - vede k:  $[B/X], [X/f(X)]$
- Unifikátor pro  $g(X_1, \dots, X_n)$  a  $g(f(X_0, X_0), f(X_1, X_1), \dots, f(X_{n-1}, X_{n-1}))$   
 $X_1 = f(X_0, X_0), \quad X_2 = f(X_1, X_1), \dots, \quad X_n = f(X_{n-1}, X_{n-1})$   
 $X_2 = f(f(X_0, X_0), f(X_0, X_0)), \dots$

délka termu pro  $X_k$  exponenciálně narůstá

⇒ **exponenciální složitost** na ověření kontroly výskytu

- Test výskytu se **při unifikaci v Prologu neprovádí**
- Důsledek:  $? - X = f(X)$  uspěje s  $X = f(f(f(f(f(f(f(f(f(...))))))))))$

# SLD-rezoluce v Prologu: korektnost

- Implementace SLD-rezoluce v Prologu nepoužívá při unifikaci test výskytu

⇒ není korektní

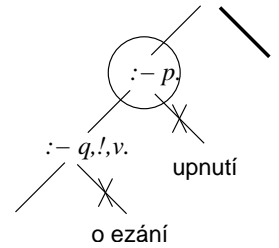
- (1)  $t(X) :- p(X, X). \quad :- t(X).$   
 $p(X, f(X)). \quad X = f(f(f(f(...))))$  problém se projeví
- (2)  $t :- p(X, X). \quad :- t.$   
 $p(X, f(X)). \quad \text{yes}$  dokazovací systém nehledá unifikátor pro  $X$  a  $f(X)$

- Řešení: problém typu (2) převést na problém typu (1) ?

- každá proměnná v hlavě klauzule se objeví i v těle, aby se vynutilo hledání unifikátoru (přidáme  $X = X$  pro každou  $X$ , která se vyskytuje pouze v hlavě)
- $t :- p(X, X).$   
 $p(X, f(X)) :- X = X.$
- optimalizace v kompilátoru mohou způsobit opět 'yes'

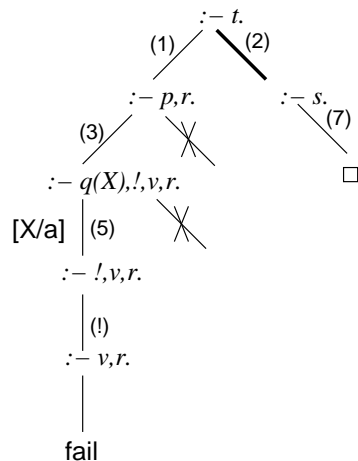
# Řízení implementace: řez

- nemá ale žádnou deklarativní sémantiku
- místo toho **mění implementaci programu**
- $p :- q, !, v.$
- snážíme se splnit  $q$
- řez se syntakticky chová jako kterýkoliv jiný literál
- pokud uspějí ⇒ přeskočím řez a pokračuji jako by tam řez nebyl
- pokud ale **neuspějí (a tedy i při backtrackingu) a vracím se přes řez** ⇒ **vracím se až na rodiče**  $:- p.$  a zkusím další větev
- ⇒ nezkouším tedy další možnosti, jak splnit  $p$
- ⇒ a nezkouším ani další možnosti, jak splnit  $q$  v SLD-stromu



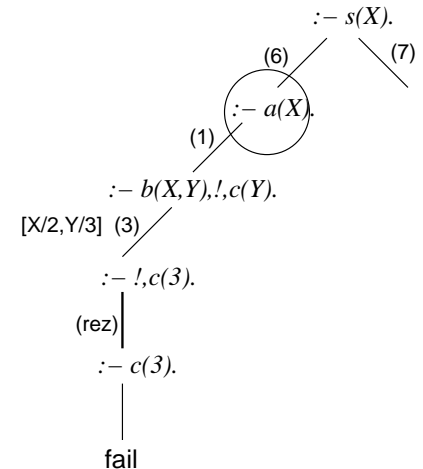
## Příklad: řez

- $t :- p, r.$  (1)  
 $t :- s.$  (2)  
 $p :- q(X), !, v.$  (3)  
 $p :- u, w.$  (4)  
 $q(a).$  (5)  
 $q(b).$  (6)  
 $s.$  (7)  
 $u.$  (8)



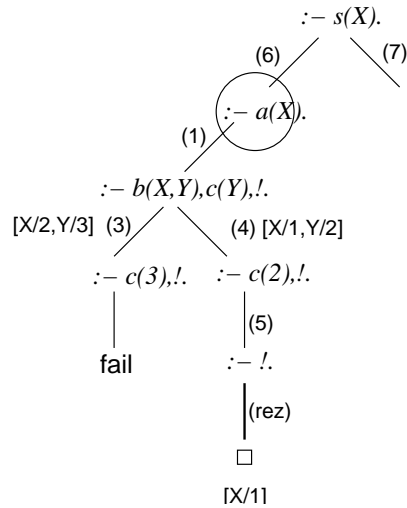
## Příklad: řez II

- $a(X) :- b(X, Y), !, c(Y).$  (1)  
 $a(X) :- c(X).$  (2)  
 $b(2, 3).$  (3)  
 $b(1, 2).$  (4)  
 $c(2).$  (5)  
 $s(X) :- a(X).$  (6)  
 $s(X) :- p(X).$  (7)  
 $p(B) :- q(A, B), r(B).$  (8)  
 $p(A) :- q(A, A).$  (9)  
 $q(a, a).$  (10)  
 $q(a, b).$  (11)  
 $r(b).$  (12)



## Příklad: řez III

- $a(X) : -b(X, Y), c(Y), !.$  (1)
- $a(X) : -c(X).$  (2)
- $b(2, 3).$  (3)
- $b(1, 2).$  (4)
- $c(2).$  (5)
- $s(X) : -a(X).$  (6)
- $s(X) : -p(X).$  (7)
- $p(B) : -q(A, B), r(B).$  (8)
- $p(A) : -q(A, A).$  (9)
- $q(a, a).$  (10)
- $q(a, b).$  (11)
- $r(b).$  (12)



## Operační a deklarativní semantika

## Operační sémantika

- **Operační sémantikou** logického programu  $P$  rozumíme množinu  $O(P)$  všech atomických formulí bez proměnných, které lze pro nějaký cíl  $G^1$  odvodit nějakým rezolučním důkazem ze vstupní množiny  $P \cup \{G\}$ .

<sup>1</sup>tímto výrazem jsou míněny všechny cíle, pro něž zmíněný rezoluční důkaz existuje.

- **Deklarativní sémantika** logického programu  $P$  ???

## Opakování: interpretace

- **Interpretace**  $I$  jazyka  $\mathcal{L}$  je dána univerzem  $\mathcal{D}$  a zobrazením, které přiřadí konstantě  $c$  prvek  $\mathcal{D}$ , funkčnímu symbolu  $f/n$   $n$ -ární operaci v  $\mathcal{D}$  a predikátovému symbolu  $p/n$   $n$ -ární relaci.
  - příklad:  $F = \{\{f(a, b) = f(b, a)\}, \{f(f(a, a), b) = a\}\}$   
interpretace  $I_1$ :  $\mathcal{D} = \mathbb{Z}, a := 1, b := -1, f := "+"$
- Interpretace se nazývá **modelem** formule, je-li v ní tato formule pravdivá
  - interpretace množiny  $\mathbb{N}$  s obvyklými operacemi je modelem formule  $(0 + s(0) = s(0))$

## Herbrandovy interpretace

- Omezení na obor skládající se ze **symbolických výrazů tvořených z predikátových a funkčních symbolů daného jazyka**
  - při zkoumání pravdivosti není nutné uvažovat modely nad všemi interpretacemi
- **Herbrandovo univerzum**: množina všech termů bez proměnných, které mohou být tvořeny funkčními symboly a konstantami daného jazyka
- **Herbrandova interpretace**: libovolná interpretace, která přiřazuje
  - proměnným prvky Herbrandova univerza
  - konstantám sebe samé
  - funkčním symbolům funkce, které symbolu  $f$  pro argumenty  $t_1, \dots, t_n$  přiřadí term  $f(t_1, \dots, t_n)$
  - predikátovým symbolům libovolnou funkci z Herbrand. univerza do pravdivostních hodnot
- **Herbrandův model** množiny uzavřených formulí  $\mathcal{P}$ :  
Herbrandova interpretace taková, že každá formule z  $\mathcal{P}$  je v ní pravdivá.

## Příklad: Herbrandovy interpretace

$\text{rodic}(a, b).$   
 $\text{rodic}(b, c).$   
 $\text{predek}(X, Y) \text{ :- rodic}(X, Y).$   
 $\text{predek}(X, Z) \text{ :- rodic}(X, Y), \text{predek}(Y, Z).$

$\mathcal{I}_1 = \{\text{rodic}(a, b), \text{rodic}(b, c), \text{predek}(a, b), \text{predek}(b, c), \text{predek}(a, c)\}$

$\mathcal{I}_2 = \{\text{rodic}(a, b), \text{rodic}(b, c), \text{predek}(a, b), \text{predek}(b, c), \text{predek}(a, c), \text{predek}(a, a)\}$

$\mathcal{I}_1$  i  $\mathcal{I}_2$  jsou Herbrandovy modely klauzulí

## Specifikace Herbrandova modelu

- Herbrandovy interpretace mají předdefinovaný význam funktorů a konstant
- Pro specifikaci Herbrandovy interpretace tedy stačí zadat relace pro každý predikátový symbol
- Příklad: Herbrandova interpretace a Herbrandův model množiny formulí

$\text{lichy}(s(0)).$  % (1)

$\text{lichy}(s(s(X))) \text{ :- lichy}(X).$  % (2)

▪  $\mathcal{I}_1 = \emptyset$  není model (1)

▪  $\mathcal{I}_2 = \{\text{lichy}(s(0))\}$  není model (2)

▪  $\mathcal{I}_3 = \{\text{lichy}(s(0)), \text{lichy}(s(s(s(0))))\}$  není model (2)

▪  $\mathcal{I}_4 = \{\text{lichy}(s^n(0)) \mid n \in \{1, 3, 5, 7, \dots\}\}$  Herbrandův model (1) i (2)

▪  $\mathcal{I}_5 = \{\text{lichy}(s^n(0)) \mid n \in \mathbb{N}\}$  Herbrandův model (1) i (2)

## Deklarativní a operační sémantika

- Je-li  $S$  množina programových klauzulí a  $M$  libovolná množina Herbrandových modelů  $S$ , pak **průnik těchto modelů** je opět Herbrandův model množiny  $S$ .
- **Důsledek:**  
Existuje **nejmenší Herbrandův model** množiny  $S$ , který značíme  $M(S)$ .
- **Deklarativní sémantikou** logického programu  $P$  rozumíme jeho minimální Herbrandův model  $M(P)$ .
- **Operační sémantikou** logického programu  $P$  rozumíme množinu  $O(P)$  všech atomických formulí bez proměnných, které lze pro nějaký cíl  $G^1$  odvodit nějakým rezolučním důkazem ze vstupní množiny  $P \cup \{G\}$ .  
<sup>1</sup>tímto výrazem jsou míněny všechny cíle, pro něž zmíněný rezoluční důkaz existuje.
- Pro libovolný logický program  $P$  platí  $M(P) = O(P)$



## Negace v logickém programování

## Negativní znalost

- logické programy vyjadřují **pozitivní znalost**
- **negativní literály**: pozice určena definicí Hornových klauzulí  
 $\Rightarrow$  nelze vyvodit **negativní** informaci z logického programu
  - každý predikát definuje úplnou relaci
  - negativní literál **není** logickým důsledkem programu
- relace vyjádřeny explicitně v nejmenším Herbrandově modelu
  - $nad(X, Y) : \neg na(X, Y). \quad na(c, b).$
  - $nad(X, Y) : \neg na(X, Z), nad(Z, Y). \quad na(b, a).$
  - nejmenší Herbrandův model:  $\{na(b, a), na(c, b), nad(b, a), nad(c, b), nad(c, a)\}$
- ani program ani model nezahrnují negativní informaci
  - $a$  není nad  $c$ ,  $a$  není na  $c$
  - i v realitě je negativní informace vyjádřena explicitně zřídka, např. jízdní řád

## Předpoklad uzavřeného světa

- neexistence informace chápána jako opak:  
**předpoklad uzavřeného světa (closed world assumption, CWA)**
- převzato z databází
- určitý vztah platí **pouze** když je vyvoditelný z programu.
- „odvozovací pravidlo“ ( $A$  je (uzavřený) term):  $\frac{P \neq A}{\neg A}$  (CWA)
- pro SLD-rezoluci:  $P \neq nad(a, c)$ , tedy lze podle CWA odvodit  $\neg nad(a, c)$
- problém: není rozhodnutelné, zda daná atomická formule je logickým důsledkem daného logického programu.
  - nelze tedy určit, zda pravidlo CWA je aplikovatelné nebo ne
- CWA v logickém programování obecně nepoužitelná.

## Negace jako neúspěch (negation as failure)

- slabší verze CWA: **definitivně neúspěšný (finitely failed) SLD-strom** cíle :  $\neg A$   
 $\frac{\neg A}{\neg A}$  má definitivně (konečně) neúspěšný SLD-strom (**negation as failure, NF**)
- **normální cíl**: cíl obsahující i negativní literály
  - :  $\neg nad(c, a), \neg nad(b, c).$
- rozdíl mezi CWA a NF
  - program  $nad(X, Y) : \neg nad(X, Y)$ , cíl :  $\neg \neg nad(b, c)$
  - neexistuje odvození cíle podle NF, protože SLD-strom :  $\neg nad(b, c)$  je nekonečný
  - existuje odvození cíle podle CWA, protože neexistuje vyvrácení :  $\neg nad(b, c)$
- CWA i NF jsou nekorektní:  $A$  není logickým důsledkem programu  $P$
- řešení: definovat programy tak, aby jejich důsledkem byly i negativní literály  
**zúplnění logického programu**

## Podstata zúplnění logického programu

- převod všech **if** příkazů v logickém programu na **iff**
  - $nad(X, Y) : \neg na(X, Y)$ .
  - $nad(X, Y) : \neg na(X, Z), nad(Z, Y)$ .
  - lze psát jako:  $nad(X, Y) : \neg(na(X, Y)) \vee (na(X, Z), nad(Z, Y))$ .
  - zúplnění:  $nad(X, Y) \leftrightarrow (na(X, Y)) \vee (na(X, Z), nad(Z, Y))$ .
  - $X$  je nad  $Y$  **právě tehdy, když alespoň jedna z podmínek platí**
  - tedy **pokud žádná z podmínek neplatí,  $X$  není nad  $Y$**
- kombinace klauzulí je možná pouze pokud mají identické hlavy
  - $na(c, b)$ .
  - $na(b, a)$ .
  - lze psát jako:  $na(X_1, X_2) : \neg X_1 = c, X_2 = b$ .
  - $na(X_1, X_2) : \neg X_1 = b, X_2 = a$ .
  - zúplnění:  $na(X_1, X_2) \leftrightarrow (X_1 = c, X_2 = b) \vee (X_1 = b, X_2 = a)$ .

### $IF(q, P)$

$$na(X_1, X_2) : \neg \exists Y (X_1 = c, X_2 = b, f(Y)) \vee (X_1 = b, X_2 = a, g).$$

- $q/n$  predikátový symbol programu  $P$   $na(c, b) : \neg f(Y)$ .  $na(b, a) : \neg g$ .
- $X_1, \dots, X_n$  jsou „nové“ proměnné, které se nevyskytují nikde v  $P$
- Necht'  $C$  je klauzule ve tvaru  $q(t_1, \dots, t_n) : \neg L_1, \dots, L_m$  kde  $m \geq 0$ ,  $t_1, \dots, t_n$  jsou termy a  $L_1, \dots, L_m$  jsou literály.  
Pak označme  $E(C)$  výraz  $\exists Y_1, \dots, Y_k (X_1 = t_1, \dots, X_n = t_n, L_1, \dots, L_m)$  kde  $Y_1, \dots, Y_k$  jsou všechny proměnné v  $C$ .
- Necht'  $def(q/n) = \{C_1, \dots, C_j\}$ .  
Pak formuli  $IF(q, P)$  získáme následujícím postupem:  
 $q(X_1, \dots, X_n) : \neg E(C_1) \vee E(C_2) \vee \dots \vee E(C_j)$  pro  $j > 0$  a  
 $q(X_1, \dots, X_n) : \neg \square$  pro  $j = 0$  [ $q/n$  není v programu  $P$ ].

## Zúplnění programu

- **Zúplnění programu  $P$**  je:  $comp(P) := IFF(P) \cup CET$
- Základní vlastnosti:
  - $comp(P) \models P$
  - do programu je přidána pouze negativní informace
- **IFF(P)**: spojka  $:-$  v  $IF(P)$  je nahrazena spojkou  $\leftrightarrow$
- **IF(P)**: množina všech formulí  $IF(q, P)$  pro všechny predikátové symboly  $q$  v programu  $P$
- Cíl: definovat  $IF(q, P)$
- $def(p/n)$  predikátu  $p/n$  je množina všech klauzulí predikátu  $p/n$

## Clarkova Teorie Rovnosti (CET)

všechny formule jsou univerzálně kvantifikovány:

1.  $X = X$
2.  $X = Y \rightarrow Y = X$
3.  $X = Y \wedge Y = Z \rightarrow X = Z$
4. pro každý  $f/m$ :  $X_1 = Y_1 \wedge \dots \wedge X_m = Y_m \rightarrow f(X_1, \dots, X_m) = f(Y_1, \dots, Y_m)$
5. pro každý  $p/m$ :  $X_1 = Y_1 \wedge \dots \wedge X_m = Y_m \rightarrow (p(X_1, \dots, X_m) \rightarrow p(Y_1, \dots, Y_m))$
6. pro všechny různé  $f/m$  a  $g/n$ , ( $m, n \geq 0$ ):  $f(X_1, \dots, X_m) \neq g(Y_1, \dots, Y_n)$
7. pro každý  $f/m$ :  $f(X_1, \dots, X_m) = f(Y_1, \dots, Y_m) \rightarrow X_1 = Y_1 \wedge \dots \wedge X_m = Y_m$
8. pro každý term  $t$  obsahující  $X$  jako vlastní podterm:  $t \neq X$

$X \neq Y$  je zkrácený zápis  $\neg(X = Y)$

## Korektnost a úplnost NF pravidla

- **Korektnost NF pravidla:** Necht'  $P$  logický program a :  $\neg A$  cíl.  
Jestliže :  $\neg A$  má definitivně neúspěšný SLD-strom,  
pak  $\forall (\neg A)$  je logickým důsledkem  $\text{comp}(P)$  (nebo-li  $\text{comp}(P) \models \forall (\neg A)$ )
- **Úplnost NF pravidla:** Necht'  $P$  je logický program. Jestliže  $\text{comp}(P) \models \forall (\neg A)$ ,  
pak existuje definitivně neúspěšný SLD-strom :  $\neg A$ .
  - zůstává problém: není rozhodnutelné, zda daná atomická formule je logickým důsledkem daného logického programu.
  - teorém mluví pouze o **existenci** definitivně neúspěšného SLD-stromu
  - definitivně (konečně) neúspěšný SLD-strom sice existuje, ale nemusíme ho nalézt
    - např. v Prologu: může existovat konečné odvození, ale program přesto cyklí (Prolog nenajde definitivně neúspěšný strom)
- Odvození pomocí NF pouze **test**, nelze **konstruovat** výslednou substituci
  - v  $(\text{comp}(P) \models \forall (\neg A))$  je  $A$  všeob. kvantifikováno, v  $\forall (\neg A)$  nejsou volné proměnné

## Stratifikované programy II

- program je  $m$ -stratifikovaný  $\iff m$  je nejmenší index takový, že  $S_0 \cup \dots \cup S_m$  je množina všech predikátových symbolů z  $P$
- **Věta:** Zúplnění každého stratifikovaného programu má Herbrandův model.
  - $p : \neg \neg p$ . nemá Herbrandův model
  - $p : \neg \neg p$ . ale není stratifikovaný
- stratifikované programy nemusí mít **jedinečný** minimální Herbrandův model
  - *cykli* :  $\neg \neg \text{zastavi}$ .
  - dva minimální Herbrandovy modely:  $\{\text{cykli}\}, \{\text{zastavi}\}$
  - důsledek toho, že *cykli* :  $\neg \neg \text{zastavi}$ . je ekvivalentní  $\text{cykli} \vee \text{zastavi}$

## Normální a stratifikované programy

- **normální program:** obsahuje negativní literály v pravidlech
- **problém:** existence zúplnění, která nemají žádný model
  - $p : \neg \neg p$ . zúplnění:  $p \leftarrow \neg p$
- rozdělení programu na vrstvy
  - vynucují použití negace relace pouze tehdy pokud je relace úplně definovaná
  - $a$ .  $a$ .  
 $a : \neg \neg b, a$ .  $a : \neg \neg b, a$ .  
 $b$ .  $b : \neg \neg a$ .  
stratifikovaný není stratifikovaný
- normální program  $P$  je **stratifikovaný**: množina predikátových symbolů programu lze rozdělit do disjunktních množin  $S_0, \dots, S_m$  ( $S_i \equiv$  **stratum**)
  - $p(\dots) : \neg \dots, q(\dots), \dots \in P, p \in S_k \implies q \in S_0 \cup \dots \cup S_k$
  - $p(\dots) : \neg \dots, \neg q(\dots), \dots \in P, p \in S_k \implies q \in S_0 \cup \dots \cup S_{k-1}$

## SLDNF rezoluce: úspěšné odvození

- NF pravidlo:  $\frac{}{\neg C}$  má konečně neúspěšný SLD-strom
- Pokud máme negativní podcíl  $\neg C$  v dotazu  $G$ , pak hledáme důkaz pro  $C$
- Pokud odvození  $C$  selže (strom pro  $C$  je konečně neúspěšný), pak je odvození  $G$  (i  $\neg C$ ) celkově úspěšné

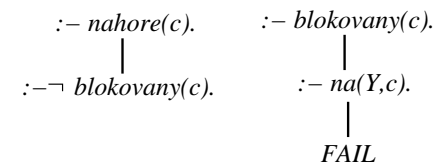
*nahore*( $X$ ) :  $\neg \neg \text{blokovaný}(X)$ .

*blokovaný*( $X$ ) :  $\neg \text{na}(Y, X)$ .

*na*( $a, b$ ).

:  $\neg \text{nahore}(c)$ .

*yes*



$\Rightarrow$  úspěšné odvození

## SLDNF rezoluce: neúspěšné odvození

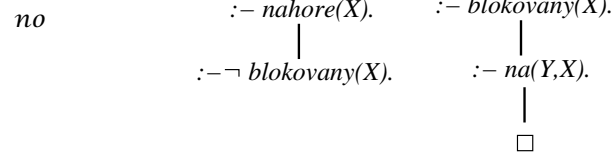
- NF pravidlo: 
$$\frac{:- C. \text{ má konečně neúspěšný SLD-strom}}{\neg C}$$
- Pokud máme negativní podcíl  $\neg C$  v dotazu  $G$ , pak hledáme důkaz pro  $C$
- Pokud existuje vyvrácení  $C$  s prázdnou substitucí (strom pro  $C$  je konečně úspěšný), pak je odvození  $G$  (i  $\neg C$ ) celkově neúspěšné**

$nahore(X) : \neg \neg blokovany(X).$

$blokovany(X) : \neg na(Y, X).$

$na(., .).$

$:- nahore(X).$



$\Rightarrow$  **neúspěšné odvození**

## SLDNF rezoluce: uvážené odvození

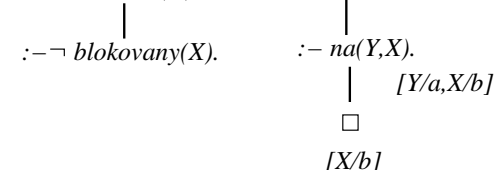
- NF pravidlo: 
$$\frac{:- C. \text{ má konečně neúspěšný SLD-strom}}{\neg C}$$
- Pokud máme negativní podcíl  $\neg C$  v dotazu  $G$ , pak hledáme důkaz pro  $C$
- Pokud existuje vyvrácení  $C$  s neprázdnou substitucí (strom pro  $C$  je konečně úspěšný), pak je odvození  $G$  (i  $\neg C$ ) uvážené**

$nahore(X) : \neg \neg blokovany(X).$

$blokovany(X) : \neg na(Y, X).$

$na(a, b).$

$:- nahore(X).$



$\Rightarrow$  **uvážené odvození**

## SLD<sup>+</sup> odvození

- $P$  je normální program,  $G_0$  normální cíl,  $R$  selekční pravidlo:  
**SLD<sup>+</sup>-odvození**  $G_0$  je buď konečná posloupnost

$$\langle G_0; C_0 \rangle, \dots, \langle G_{i-1}; C_{i-1} \rangle, G_i$$

nebo nekonečná posloupnost

$$\langle G_0; C_0 \rangle, \langle G_1; C_1 \rangle, \langle G_2; C_2 \rangle, \dots$$

kde v každém kroku  $m + 1$  ( $m \geq 0$ ),  $R$  vybírá **pozitivní literál** v  $G_m$  a dospívá k  $G_{m+1}$  obvyklým způsobem.

- konečné SLD<sup>+</sup>-odvození může být:

1. **úspěšné:**  $G_i = \square$

2. **neúspěšné**

3. **blokováné:**  $G_i$  je negativní (např.  $\neg A$ )

## SLDNF rezoluce: pojmy

- Úroveň cíle**
  - $P$  normální program,  $G_0$  normální cíl,  $R$  selekční pravidlo:  
**úroveň cíle**  $G_0$  se rovná
    - $0 \iff$  žádné SLD<sup>+</sup>-odvození s pravidlem  $R$  není blokováno
    - $k + 1 \iff$  maximální úroveň cílů:  $\neg A$ ,  
které ve tvaru  $\neg A$  blokují SLD<sup>+</sup>-odvození  $G_0$ , je  $k$
  - nekonečná úroveň cíle: **blokováné SLDNF odvození**
- Množina SLDNF odvození** =  $\{\text{SLDNF odvození } G_0\} \cup \{\text{SLDNF odvození } : \neg A\}$ 
  - při odvozování  $G_0$  jsme se dostali k cíli  $\neg A$
- SLDNF odvození cíle  $G$  ?

## SLDNF rezoluce

$P$  normální program,  $G_0$  normální cíl,  $R$  selekční pravidlo:

**množina SLDNF odvození a podmnožina neúspěšných SLDNF odvození** cíle  $G_0$  jsou takové nejmenší množiny, že:

- každé **SLD<sup>+</sup>-odvození**  $G_0$  je SLDNF odvození  $G_0$
- je-li SLD<sup>+</sup>-odvození  $\langle G_0; C_0 \rangle, \dots, G_i$  **blokováno na**  $\neg A$ 
  - tj.  $G_i$  je tvaru :  $-L_1, \dots, L_{m-1}, \neg A, L_{m+1}, \dots, L_n$

pak

- **existuje-li SLDNF odvození** :  $\neg A$  (pod  $R$ ) s prázdnou cílovou substitucí, pak  $\langle G_0; C_0 \rangle, \dots, G_i$  je **neúspěšné SLDNF odvození**
- je-li **každé úplné SLDNF odvození** :  $\neg A$  (pod  $R$ ) **neúspěšné** pak  $\langle G_0; C_0 \rangle, \dots, \langle G_i, \epsilon \rangle, (: -L_1, \dots, L_{m-1}, L_{m+1}, \dots, L_n)$  je **(úspěšné) SLDNF odvození cíle**  $G_0$ 
  - $\epsilon$  označuje prázdnou cílovou substituci

## Typy SLDNF odvození

Konečné SLDNF-odvození může být:

1. **úspěšné**:  $G_i = \square$
2. **neúspěšné**
3. **uvázlé (flounder)**:  
 $G_i$  je negativní ( $\neg A$ ) a :  $\neg A$  je úspěšné s neprázdnou cílovou substitucí
4. **blokováno**:  $G_i$  je negativní ( $\neg A$ ) a :  $\neg A$  nemá konečnou úroveň.

## Korektnost a úplnost SLDNF odvození

- **korektnost SLDNF-odvození**:

$P$  normální program, :  $\neg G$  normální cíl a  $R$  je selekční pravidlo:

je-li  $\theta$  cílová substituce SLDNF-odvození cíle :  $\neg G$ , pak

$G\theta$  je logickým důsledkem  $\text{comp}(P)$

- implementace SLDNF v Prologu není korektní
- Prolog neřeší uvázlé SLDNF-odvození (neprázdná substituce)
- použití bezpečných cílů (negace neobsahuje proměnné)

- **úplnost SLDNF-odvození**: SLDNF-odvození **není** úplné

- pokud existuje konečný neúspěšný strom :  $\neg A$ , pak  $\neg A$  platí  
ale místo toho se odvozování :  $\neg A$  může zacyklit, tj. SLDNF rezoluce  $\neg A$  neodvodí  
 $\Rightarrow \neg A$  tedy sice platí, ale SLDNF rezoluce ho nedokáže odvodit

## Logické programování s omezujícími podmínkami

### *Constraint Logic Programming: CLP*

## CP: elektronické materiály

- Dechter, R. **Constraint Processing**. Morgan Kaufmann Publishers, 2003.
  - <http://www.ics.uci.edu/~dechter/books/materials.html>  
průsvitky ke knize
- Barták R. **Přednáška Omezující podmínky na MFF UK, Praha**.
  - <http://kti.ms.mff.cuni.cz/~bartak/podminky/index.html>
- **SICStus Prolog User's Manual**. Kapitola o CLP(FD).
  - <http://www.fi.muni.cz/~hanka/sicstus/doc/html/>
- **Příklady v distribuci SICStus Prologu**: cca 60 příkladů, zdrojový kód
  - `lib/sicstus-*/library/clpfd/examples/`

## Probírané oblasti

- Obsah
  - úvod: od LP k CLP
  - základy programování
  - základní algoritmy pro řešení problémů s omezujícími podmínkami
- Příbuzné přednášky na FI
  - PA163 Programování s omezujícími podmínkami
    - viz interaktivní osnova IS
  - PA167 Rozvrhování
    - <http://www.fi.muni.cz/~hanka/rozvrhovani>
    - zahrnuty CP techniky pro řešení rozvrhovacích problémů

## Historie a současnost

- **1963** interaktivní grafika (Sutherland: Sketchpad)
- **Polovina 80. let**: logické programování omezujícími podmínkami
- **Od 1990**: komerční využití
- Už v roce **1996**: výnos řádově stovky milionů dolarů
- Aplikace – příklady
  - **Lufthansa**: krátkodobé personální plánování
    - reakce na změny při dopravě (zpoždění letadla, ...)
    - minimalizace změny v rozvrhu, minimalizace ceny
  - **Nokia**: automatická konfigurace sw pro mobilní telefony
  - **Renault**: krátkodobé plánování výroby, funkční od roku 1995

## Omezení (*constraint*)

- Dána
  - množina (**doménových**) **proměnných**  $Y = \{y_1, \dots, y_k\}$
  - **konečná** množina hodnot (**doména**)  $D = \{D_1, \dots, D_k\}$
- **Omezení**  $c$  na  $Y$  je podmnožina  $D_1 \times \dots \times D_k$ 
  - omezuje hodnoty, kterých mohou proměnné nabývat současně
- Příklad:
  - proměnné:  $A, B$
  - domény:  $\{0,1\}$  pro  $A$      $\{1,2\}$  pro  $B$
  - omezení:  $A \neq B$     nebo     $(A,B) \in \{(0,1), (0,2), (1,2)\}$
- Omezení  $c$  definováno na  $y_1, \dots, y_k$  je **splněno**, pokud pro  $d_1 \in D_1, \dots, d_k \in D_k$  platí  $(d_1, \dots, d_k) \in c$ 
  - příklad (pokračování): omezení splněno pro  $(0,1), (0,2), (1,2)$ , není splněno pro  $(1,1)$

## Problém splňování podmínek (CSP)

- Dána
  - konečná množina **proměnných**  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$
  - konečná množina hodnot (**doména**)  $D = \{D_1, \dots, D_n\}$
  - konečná množina **omezení**  $C = \{c_1, \dots, c_m\}$ 
    - omezení je definováno na podmnožině  $X$

**Problém splňování podmínek** je trojice  $(X, D, C)$   
(*constraint satisfaction problem*)

- Příklad:
  - proměnné: A, B, C
  - domény:  $\{0, 1\}$  pro A     $\{1, 2\}$  pro B     $\{0, 2\}$  pro C
  - omezení:  $A \neq B, B \neq C$

## Řešení CSP

- **Částečné ohodnocení proměnných**  $(d_1, \dots, d_k), k < n$ 
  - některé proměnné mají přiřazenu hodnotu
- **Úplné ohodnocení proměnných**  $(d_1, \dots, d_n)$ 
  - všechny proměnné mají přiřazenu hodnotu
- **Řešení CSP**
  - úplné ohodnocení proměnných, které splňuje všechna omezení
  - $(d_1, \dots, d_n) \in D_1 \times \dots \times D_n$  je **řešení**  $(X, D, C)$ 
    - pro každé  $c_i \in C$  na  $x_{i_1}, \dots, x_{i_k}$  platí  $(d_{i_1}, \dots, d_{i_k}) \in c_i$
- Hledáme: jedno nebo  
všechna řešení nebo  
optimální řešení (vzhledem k objektivní funkci)

## Příklad: jednoduchý školní rozvrh

- **proměnné:** Jan, Petr, ...
- **domény:**  $\{3, 4, 5, 6\}, \{3, 4\}, \dots$
- **omezení:** `all_distinct([Jan, Petr, ...])`
- **částečné ohodnocení:** Jan=6, Anna=5, Marie=1
- **úplné ohodnocení:**  
Jan=6, Petr=3, Anna=5, Ota=2, Eva=4, **Marie=6**
- **řešení CSP:**  
Jan=6, Petr=3, Anna=5, Ota=2, Eva=4, Marie=1
- **všechna řešení:** ještě Jan=6, **Petr=4**, Anna=5, Ota=2, **Eva=3**, Marie=1
- optimalizace: ženy učí co nejdříve  
Anna+Eva+Marie  $\neq$  Cena    minimalizace hodnoty proměnné Cena
- **optimální řešení:** Jan=6, **Petr=4**, Anna=5, Ota=2, **Eva=3**, Marie=1

učitel	min	max
Jan	3	6
Petr	3	4
Anna	2	5
Ota	2	4
Eva	3	4
Marie	1	6

## CLP(FD) program

- Základní struktura **CLP programu**
  1. definice proměnných a jejich domén
  2. definice omezení
  3. hledání řešení
- (1) a (2) deklarativní část
  - **modelování** problému
  - vyjádření problému splňování podmínek
- (3) řídicí část
  - **prohledávání** stavového prostoru řešení
  - procedura pro hledání řešení (enumeraci) se nazývá **labeling**
  - umožní nalézt jedno, všechna nebo optimální řešení

## Kód CLP(*FD*) programu

```
% základní struktura CLP programu
solve( Variables ) :-
    declare_variables( Variables ),          domain([Jan],3,6), ...
    post_constraints( Variables ),          all_distinct([Jan,Petr,...])
    labeling( Variables ).

% triviální labeling
labeling( [] ).
labeling( [Var|Rest] ) :-
    fd_min(Var,Min),                        % výběr nejmenší hodnoty z domény
    ( Var#=Min, labeling( Rest )
    ;
    Var#>Min , labeling( [Var|Rest] )
    ).
```

## Příklad: algebrogram

- Přiřaďte cifry 0, ... 9 písmenům S, E, N, D, M, O, R, Y tak, aby platilo:
  - SEND + MORE = MONEY
  - různá písmena mají přiřazena různé cifry
  - S a M nejsou 0
- domain([E,N,D,O,R,Y], 0, 9), domain([S,M],1,9)
- $$\begin{array}{r} 1000*S + 100*E + 10*N + D \\ + 1000*M + 100*O + 10*R + E \\ \#= 10000*M + 1000*O + 100*N + 10*E + Y \end{array}$$
- all\_distinct( [S,E,N,D,M,O,R,Y] )
- labeling( [S,E,N,D,M,O,R,Y] )

## Od LP k CLP I.

- CLP: rozšíření logického programování o omezující podmínky
- CLP systémy se liší podle typu domény
  - CLP( $\mathcal{A}$ ) generický jazyk
  - CLP(*FD*) domény proměnných jsou konečné (*Finite Domains*)
  - CLP( $\mathbb{R}$ ) doménou proměnných je množina reálných čísel
- Cíl
  - využít syntaktické a výrazové přednosti LP
  - dosáhnout větší efektivity
- Unifikace v LP je nahrazena splňováním podmínek
  - unifikace se chápe jako **jedna** z podmínek
  - A = B
  - A #< B, A in 0..9, domain([A,B],0,9), all\_distinct([A,B,C])

## Od LP k CLP II.

- Pro řešení podmínek se používají **konzistenční techniky**
  - *consistency techniques, propagace omezení (constraint propagation)*
  - omezení: A in 0..2, B in 0..2, B #< A  
domény po propagaci omezení B #< A: A in 1..2, B in 0..1
- Podmínky jsou deterministicky vyhodnoceny v okamžiku volání podmínky
- **Prohledávání doplněno konzistenčními technikami**
  - A in 1..2, B in 0..1, B #< A
  - po provedení A #= 1 se z B #< A se odvodí: B #= 0
- **Podmínky jako výstup**
  - kompaktní reprezentace nekonečného počtu řešení, výstup lze použít jako vstup
  - dotaz: A in 0..2, B in 0..2, B #< A  
výstup: A in 1..2, B in 0..1, B #< A



## Syntaxe CLP

- Výběr jazyka omezení
  - CLP klauzule  
jako LP klauzule, ale její tělo může obsahovat omezení daného jazyka  
 $p(X,Y) :- X \#< Y+1, q(X), r(X,Y,Z).$
  - Rezoluční krok v LP
    - kontrola existence nejobecnějšího unifikátoru (MGU) mezi cílem a hlavou
  - Krok odvození v CLP také zahrnuje
    - kontrola konzistence aktuální množiny omezení s omezeními v těle klauzule
- ⇒ Vyvolání dvou řešičů: unifikace + řešič omezení

## Operační sémantika CLP

- CLP výpočet cíle  $G$ 
  - $Store$  množina aktivních omezení  $\equiv$  **prostor omezení** (*constraint store*)
  - inicializace  $Store = \emptyset$
  - seznamy cílů v  $G$  prováděny v obvyklém pořadí
  - pokud narazíme na cíl s omezením  $c$ :  $NewStore = Store \cup \{c\}$
  - snažíme se splnit  $c$  vyvoláním jeho řešiče
    - při neúspěchu se vyvolá backtracking
    - při úspěchu se podmínky v  $NewStore$  zjednoduší propagací omezení
  - zbývající cíle jsou prováděny s upraveným  $NewStore$
- CLP výpočet cíle  $G$  je úspěšný, pokud se dostaneme z iniciálního stavu  $\langle G, \emptyset \rangle$  do stavu  $\langle G', Store \rangle$ , kde  $G'$  je prázdný cíl a  $Store$  je splnitelná.

## CLP( $FD$ ) v SICStus Prologu

## Systémy a jazyky pro CP

- **IBM ILOG CP** 1987
  - omezující podmínky v C++, Java nebo generickém modelovacím jazyku OPL
  - implementace podmínek založena na objektově orientovaném programování
  - špičkový komerční sw, vznikl ve Francii, nedávno zakoupen IBM
  - nyní nově volně dostupný pro akademické použití
- **Swedish Institute of Computer Science: SICStus Prolog** 1985
  - silná CLP( $FD$ ) knihovna, komerční i akademické použití
- **IC-PARC, Imperial College London, Cisco Systems: ECL<sup>i</sup>PS<sup>e</sup>** 1984
  - široké možnosti kooperace mezi různými řešiči: konečné domény, reálná čísla, repai r
  - od 2004 vlastní Cisco Systems volně dostupné pro akademické použití, rozvoj na IC-PARC, platformy: Windows, Linux, Solaris
- Mnoho dalších systémů: Choco, Gecode, Minion, Oz, SWI Prolog, ...

## CLP(*FD*) v SICStus Prologu

- Vestavěné predikáty jsou dostupné v separátním modulu (knihovně)  
:- use\_module(library(clpfd)).
- Obecné principy platné všude nicméně standardy jsou nedostatečné
  - stejné/podobné vestavěné predikáty existují i jinde
  - CLP knihovny v SWI Prologu i ECLiPSe se liší

## Příslušnost k doméně: Range termy

- `?- domain( [A,B], 1,3).` `domain( +Variables, +Min, +Max)`  
`A in 1..3`  
`B in 1..3`
- `?- A in 1..8, A #\= 4.` `?X in +Min..+Max`  
`A in (1..3) \\/ (5..8)`
- Doména reprezentována jako posloupnost intervalů celých čísel
- `?- A in (1..3) \\/ (8..15) \\/ (5..9) \\/ {100}.` `?X in +Range`  
`A in (1..3) \\/ (5..15) \\/ {100}`
- Zjištění domény Range proměnné Var: `fd_dom(?Var, ?Range)`
  - `A in 1..8, A #\= 4, fd_dom(A, Range).` `Range=(1..3) \\/ (5..8)`
  - `A in 2..10, fd_dom(A, (1..3) \\/ (5..8)).` `no`
- Range term: reprezentace nezávislá na implementaci

## Příslušnost k doméně: FDSet termy

- FDSet term: reprezentace závislá na implementaci
- `?- A in 1..8, A #\= 4, fd_set(A, FDSet).` `fd_set(?Var, ?FDSet)`  
`A in (1..3) \\/ (5..8)`  
`FDSet = [[1|3], [5|8]]`
- `?- A in 1..8, A #\= 4, fd_set(A, FDSet), B in_set FDSet.` `?X in_set +FDSet`  
`A in (1..3) \\/ (5..8)`  
`FDSet = [[1|3], [5|8]]`  
`B in (1..3) \\/ (5..8)`
- FDSet termy představují nízko-úrovňovou implementaci
- FDSet termy nedoporučeny v programech
  - používat pouze predikáty pro manipulaci s nimi
  - omezit použití `A in_set [[1|2], [6|9]]`
- Range termy preferovány

## Další fd... predikáty

- `fdset_to_list(+FDset, -List)` vrací do seznamu prvky FDset
- `list_to_fdset(+List, -FDset)` vrací FDset odpovídající seznamu
- `fd_var(?Var)` je Var doménová proměnná?
- `fd_min(?Var, ?Min)` nejmenší hodnota v doméně
- `fd_max(?Var, ?Max)` největší hodnota v doméně
- `fd_size(?Var, ?Size)` velikost domény
- `fd_degree(?Var, ?Degree)` počet navázaných omezení na proměnné
  - mění se během výpočtu: pouze aktivní omezení, i odvozená aktivní omezení

## Aritmetická omezení

- Expr RelOp Expr      RelOp -> #= | #\= | #< | #=< | #> | #>=
  - A + B #=< 3, A #\= (C - 4) \* (D - 5), A/2 #= 4
  - POZOR: neplést #=< a #>= s operátory pro implikaci: #<= #=>
- sum(Variables, RelOp, Suma)
  - domain([A,B,C,F],1,3), sum([A,B,C],#= ,F)
  - Variables i Suma musí být doménové proměnné nebo celá čísla
- scalar\_product(Coeffs, Variables, RelOp, ScalarProduct)
  - domain([A,B,C,F],1,6), scalar\_product([1,2,3],[A,B,C],#= ,F)
  - Variables i Value musí být doménové proměnné nebo celá čísla, Coeffs jsou celá čísla
  - POZOR na pořadí argumentů, nejprve jsou celočíselné koeficienty, pak dom. proměnné
  - scalar\_product(Coeffs, Variables, #= , Value, [consistency(domain)])
    - silnější typ konzistence
    - POZOR: domény musí mít konečné hranice

## Základní globální omezení

- all\_distinct(List)
  - všechny proměnné různé
- cumulative(...)
- cumulatives(...)

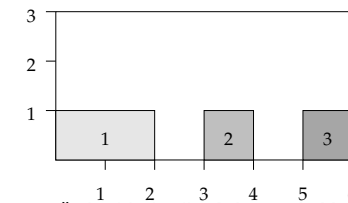
## Všechny proměnné různé

- all\_distinct(Variables), all\_different(Variables)
- Proměnné v seznamu Variables jsou různé
- all\_distinct a all\_different se liší úrovní propagace
  - all\_distinct má úplnou propagaci
  - all\_different má slabší (neúplnou) propagaci
- Příklad: učitelé musí učit v různé hodiny
  - all\_distinct([Jan,Petr,Anna,Ota,Eva,Marie])  
Jan = 6, Ota = 2, Anna = 5,  
Marie = 1, Petr in 3..4, Eva in 3..4
  - all\_different([Jan,Petr,Anna,Ota,Eva,Marie])  
Jan in 3..6, Petr in 3..4, Anna in 2..5,  
Ota in 2..4, Eva in 3..4, Marie in 1..6

učitel	min	max
Jan	3	6
Petr	3	4
Anna	2	5
Ota	2	4
Eva	3	4
Marie	1	6

## Disjunktivní rozvrhování (unární zdroj)

- cumulative([task(Start, Duration, End, 1, Id) | Tasks])
- Rozvržení úloh zadaných startovním a koncovým časem (Start,End), dobou trvání (nezáporné Duration) a identifikátorem (Id) tak, aby se nepřekrývaly
  - příklad s konstantami: cumulative([task(0,2,2,1,1), task(3,1,4,1,2), task(5,1,6,1,3)])



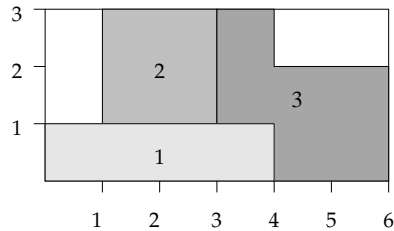
- příklad: vytvoření rozvrhu, za předpokladu, že **doba trvání hodin není stejná**  
JanE# = Jan+1, PetrE# = Petr+1, AnnaE# = Anna+2,  
cumulative(task(Jan,1,JanE,1,1), task(Petr,1,PetrE,1,2), task(Anna,1,AnnaE,1,  
task(Ota,2,OtaE,1,4), task(Eva,2,EvaE,1,5), task(Marie,3,MarieE,1,6)])

## Kumulativní rozvrhování

- `cumulative([task(Start,Duration,End,Demand,TaskId) | Tasks], [limit(Limit)])`
- Rozvržení úloh zadaných startovním a koncovým časem (Start,End), dobou trvání (nezáporné Duration), požadovanou kapacitou zdroje (Demand) a identifikátorem (Id) tak, aby se nepřekrývaly a aby celková kapacita zdroje nikdy nepřekročila Limit

- Příklad s konstantami:

```
cumulative([task(0,4,4,1,1), task(1,2,3,2,2), task(3,3,6,2,3), task(4,2,6,1,4)], [limit(3)])
```



## Kumulativní rozvrhování s více zdroji

- Rozvržení úloh tak, aby se nepřekrývaly a daná kapacita zdrojů nebyla překročena (limit zdroje chápán jako horní mez – bound(upper))
- `cumulatives([task(Start,Duration,End,Demand,MachineId) | Tasks], [machine(Id,Limit) | Machines], [bound(upper)])`
- Úlohy zadány startovním a koncovým časem (Start,End), dobou trvání (nezáporné Duration), požadovanou kapacitou zdroje (Demand) a požadovaným typem zdroje (MachineId)
- Zdroje zadány identifikátorem (Id) a kapacitou (Limit)
- Příklad:

```
?- domain([B,C],1,2),
   cumulatives([task(0,4,4,1,1), task(3,1,4,1,B), task(5,1,6,1,C)],
               [machine(1,1), machine(2,1)],
               [bound(upper)]).
           C in 1..2, B=2
```

## Vestavěné predikáty pro labeling

- Instanciaci proměnné Variable hodnotami v její doméně

```
indomain( Variable )
```

hodnoty jsou instanciovány při backtrackingu ve vzrůstajícím pořadí

```
?- X in 4..5, indomain(X).
```

```
X = 4 ? ;
```

```
X = 5 ?
```

```
labeling( [] ).
```

```
labeling( [Var|Rest] ) :- % výběr nejlevější proměnné k instanciaci
```

```
    indomain( Var ),      % výběr hodnot ve vzrůstajícím pořadí
```

```
    labeling( Rest ).
```

- `labeling( Options, Variables )`

```
?- A in 0..2, B in 0..2, B#< A, labeling([], [A,B]).
```

## Uspořádání hodnot a proměnných

- Při prohledávání je rozhodující **uspořádání hodnot a proměnných**
- Určují je **heuristiky výběru hodnot a výběru proměnných**

```
labeling( [] ).
```

```
labeling( Variables ) :-
```

```
    select_variable(Variables,Var,Rest),
```

```
    select_value(Var,Value),
```

```
    ( Var #= Value,
      labeling( Rest )
```

```
    ;
```

```
    Var #\= Value ,          % nemusí dojít k instanciaci Var
```

```
    labeling( Variables ) % proto pokračujeme se všemi proměnnými včetně Var
```

```
    ).
```

- **Statické uspořádání:** určeno už před prohledáváním

- **Dynamické uspořádání:** počítá se během prohledávání

## Výběr hodnoty

- Obecný princip výběru hodnoty: **první úspěch (*succeed first*)**
  - volíme pořadí tak, abychom výběr nemuseli opakovat
  - ?- domain([A,B,C],1,2), A#=B+C. optimální výběr A=2,B=1,C=1 je bez backtrackingu
- Parametry labeling/2 ovlivňující výběr hodnoty př. labeling([down], Vars)
  - up: doména procházena ve vzrůstajícím pořadí (default)
  - down: doména procházena v klesajícím pořadí
- Parametry labeling/2 řídicí, jak je výběr hodnoty realizován
  - step: volba mezi X #= M, X #\= M (default)
    - viz dřívější příklad u "Uspořádání hodnot a proměnných"
  - enum: vícenásobná volba mezi všemi hodnotami v doméně
    - podobně jako při indomain/1

## Výběr proměnné

- Obecný princip výběru proměnné: **first-fail**
  - výběr proměnné, pro kterou je nejobtížnější nalézt správnou hodnotu pozdější výběr hodnoty pro tuto proměnnou by snadněji vedl k failu
  - výbereme proměnnou s **nejmenší doménou**
    - ?- domain([A,B,C],1,3), A#<3, A#=B+C. nejlépe je začít s výběrem A
- Parametry labeling/2 ovlivňující výběr proměnné
  - leftmost: nejlevější (default)
  - ff: s (1) nejmenší velikostí domény fd\_size(Var,Size)
    - (2) pokud s nejmenší velikostí domény více, tak nejlevější z nich
  - ffc: s (1) nejmenší velikostí domény
    - (2) největším množstvím omezením „čekajících“ na proměnné fd\_degree(Var,Size)
    - (3) nejlevější z nich
  - min/max: s (1) nejmenší/největší hodnotou v doméně proměnné
    - (2) nejlevnější z nich fd\_min(Var,Min)/fd\_max(Var,Max)

## Hledání optimálního řešení

(předpokládáme minimalizaci)

- Parametry labeling/2 pro optimalizaci: minimize(F)/maximize(F)
  - Cena #= A+B+C, labeling([minimize(Cena)], [A,B,C])
- Metoda větví a mezí (*branch&bound*)**
  - algoritmus, který implementuje proceduru pro minimalizaci (duálně pro maximalizaci)
  - uvažujeme nejhorší možnou cenu řešení *UB* (např. cena už nalezeného řešení)
  - počítáme dolní odhad *LB* ceny částečného řešení
    - LB* je tedy nejlepší možná cena pro rozšíření tohoto řešení
  - procházíme strom a vyžadujeme, aby prozkoumávaná větev měla cenu *LB* < *UB*
    - pokud je *LB* ≥ *UB*, tak víme, že v této větvi není lepší řešení a odřízneme ji
      - přidává se tedy inkrementálně omezení *LB*#<*UB* pro snižující se *UB* tak, jak nalézáme kvalitnější řešení

## Příklad: kumulativní rozvrhování

- Vytvořte rozvrh pro následující úlohy, tak aby nebyla překročena kapacita 13 zdroje, a **minimalizujte** celkovou dobu trvání

úloha	doba trvání	kapacita
t1	16	2
t2	6	9
t3	13	3
t4	7	7
t5	5	10
t6	18	1
t7	4	11

```

schedule(Ss, End) :-
    length(Ss, 7),
    Ds = [16, 6, 13, 7, 5, 18, 4],
    Rs = [ 2, 9, 3, 7, 10, 1, 11],
    domain(Ss, 0, 51),
    domain([End], 0, 69),
    after(Ss, Ds, End), % koncový čas
    cumulative(Ss, Ds, Rs, 13),
    append(Ss, [End], Vars),
    labeling([minimize(End)], Vars).

after([], [], _).
after([S|Ss], [D|Ds], E) :-
    E #>= S+D, after(Ss, Ds, E).
| ?- schedule(Ss, End).
Ss = Ss = [0,16,9,9,4,4,0], End = 22 ?
  
```

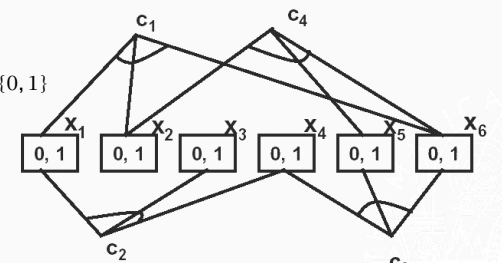
## Algoritmy pro řešení problému splňování podmínek (CSP)

## Grafová reprezentace CSP

- **Reprezentace podmínek**
  - intenzionální (matematická/logická formule)
  - extenzionální (výčet k-tic kompatibilních hodnot, 0-1 matice)
- **Graf:** vrcholy, hrany (hrana spojuje dva vrcholy)
- **Hypergraf:** vrcholy, hrany (hrana spojuje množinu vrcholů)
- Reprezentace CSP pomocí **hypergrafu podmínek**
  - vrchol = proměnná, hyperhrana = podmínka

### Příklad

- proměnné  $x_1, \dots, x_6$  s doménou  $\{0, 1\}$
- omezení  $c_1 : x_1 + x_2 + x_6 = 1$   
 $c_2 : x_1 - x_3 + x_4 = 1$   
 $c_3 : x_4 + x_5 - x_6 > 0$   
 $c_4 : x_2 + x_5 - x_6 = 0$



Hana Rudová, Logické programování I, 13. května 2011

214

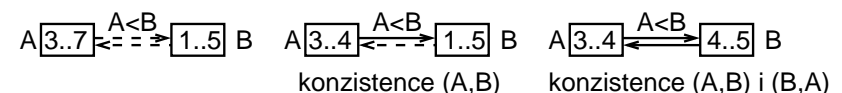
Algoritmy pro CSP

## Binární CSP

- **Binární CSP**
  - CSP, ve kterém jsou pouze binární podmínky
  - unární podmínky zakódovány do domény proměnné
- **Graf podmínek** pro binární CSP
  - není nutné uvažovat hypergraf, stačí graf (podmínka spojuje pouze dva vrcholy)
- **Každý CSP lze transformovat na "korespondující" binární CSP**
- **Výhody a nevýhody binarizace**
  - získáváme unifikovaný tvar CSP problému, řada algoritmů navržena pro binární CSP
  - bohužel ale značné zvětšení velikosti problému
- **Nebinární podmínky**
  - složitější propagační algoritmy
  - lze využít jejich sémantiky pro lepší propagaci
    - příklad: all\_diferent vs. množina binárních nerovností

## Vrcholová a hranová konzistence

- **Vrcholová konzistence (node consistency) NC**
  - každá hodnota z aktuální domény  $V_i$  proměnné splňuje všechny unární podmínky s proměnnou  $V_i$
- **Hranová konzistence (arc consistency) AC pro binární CSP**
  - **hrana  $(V_i, V_j)$  je hranově konzistentní**, právě když pro každou hodnotu  $x$  z aktuální domény  $D_i$  existuje hodnota  $y$  tak, že ohodnocení  $[V_i = x, V_j = y]$  splňuje všechny binární podmínky nad  $V_i, V_j$ .
  - hranová konzistence je **směrová**
    - konzistence hrany  $(V_i, V_j)$  nezaručuje konzistenci hrany  $(V_j, V_i)$

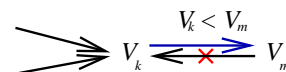


## Algoritmus revize hrany

- Jak udělat hranu  $(V_i, V_j)$  hranově konzistentní?
- Z domény  $D_i$  vyřadím takové hodnoty  $x$ , které nejsou konzistentní s aktuální doménou  $D_j$  (pro  $x$  neexistuje žádná hodnota  $y$  v  $D_j$  tak, aby ohodnocení  $V_i = x$  a  $V_j = y$  splňovalo všechny binární podmínky mezi  $V_i$  a  $V_j$ )
- procedure `revise((i,j))`  
`Deleted := false`  
`for  $\forall x$  in  $D_i$  do`  
   `if neexistuje  $y \in D_j$  takové, že  $(x,y)$  je konzistentní`  
   `then  $D_i := D_i - \{x\}$`   
   `Deleted := true`  
`end if`  
`return Deleted`  
`end revise`
- `domain([V1, V2], 2, 4)`,  $V_1 \# < V_2$     `revise((1,2))` smaže 4 z  $D_1, D_2$  se nezmění

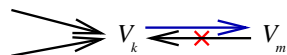
## Dosažení hranové konzistence problému

- Jak udělat CSP hranově konzistentní?
  - revize je potřeba opakovat, dokud se mění doména nějaké proměnné
  - efektivnější: opakování revizí můžeme dělat pomocí **fronty**
    - přidáváme do ní hrany, jejichž konzistence mohla být narušena zmenšením domény
- Jaké hrany přesně revidovat po zmenšení domény?
  - ty, jejichž konzistence může být zmenšením domény proměnné narušena jsou to hrany  $(i, k)$ , které vedou do proměnné  $V_k$  se zmenšenou doménou

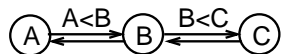


## Algoritmus AC-3

- procedure `AC-3(G)`  
`Q := {(i,j) | (i,j) ∈ hrany(G), i ≠ j}`    % seznam hran pro revizi  
`while Q non empty do`  
   `vyber a smaž (k,m) z Q`  
   `if revise((k,m)) then`    % pridani pouze hran, které  
     `Q := Q ∪ {(i,k) ∈ hrany(G), i ≠ k, i ≠ m}`    % dosud nejsou ve fronte  
`end while`  
`end AC-3`



### Příklad:



$A < B$ ,  $B < C$ :  $(\underline{3}..7, 1..5, 1..5) \xrightarrow{AB} (3..4, \underline{1}..5, 1..5) \xrightarrow{BA} (3..4, 4..5, 1..5) \xrightarrow{BC} (3..4, 4, \underline{1}..5) \xrightarrow{CB} (\underline{3}..4, 4, 5) \xrightarrow{AB} (3, 4, 5)$

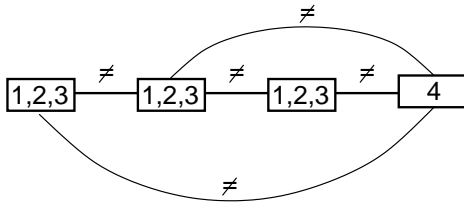
- Technika AC-3 je dnes asi nepoužívanější, ale stále není optimální
- Jaké budou domény A, B, C po AC-3 pro: `domain([A,B,C], 1,10)`,  $A \# = B + 1$ ,  $C \# < B$

## Je hranová konzistence dostatečná?

- Použitím AC odstraníme mnoho nekompatibilních hodnot
  - Dostaneme potom řešení problému? NE
  - Víme alespoň zda řešení existuje? NE
- `domain([X,Y,Z], 1,2)`,  $X \# = Y$ ,  $Y \# = Z$ ,  $Z \# = X$ 
  - hranově konzistentní
  - nemá žádné řešení
- Jaký je tedy význam AC?
  - někdy dá řešení přímo
  - nějaká doména se vyprázdní  $\Rightarrow$  řešení neexistuje
  - všechny domény jsou jednoprvkové  $\Rightarrow$  máme řešení
  - v obecném případě se alespoň zmenší prohledávaný prostor

## k-konzistence

- Mají NC a AC něco společného?
  - NC: konzistence jedné proměnné
  - AC: konzistence dvou proměnných
  - ... můžeme pokračovat
- CSP je **k-konzistentní** právě tehdy, když můžeme libovolné konzistentní ohodnocení (k-1) různých proměnných rozšířit do libovolné k-té proměnné

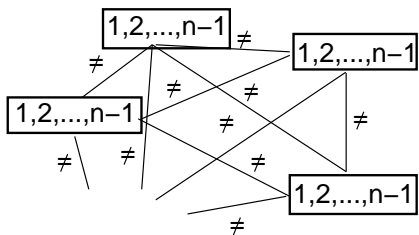


4-konzistentní graf

- Pro obecné CSP, tedy i pro nebinární podmínky

## Konzistence pro nalezení řešení

- Máme-li graf s n vrcholy, jak silnou konzistenci potřebujeme, abychom přímo našli řešení?
  - silná n-konzistence je nutná pro graf s n vrcholy
    - n-konzistence nestačí (viz předchozí příklad)
    - silná k-konzistence pro  $k < n$  také nestačí

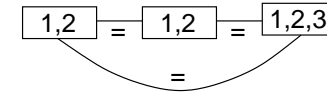


graf s n vrcholy  
domény 1..(n-1)

silně k-konzistentní pro každé  $k < n$   
přesto nemá řešení

## Silná k-konzistence

3-konzistentní graf



(1, 1) lze rozšířit na (1, 1, 1)

(2, 2) lze rozšířit na (2, 2, 2)

(1, 3) ani (2, 3) nejsou konzistentní dvojice (nerozšiřujeme je)

není 2-konzistentní  
(3) nelze rozšířit

- CSP je **silně k-konzistentní** právě tehdy, když je j-konzistentní pro každé  $j \leq k$
- Silná k-konzistence  $\Rightarrow$  k-konzistence
- Silná k-konzistence  $\Rightarrow$  j-konzistence  $\forall j \leq k$
- k-konzistence  $\not\Rightarrow$  silná k-konzistence
- NC = silná 1-konzistence = 1-konzistence
- AC = (silná) 2-konzistence

## Řešení nebinárních podmínek

- k-konzistence má exponenciální složitost, v reálu se nepoužívá
- S n-árními podmínkami se pracuje přímo
- Podmínka je **obecně hranově konzistentní (GAC)**, právě když pro každou proměnnou  $V_i$  z této podmínky a každou hodnotou  $x \in D_i$  existuje ohodnocení zbylých proměnných v podmínce tak, že podmínka platí
  - $A + B \neq C$ ,  $A \in 1..3$ ,  $B \in 2..4$ ,  $C \in 3..7$  je obecně hranově konzistentní
- Využívá se sémantika podmínek
  - speciální typy konzistence pro globální omezení
    - viz all\_distinct
  - konzistence mezi
    - propagace pouze při změně nejmenší a největší hodnoty v doměně proměnné
- Pro různé podmínky lze použít různý druh konzistence
  - $A \# < B$ : hranová konzistence, konzistence mezi



# Konzistenční algoritmus pro nebinární podmínky

- Algoritmus s **frontou proměnných** (někdy též nazýván AC-8)
  - opakovaně se provádí revize podmínek, dokud se mění domény
 

```

                    procedure Nonbinary-AC-3-with-Variables((V, D, C))
                    Q := V
                    while Q non empty do
                    vyber a smaž V_j ∈ Q
                    for ∀ C takové, že V_j ∈ scope(C) do
                    W := revise(V_j, C)
                    // W je množina proměnných jejichž, doména se změnila
                    if ∃ V_i ∈ W taková, že D_i = ∅ then return fail
                    Q := Q ∪ {W}
                    end Non-binary-consistency
                    
```
  - rozsah omezení** *scope(C)*: množina proměnných, na nichž je *C* definováno
- Implementace: u každé proměnné je seznam **vybraných podmínek** pro propagaci, REVISE procedury pro tyto podmínky definuje uživatel v závislosti na typu podmínky

## Propagace pro all\_distinct

- $U = \{X_2, X_4, X_5\}$ ,  $dom(U) = \{2, 3, 4\}$ :
  - $\{2, 3, 4\}$  nelze pro  $X_1, X_3, X_6$
  - $X_1 \in 5..6, X_3 = 5, X_6 \in \{1\} \setminus \{5..6\}$
- Konzistence:**  $\forall \{X_1, \dots, X_k\} \subset V : card\{D_1 \cup \dots \cup D_k\} \geq k$ 
  - stačí hledat **Hallův interval** *I*: velikost intervalu *I* je rovna počtu proměnných, jejichž doména je v *I*
- Inferenční pravidlo**
  - $U = \{X_1, \dots, X_k\}, dom(U) = \{D_1 \cup \dots \cup D_k\}$
  - $card(U) = card(dom(U)) \Rightarrow \forall v \in dom(U), \forall X \in (V - U), X \neq v$
  - hodnoty v Hallově intervalu jsou pro ostatní proměnné nedostupné
- Složitost:**  $O(2^n)$  - hledání všech podmnožin množiny *n* proměnných (naivní)
  - $O(n \log n)$  - kontrola hraničních bodů Hallových intervalů (1998)

učitel	min	max
Jan	3	6
Petr	3	4
Anna	2	5
Ota	2	4
Eva	3	4
Marie	1	6

# Globální podmínky

- Propagace je lokální
  - pracuje se s jednotlivými podmínkami
  - interakce mezi podmínkami je pouze přes domény proměnných
- Jak dosáhnout více, když je silnější propagace drahá?
- Seskupíme několik podmínek do jedné tzv. **globální podmínky**
- Propagaci přes globální podmínku řešíme speciálním algoritmem navrženým pro danou podmínku
- Příklady:
  - all\_different omezení: hodnoty všech proměnných různé
  - serialized omezení: rozvržení úloh zadaných startovním časem a dobou trvání tak, aby se nepřekrývaly

## Prohledávání + konzistence

- Splňování podmínek **prohledáváním** prostoru řešení
  - podmínky jsou užívány pasivně jako test
  - přiřazují hodnoty proměnných a zkouším co se stane
  - vestavěný prohledávací algoritmus Prologu: **backtracking**, triviální: **generuj & testuj**
  - úplná metoda (nalezneme řešení nebo dokážeme jeho neexistenci)
  - zbytečně pomalé (exponenciální): procházím i „evidentně“ špatná ohodnocení
- Konzistenční (propagační) techniky**
  - umožňují odstranění nekonzistentních hodnot z domény proměnných
  - neúplná metoda (v doméně zůstanou ještě nekonzistentní hodnoty)
  - relativně rychlé (polynomiální)
- Používá se **kombinace obou metod**
  - postupné přiřazování hodnot proměnným
  - po přiřazení hodnoty odstranění nekonzistentních hodnot konzistenčními technikami

## Prohledávání do hloubky

- Základní prohledávací algoritmus pro problémy splňování podmínek
- **Prohledávání stavového prostoru do hloubky (*depth first search*)**
- Dvě fáze prohledávání s navracením
  - **dopředná fáze:** proměnné jsou postupně vybírány, rozšiřuje se částečné řešení přiřazením konzistentní hodnoty (pokud existuje) další proměnné
    - po vybrání hodnoty testujeme konzistenci
  - **zpětná fáze:** pokud neexistuje konzistentní hodnota pro aktuální proměnnou, algoritmus se vrací k předchozí přiřazené hodnotě
- Proměnné dělíme na
  - **minulé** – proměnné, které už byly vybrány (a mají přiřazenu hodnotu)
  - **aktuální** – proměnná, která je právě vybrána a je jí přiřazována hodnota
  - **budoucí** – proměnné, které budou vybrány v budoucnosti

## Základní algoritmus prohledávání do hloubky

- Pro jednoduchost proměnné očíslováme a ohodnocujeme je v daném pořadí
- Na začátku voláno jako `labeling(G, 1)`

```

procedure labeling(G, a)
  if a > |uzly(G)| then return uzly(G)
  for  $\forall x \in D_a$  do
    if consistent(G, a) then % consistent(G, a) je nahrazeno FC(G, a), LA(G, a)
      R := labeling(G, a + 1)
      if R  $\neq$  fail then return R
  return fail
end labeling
    
```

Po přiřazení všech proměnných vrátíme jejich ohodnocení

- Procedury `consistent` uvedeme pouze pro binární podmínky

## Backtracking (BT)

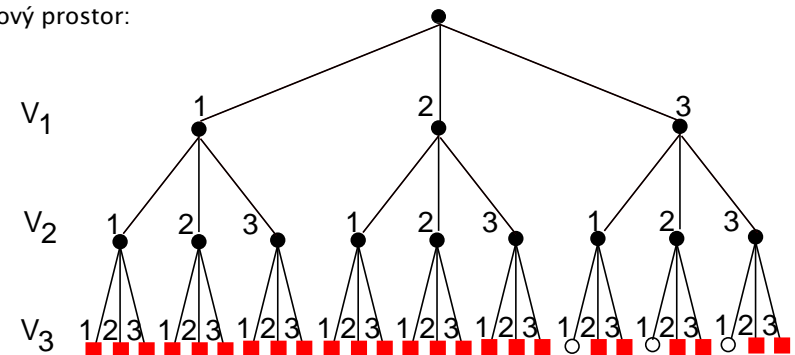
- Backtracking ověřuje v každém kroku konzistenci podmínek vedoucích z minulých proměnných do aktuální proměnné
- Backtracking tedy zajišťuje konzistenci podmínek
  - na všech minulých proměnných
  - na podmínkách mezi minulými proměnnými a aktuální proměnnou
- procedure `BT(G, a)`

```

Q := {(Vi, Va) ∈ hrany(G), i < a} % hrany vedoucí z minulých proměnných do aktuální
Consistent := true
while Q není prázdná ∧ Consistent do
  vyber a smaž libovolnou hranu (Vk, Vm) z Q
  Consistent := not revise(Vk, Vm) % pokud vyřadíme prvek, bude doména prázdná
return Consistent
end BT
    
```

## Příklad: backtracking

- Omezení:  $V_1, V_2, V_3$  in  $1 \dots 3$ ,  $V_1 \neq 3 \times V_3$
- Stavový prostor:



- červené čtverečky: chybný pokus o instanciaci, řešení neexistuje
- nevyplněná kolečka: nalezeno řešení
- černá kolečka: vnitřní uzel, máme pouze částečné přiřazení

## Kontrola dopředu (FC – forward checking)

- FC je rozšíření backtrackingu
- FC navíc zajišťuje konzistenci mezi aktuální proměnnou a budoucími proměnnými, které jsou s ní spojeny dosud nesplněnými podmínkami
- procedure  $FC(G, a)$ 

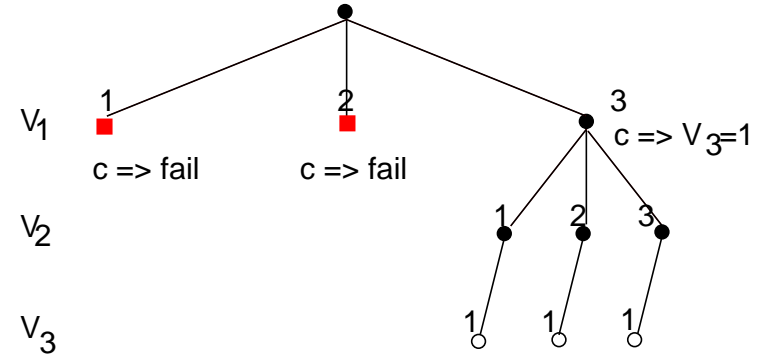
```

Q := {(Vi, Va) ∈ hrany(G), i > a}      % přidání hran z budoucích do aktuální proměnné
Consistent := true
while Q není prázdná ∧ Consistent do
    vyber a smaž libovolnou hranu (Vk, Vm) z Q
    if revise((Vk, Vm)) then
        Consistent := (|Dk| > 0)      % vyprázdnění domény znamená nekonzistenci
return Consistent
end FC

```
- Hrany z minulých proměnných do aktuální proměnné není nutno testovat

## Příklad: kontrola dopředu

- Omezení:  $V_1, V_2, V_3$  in  $1 \dots 3$ ,  $c : V_1\# = 3 \times V_3$
- Stavový prostor:



## Pohled dopředu (LA – looking ahead)

- LA je rozšíření FC, navíc ověřuje konzistenci hran mezi budoucími proměnnými
- procedure  $LA(G, a)$ 

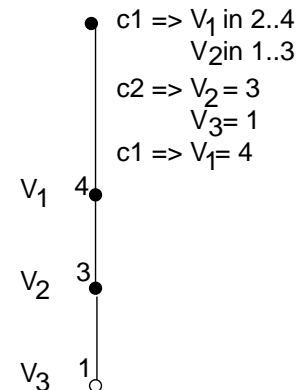
```

Q := {(Vi, Va) ∈ hrany(G), i > a}      % začínáme s hranami do a
Consistent := true
while Q není prázdná ∧ Consistent do
    vyber a smaž libovolnou hranu (Vk, Vm) z Q
    if revise((Vk, Vm)) then
        Q := Q ∪ {(Vi, Vk) | (Vi, Vk) ∈ hrany(G), i ≠ k, i ≠ m, i > a}
        Consistent := (|Dk| > 0)
return Consistent
end LA

```
- Hrany z minulých proměnných do aktuální proměnné opět netestujeme
- Tato LA procedura je založena na AC-3, lze použít i jiné AC algoritmy
- LA udržuje hranovou konzistenci: protože ale  $LA(G, a)$  používá AC-3, musíme zajistit iniciální konzistenci pomocí AC-3 ještě před startem prohledávání

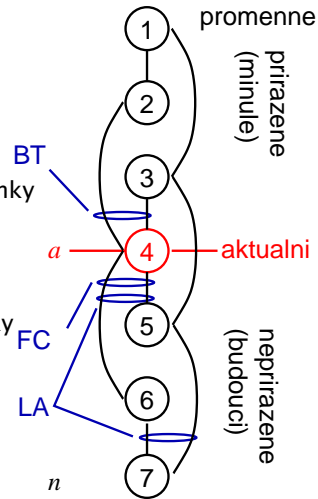
## Příklad: pohled dopředu (pomocí AC-3)

- Omezení:  $V_1, V_2, V_3$  in  $1 \dots 4$ ,  $c1 : V_1\# > V_2$ ,  $c2 : V_2\# = 3 \times V_3$
- Stavový prostor  
(spouští se iniciální konzistence se před startem prohledávání)



## Přehled algoritmů

- **Backtracking (BT)** kontroluje v kroku  $a$  podmínky  $c(V_1, V_a), \dots, c(V_{a-1}, V_a)$  z minulých proměnných do aktuální proměnné
- **Kontrola dopředu (FC)** kontroluje v kroku  $a$  podmínky  $c(V_{a+1}, V_a), \dots, c(V_n, V_a)$  z budoucích proměnných do aktuální proměnné
- **Pohled dopředu (LA)** kontroluje v kroku  $a$  podmínky  $\forall l(a \leq l \leq n), \forall k(a \leq k \leq n), k \neq l : c(V_k, V_l)$  z budoucích proměnných do aktuální proměnné a mezi budoucími proměnnými



## Cvičení

1. Jak vypadá stavový prostor řešení pro následující omezení  
 $A$  in 1..4,  $B$  in 3..4,  $C$  in 3..4,  $B \neq C$ ,  $A \neq C$   
 při použití kontroly dopředu a uspořádání proměnných  $A, B, C$ ? Popište, jaký typ propagace proběhne v jednotlivých uzlech.
2. Jak vypadá stavový prostor řešení pro následující omezení  
 $A$  in 1..4,  $B$  in 3..4,  $C$  in 3..4,  $B \neq C$ ,  $A \neq C$   
 při použití pohledu dopředu a uspořádání proměnných  $A, B, C$ ? Popište, jaký typ propagace proběhne v jednotlivých uzlech.
3. Jak vypadá stavový prostor řešení pro následující omezení  
 $\text{domain}([A, B, C], 0, 1)$ ,  $A \neq B - 1$ ,  $C \neq A * A$   
 při použití backtrackingu a pohledu dopředu a uspořádání proměnných  $A, B, C$ ?  
 Popište, jaký typ propagace proběhne v jednotlivých uzlech.

## Cvičení

1. Ukažte, jak je dosaženo hranové konzistence v následujícím příkladu:  
 $\text{domain}([X, Y, Z], 1, 5)$ ,  $X \neq Y$ ,  $Z \neq Y + 1$ .

## Implementace Prologu

Literatura:

- Matyska L., Toman D.: Implementační techniky Prologu, Informační systémy, (1990), 21–59.  
<http://www.ics.muni.cz/people/matyska/vyuka/lp/lp.html>

## Opakování: základní pojmy

- Konečná množina klauzulí  $H$ lava :- Tělo tvoří **program P**.
- **Hlava** je literál
- **Tělo** je (eventuálně prázdná) konjunkce literálů  $T_1, \dots, T_a, a \geq 0$
- **Literál**  
je tvořen  $m$ -árním predikátovým symbolem ( $m/p$ ) a  $m$  termy (argumenty)
- **Term** je konstanta, proměnná nebo složený term.
- **Složený term**  
s  $n$  termy na místě argumentů
- **Dotaz (cíl)** je neprázdná množina literálů.

## Interpretace

### Deklarativní sémantika:

Hlava platí, platí-li jednotlivé literály těla.

### Procedurální (imperativní) sémantika:

Entry: Hlava::

```
{  
    call T1  
    ;  
    call Ta  
}
```

Volání procedury s názvem Hlava uspěje, pokud uspěje volání všech procedur (literálů) v těle.

### Procedurální sémantika = podklad pro implementaci

## Abstraktní interpret

Vstup: Logický program P a dotaz G.

1. Inicializuj množinu cílů S literály z dotazu G;  $S := G$
2. while (  $S \neq \text{empty}$  ) do
3. Vyber  $A \in S$  a dále vyber klauzuli  $A' :- B_1, \dots, B_n$  ( $n \geq 0$ ) z programu P takovou, že  $\exists \sigma : A\sigma = A'\sigma$ ;  $\sigma$  je nejobecnější unifikátor.  
Pokud neexistuje  $A'$  nebo  $\sigma$ , ukonči cyklus.
4. Nahrad' A v S cíli  $B_1$  až  $B_n$ .
5. Aplikuj  $\sigma$  na G a S.
6. end while
7. Pokud  $S == \text{empty}$ , pak výpočet úspěšně skončil a výstupem je G se všemi aplikovanými substitucemi.  
Pokud  $S \neq \text{empty}$ , výpočet končí neúspěchem.

## Abstraktní interpret – pokračování

Kroky (3) až (5) představují **redukci** (logickou inferenci) cíle A.

Počet redukcí za sekundu (LIPS) == indikátor výkonu implementace

### Věta

Existuje-li instance  $G'$  dotazu G, odvoditelná z programu P v konečném počtu kroků, pak bude tímto interpretem nalezena.

## Nedeterminismus interpretu

1. **Selekční pravidlo:** výběr cíle  $A$  z množiny cílů  $S$ 
  - neovlivňuje výrazně výsledek chování interpretu
2. **Způsob prohledávání stromu výpočtu:** výběr klauzule  $A'$  z programu  $P$ 
  - je velmi důležitý, všechny klauzule totiž nevedou k úspěšnému řešení

### Vztah k úplnosti:

1. Selekční pravidlo neovlivňuje úplnost
  - možno zvolit libovolné v rámci SLD rezoluce
2. Prohledávání stromu výpočtu do šířky nebo do hloubky

### „Prozření“ – automatický výběr správné klauzule

- vlastnost abstraktního interpretu, kterou ale reálné interprety nemají

## Prohledávání do hloubky

1. Vybereme všechny klauzule  $A'_i$ , které je možno unifikovat s literálem  $A$ .
2. Všechny tyto klauzule zapíšeme na zásobník.
3. Redukci provedeme s klauzulí na vrcholu zásobníku.
4. Pokud v nějakém kroku nenajdeme vhodnou klauzuli  $A'$ , vrátíme se k předchozímu stavu (tedy anulujeme aplikace posledního unifikátoru  $\sigma$ ) a vybereme ze zásobníku další klauzuli.
5. Pokud je zásobník prázdný, končí výpočet neúspěchem.
6. Pokud naopak zredukujeme všechny literály v  $S$ , výpočet končí úspěchem.

- Není úplné, tj. nemusí najít všechna řešení
- Nižší paměťová náročnost než prohledávání do šířky
- Používá se v Prologu

## Prohledávání do šířky

1. Vybereme všechny klauzule  $A'_i$ , které je možno unifikovat s literálem  $A$ 
    - necht' je těchto klauzulí  $q$
  2. Vytvoříme  $q$  kopií množiny  $S$
  3. V každé kopii redukujeme  $A$  jednou z klauzulí  $A'_i$ .
    - aplikujeme příslušný nejobecnější unifikátor
  4. V následujících krocích redukujeme všechny množiny  $S_i$  současně.
  5. Výpočet ukončíme úspěchem, pokud se alespoň jedna z množin  $S_i$  stane prázdnou.
- Ekvivalence s abstraktnímu interpretem
    - pokud jeden interpret neuspěje, pak neuspěje i druhý
    - pokud jeden interpret uspěje, pak uspěje i druhý

## Reprezentace objektů

- Beztypový jazyk
- Kontrola „typů“ za běhu výpočtu
- Informace o struktuře součástí objektu

### Typy objektů

- **Primitivní objekty:**
  - konstanta
  - číslo
  - volná proměnná
  - odkaz (reference)
- **Složené (strukturované) objekty:**
  - struktura
  - seznam

## Reprezentace objektů II

Objekt	Příznak
volná proměnná	FREE
konstanta	CONST
celé číslo	INT
odkaz	REF
složený term	FUNCT

Příznaky (tags):

Obsah adresovatelného slova: **hodnota a příznak.**

Primitivní objekty uloženy přímo ve slově

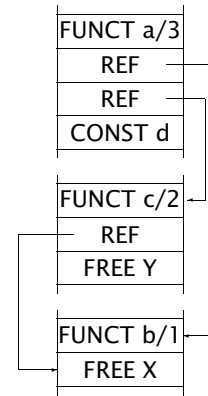
Složené objekty

- jsou instance termu ve zdrojovém textu, tzv. zdrojového termu
- zdrojový term bez proměnných  $\Rightarrow$  každá instancie ekvivalentní zdrojovému termu
- zdrojový term s proměnnými  $\Rightarrow$  dvě instance se mohou lišit aktuálními hodnotami proměnných, jedinečnost zajišťuje kopírování struktur nebo sdílení struktur

## Kopírování struktur

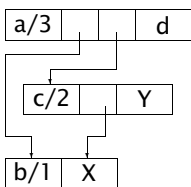
Příklad:

$a(b(X), c(X, Y), d)$ ,



## Kopírování struktur II

- Term F s aritou A reprezentován A+1 slovy:
  - funktor a arita v prvním slově
  - 2. slovo nese první argument (resp. odkaz na jeho hodnotu) :
  - A+1 slovo nese hodnotu A-tého argumentu
- Reprezentace vychází z orientovaných acyklických grafů:



- Vykopírována každá instance  $\Rightarrow$  **kopírování struktur**
- Termy ukládány na **globální zásobník**

## Sdílení struktur

- Vychází z myšlenky, že při reprezentaci je třeba řešit přítomnost proměnných
- Instance termu
  - < kostra\_termu; rámeček >
  - kostra\_termu je zdrojový term s očíslovanými proměnnými
  - rámeček je vektor aktuálních hodnot těchto proměnných
    - $i$ -tá položka nese hodnotu  $i$ -té proměnné v původním termu

## Sdílení struktur II

Příklad:

$a(b(X), c(X, Y), d)$

reprezentuje

$\langle a(b(\$1), c(\$1, \$2), d) ; [FREE, FREE] \rangle$

kde symbolem \$i označujeme i-tou proměnnou.

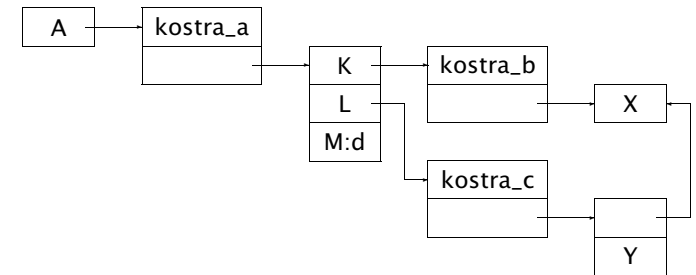
**Implementace:**

$\langle \&kostra\_termu; \&rámec \rangle$  (& vrací adresu objektu)

Všechny instance sdílí společnou kostru\_termu  $\Rightarrow$  **sdílení struktur**

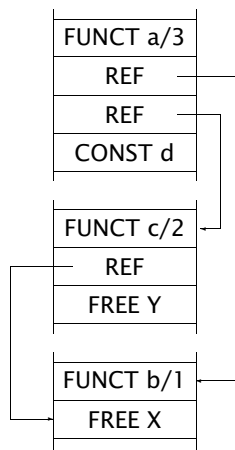
## Srovnání: příklad

- Naivní srovnání: sdílení paměťově méně náročné
- Platí ale pouze pro rozsáhlé termy přítomné ve zdrojovém kódu
- Postupná tvorba termů:  
 $A = a(K, L, M), K = b(X), L = c(X, Y), M = d$ 
  - Sdílení termů:



## Srovnání: příklad – pokračování

- Kopírování struktur:  $A = a(K, L, M), K = b(X), L = c(X, Y), M = d$



tj. identické jako přímé vytvoření termu  $a(b(X), c(X, Y), d)$

## Srovnání II

- **Složitost algoritmů pro přístup k jednotlivým argumentům**
  - sdílení struktur: nutná víceúrovňová nepřímá adresace
  - kopírování struktur: bez problémů
  - jednodušší algoritmy usnadňují i optimalizace
- **Lokalita přístupů do paměti**
  - sdílení struktur: přístupy rozptýleny po paměti
  - kopírování struktur: lokalizované přístupy
  - při stránkování paměti – rozptýlení vyžaduje přístup k více stránkám
- Z praktického hlediska neexistuje mezi těmito přístupy zásadní rozdíl



## Řízení výpočtu

- **Dopředný výpočet**
  - po úspěchu (úspěšná redukce)
    - jednotlivá volání procedur skončí úspěchem
  - klasické volání rekurzivních procedur
- **Zpětný výpočet (backtracking)**
  - po neúspěchu vyhodnocení literálu (neúspěšná redukce)
    - nepodaří se unifikace aktuálních a formálních parametrů hlavy
  - návrat do bodu, kde zůstala nevyzkoušená alternativa výpočtu
    - je nutná obnova původních hodnot jednotlivých proměnných
    - po nalezení místa s dosud nevyzkoušenou klauzulí pokračuje dále dopředný výpočet

## Aktivační záznam

- Volání (=aktivace) procedury
- Aktivace **sdílí společný kód**, liší se obsahem **aktivačního záznamu**
- Aktivační záznam uložen na **lokálním zásobníku**
- Dopředný výpočet
  - stav výpočtu v okamžiku volání procedury
  - aktuální parametry
  - lokální proměnné
  - pomocné proměnné ('a la registry)
- Zpětný výpočet (backtracking)
  - hodnoty parametrů v okamžiku zavolání procedury
  - následující klauzule pro zpracování při neúspěchu

## Aktivační záznam a roll-back

- Neúspěšná klauzule mohla nainstanciovat nelokální proměnné
  - $a(X) :- X = b(c, Y), Y = d. \quad ?- W = b(Z, e), a(W).$  (viz instanciace Z)
- Při návratu je třeba obnovit (**roll-back**) původní hodnoty proměnných
- Využijeme vlastností logických proměnných
  - instanciovat lze pouze volnou proměnnou
  - jakmile proměnná získá hodnotu, nelze ji změnit jinak než návratem výpočtu $\Rightarrow$  původní hodnoty všech proměnných odpovídají volné proměnné
- **Stopa (trail)**: zásobník s adresami instanciováných proměnných
  - ukazatel na aktuální vrchol zásobníku uchovávan v aktivačním záznamu
  - při neúspěchu jsou hodnoty proměnných na stopě v úseku mezi aktuálním a uloženým vrcholem zásobníku změněny na „volná“
- **Globální zásobník**: pro uložení složených termů
  - ukazatel na aktuální vrchol zásobníku uchovávan v aktivačním záznamu
  - při neúspěchu vrchol zásobníku snížen podle uschované hodnoty v aktivačním záznamu

## Okolí a bod volby

Aktivační záznam úspěšně ukončené procedury nelze odstranit z lokálního zásobníku  $\Rightarrow$  **rozdělení aktivačního záznamu**:

- **okolí (environment)** – informace nutné pro dopředný běh programu
- **bod volby (choice point)** – informace nezbytné pro zotavení po neúspěchu
- ukládány na lokální zásobník
- samostatně provázány (odkaz na předchozí okolí resp. bod volby)

**Důsledky:**

- samostatná práce s každou částí aktivačního záznamu (optimalizace)
- alokace pouze okolí pro deterministické procedury
- možnost odstranění okolí po úspěšném vykonání (i nedeterministické) procedury (pokud okolí následuje po bodu volby dané procedury)
  - pokud je okolí na vrcholu zásobníku

## Řez

- Prostředek pro ovlivnění běhu výpočtu programátorem
    - $a(X) :- b(X), !, c(X).$        $a(3).$   
     $b(1).$        $b(2).$   
     $c(1).$        $c(2).$
  - Řez: neovlivňuje dopředný výpočet, má vliv pouze na zpětný výpočet
  - Odstranění alternativních větví výpočtu
    - ⇒ odstranění odpovídajících bodů volby
      - tj. odstranění bodů volby mezi současným vrcholem zásobníku a bodem volby procedury, která řez vyvolala (včetně bodu volby procedury s řezem)
    - ⇒ změna ukazatele na „nejmladší“ bod volby
- ⇒ Vytváření deterministických procedur
- ⇒ Optimalizace využití zásobníku

## Interpret – Základní princip

1. Vyber redukovaný literál („první“, tj. nejlevější literál cíle)
2. Lineárním průchodem od začátku databáze najdi klauzuli, jejíž hlava má stejný funktor a stejný počet argumentů jako redukovaný literál
3. V případě nalezení klauzule založ bod volby procedury
4. Založ dále okolí první klauzule (velikost odvozena od počtu lokálních proměnných v klauzuli)
5. Proved' unifikaci literálu a hlavy klauzule
6. Úspěch ⇒ přidej všechny literály klauzule k cíli („doleva“, tj. na místo redukovaného literálu).  
Tělo prázdné ⇒ výpočet se s úspěchem vrací do klauzule, jejíž adresa je v aktuálním okolí.
7. Neúspěch unifikace ⇒ z bodu volby se obnoví stav a pokračuje se v hledání další vhodné klauzule v databázi.
8. Pokud není nalezena odpovídající klauzule, výpočet se vrací na předchozí bod volby (krátí se lokální i globální zásobník).
9. Výpočet končí neúspěchem: neexistuje již bod volby, k němuž by se výpočet mohl vrátit.
10. Výpočet končí úspěchem, jsou-li úspěšně redukovány všechny literály v cíli.

## Interpret Prologu

Základní principy:

- klauzule uloženy jako termy
- **programová databáze**
  - pro uložení klauzulí
  - má charakter haldy
    - umožňuje modifikovatelnost prologovských programů za běhu (assert)
- klauzule zřetězeny podle pořadí načtení
  - triviální zřetězení

Vyhodnocení dotazu: volání procedur řízené unifikací

## Interpret – vlastnosti

- Lokální i globální zásobník
  - při dopředném výpočtu roste
  - při zpětném výpočtu se zmenšuje

Lokální zásobník se může zmenšit při dopředném úspěšném výpočtu deterministické procedury.

- Unifikace argumentů hlavy – obecný unifikační algoritmus  
Současně poznačí adresy instanciovanych proměnných na stopu.

- „Interpret“:

```
interpret(Query, Vars) :- call(Query), success(Query, Vars).  
interpret(_, _) :- failure.
```

- dotaz vsazen do kontextu této speciální nedeterministické procedury
- tato procedura odpovídá za korektní reakci systému v případě úspěchu i neúspěchu

## Optimalizace: Indexace

- Zřetězení klauzulí podle pořadí načtení velmi neefektivní
- Provázání klauzulí se stejným funktorem a aritou hlavy (tvoří jednu **proceduru**)
  - tj., **indexace procedur**
- Hash tabulka pro vyhledání první klauzule
- Možno rozhodnout (parciálně) determinismus procedury

## Indexace argumentů

$a(1) :- q(1).$

$a(a) :- b(X).$

$a([A|T]) :- c(A, T).$

- Obecně nedeterministická
- Při volání s alespoň částečně instanciovaným argumentem vždy deterministická (pouze jedna klauzule může uspět)
- **Indexace podle prvního argumentu**

Základní typy zřetězení:

- podle pořadí klauzulí (aktuální argument je volná proměnná)
- dle konstant (aktuální je argument konstanta)
- formální argument je seznam (aktuální argument je seznam)
- dle struktur (aktuální argument je struktura)

## Indexace argumentů II

- Složitější indexační techniky
  - podle všech argumentů
  - podle nejvíce diskriminujícího argumentu
  - kombinace argumentů (indexové techniky z databází)
    - zejména pro přístup k faktům

## Tail Recursion Optimization, TRO

Iterace prováděna pomocí rekurze  $\Rightarrow$  lineární paměťová náročnost cyklů

**Optimalizace koncové rekurze (*Tail Recursion Optimisation*), TRO:**

Okolí se odstraní **před** rekurzivním voláním posledního literálu klauzule, pokud je klauzule resp. její volání deterministické.

Řízení se nemusí vracet:

- v případě úspěchu se rovnou pokračuje
- v případě neúspěchu se vrací na předchozí bod volby („nad“ aktuální klauzulí)
  - aktuální klauzule nemá dle předpokladu bod volby

Rekurzivně volaná klauzule může být volána přímo z kontextu volající klauzule.

## TRO – příklad

Program:

```
append([], L, L).
```

```
append([A|X], L, [A|Y]) :- append(X, L, Y).
```

Dotaz:

```
?- append([a,b,c], [x], L).
```

append volán rekurzivně 4krát

- bez TRO: 4 okolí, lineární paměťová náročnost
- s TRO: 1 okolí, konstatní paměťová náročnost

## Optimalizace posledního volání

TRO pouze speciální případ

obecně **optimalizace posledního volání** (*Last Call Optimization*), LCO

Okolí (před redukcí posledního literálu)

odstraňováno vždy, když leží na vrcholu zásobníku.

### Nutné úpravy interpretu

- disciplína směřování ukazatelů
  - vždy „mladší“ ukazuje na „starší“ („mladší“ budou odstraněny dříve)
  - z lokálního do globálního zásobníku

vyhneme se vzniku „visících odkazů“ při předčasném odstranění okolí

- „globalizace“ lokálních proměnných: lokální proměnné posledního literálu
  - nutno přesunout na globální zásobník
  - pouze pro neinstanciované proměnné

## Překlad

## Překlad

- Motivace:
  - dosažení vyšší míry optimalizace
  - kompaktní kód
  - částečná nezávislost na hardware
- Etapy překladu:
  1. zdrojový text ⇒ kód abstraktního počítače
  2. kód abstraktního počítače ⇒ kód (instrukce) cílového počítače
- Výhody:
  - snazší přenos jazyka (nutno přepsat jen druhou část)
  - kód abstraktního počítače možno navrhnout s ohledem na jednoduchost překladu; prostor pro strojově nezávislou optimalizaci
- Překlad Prologu založen na principu existence abstraktního počítače  
V dalším se věnujeme jeho odvození a vlastnostem

## Parciální vyhodnocení

- Jak navrhnout **Warrenův abstraktní počítač**?
  - prostřednictvím parciálního vyhodnocení
- **Parciální vyhodnocení**
  - forma zpracování programu, tzv. transformace na úrovni zdrojového kódu
  - dosazení známých hodnot vstupních parametrů a vyhodnocení všech operací nad nimi
    - příklad: vyhodnocení aritmetických výrazů nad konstantami

## Parciální vyhodnocení – příklad

$a(X,Y) :- b(X), c(X,Y).$        $a(X,Y) :- b(Y), c(Y,X).$

$b(1).$     $b(2).$     $b(3).$     $b(4).$

$c(1,2).$     $c(1,3).$     $c(1,4).$     $c(2,3).$     $c(2,4).$     $c(3,4).$

Dotaz ?-  $a(2,Z).$

Ize společně s uvedeným programem parciálně vyhodnotit na nový program

$a'(3).$     $a'(4).$     $a'(1).$

a nový dotaz

?-  $a'(Z).$

Je evidentní, že dotaz nad parciálně vyhodnoceným programem bude zpracován mnohem rychleji (efektivněji) než v případě původního programu.

## Parciální vyhodnocení II

**Konstrukce překladače:** parciálním vyhodnocením interpretu

**Problémy:**

- příliš složitá operace
  - vyhodnocení se musí provést vždy znovu pro každý nový program
- výsledný program příliš rozsáhlý
- nedostatečná dekompozice
  - zejména při použití zdrojového jazyka jako implementačního jazyka interpretu

**Vhodnější:**

- využití („ručního“) parciálního vyhodnocení pro návrh abstraktního počítače
  1. nalezení operací zdrojového jazyka, které lze dekomponovat do jednodušších operací
  2. dekomponujeme tak dlouho, až jsou výsledné operace dostatečně jednoduché nebo již neexistují informace pro parciální vyhodnocení

## Parciální vyhodnocení Prologu

Cílová operace: **unifikace**.   Důvod:

- řízení výpočtu poměrně podrobně i v interpretu
- unifikace v interpretu atomickou operací
- unifikace v interpretu nahrazuje řadu podstatně jednodušších operací (testy, přiřazení, předání a převzetí parametrů . . .)
- většina unifikací nevyžaduje obecnou unifikaci a lze je nahradit jednoduššími operacemi

**Zviditelnění unifikace: transformací zdrojového programu**

- termíny reprezentujeme kopírováním struktur na globálním zásobníku
- parametry procedur jsou vždy umístěny na globální zásobník (predikátem put/2) a předávány jsou pouze adresy
- formálním parametrem procedury jsou pouze volné proměnné, které se v hlavě vyskytují pouze jednou
- všechny unifikace jsou explicitně zachyceny voláním predikátu uni fy/2

## Explicitní unifikace

Příklad: `append/3` s explicitní unifikací:

```
append(A1, A2, A3) :- unify(A1, []),      | append([], L, L).
                        unify(A2, L),      |
                        unify(A3, L).      |
append(A1, A2, A3) :- unify(A1, [A|X]),   | append([A|X], L, [A|Y]) :-
                        unify(A2, L),      |
                        unify(A3, [A|Y]),  |
                        put(X, B1),        | append(X, L, Y).
                        put(L, B2),        |
                        put(Y, B3),        |
                        append(B1, B2, B3). |
```

Cíl: parciálně vyhodnotit predikáty `unify/2` a `put/2`

## unify pro volnou proměnnou

`unify(A, T)` unifikuje term na adrese `A` (aktuální parametr) s termem `T` (formální parametr). Podle hodnoty `T` mohou nastat následující 4 případy:

1) `T` je volná proměnná: výsledkem je instanciac

```
unify(A, T) :- var(T),
              ( var(A), create_var(A)
              ; true ),
              T := $addr$(A).
```

Disjunkce garantuje, že `A` je korektní adresa na globálním zásobníku: nutný run-time test, tedy nelze využít při parc. překladu. Lze proto přepsat na

```
unify(A, T) :- var(T),
              unify_var(A, T).
```

kde `unify_var/2` vloží do `T` odkaz nebo založí novou proměnnou.

## Pomocné termy a predikáty

- term `$addr$(A)` – odkaz na objekt s adresou `A`
- predikát `i_s_addr(P, V)` – je-li `P` ve tvaru `$addr$(A)`, pak `V` se unifikuje s hodnotou slova na adrese `A` (jinak predikát selže)
- predikát `:=(X, T)` – přiřadí volné proměnné `X` term `T`;  
`X` musí být volná proměnná.
- predikát `repres(A, Tag, V)` – uloží do proměnné `Tag` příznak a do proměnné `V` hodnotu slova na adrese `A`.  
`A` musí být adresa na globálním zásobníku,  
`Tag` i `V` musí být volné proměnné.
  - příznak: informace o struktuře součástí objektu  
volná proměnná `FREE`, konstanta `CONST`, celé číslo `INT`, odkaz `REF`, složený term `FUNCT`
- je-li `A` adresa a `i` celočíselná konstanta, pak výraz `A+i` reprezentuje adresu o `i` slov vyšší (ukazatelová aritmetika)

## unify pro konstantu

2) `T` je konstanta: výsledkem je test nebo přiřazení

```
unify(A, T) :-
  atomic(T),
  ( ( var(A), create_var(A), instantiate_const(A, T) )
  ; ( repres(A, Tag, Value), Tag == 'FREE', instantiate_const(A, T)
      ; Tag == 'CONST', Value == T )
  ).
```

kde `instantiate_const/2` uloží do slova s adresou `A` hodnotu `T`.

Opět možno přepsat do kompaktního tvaru

```
unify(A, T) :-
  atomic(T),
  unify_const(A, T).
```

kde `unify_const/2` provede příslušný test nebo přiřazení.

## unify pro složený term

3) T je složený term: dvoufázové zpracování, v první fázi test nebo založení funktoru, v druhé rekurzivní unifikace argumentů

```
unify(A,T) :-
    struct(T),
    functor(T,F,N),
    unify_struct(F,N,A),
    T =.. [_|T1],
    unify_args(T1,A+1).
```

Predikát unify\_struct/3 je analogický výše použitým predikátům unify\_var/2 a unify\_const/2.

```
Druhá fáze: unify_args([],_).
            unify_args([T|T1], A) :-
                unify(A,T),
                unify_args(T1,A+1).
```

## unify pro odkaz

4) T je odkazem: nutno použít obecnou unifikaci (není žádná informace pro parciální vyhodnocení)

```
unify(A,T) :-
    is_addr(T,P),
    unification(A,P).
```

## put

Parametry procedur jsou vždy umístěny na globální zásobník predikátem put/2 a předávány jsou pouze adresy.

Predikát put/2 je jednodušší (nikdy nepotřebuje unifikaci)

```
put(T,B) :-
    is_addr(T,B).           % T je odkaz

put(T,B) :-
    var(T),                 % T je proměnná
    create_var(B),
    T := $addr$(B).

put(T,B) :-
    atomic(T),             % T je konstanta
    create_const(B,T).

put(T,B) :-
    struct(T),             % T je struktura
    create_struct(B,T).
```

## První klauzule append/3

Parciální vyhodnocení první klauzule programu append/3

```
append(A1, A2, A3) :- unify(A1,[]),      | append([],L,L).
                       unify(A2,L),      |
                       unify(A3,L).      |
```

upraví

unify(A1,[]) na unify\_const(A1,[])

unify(A2,L) na L:=\$addr\$(A2)

unify(A3,L) na is\_addr(L,T), unification(T,A3)

posloupnost L:=\$addr\$(A2), is\_addr(L,T) odpovídá přejmenování T na A2

⇒ není nutné vytvářet novou proměnnout T

⇒ stačí provést unification(A2,A3)

## Výsledný tvar append/3

```
append(A1, A2, A3) :-
    unify_const(A1, []),
    unification(A2,A3).
append(A1, A2, A3) :-
    unify_struct('.',2,A1),
    unify_var(A,A1+1),
    unify_var(X,A1+2),
    unify_var(L,A2),
    unify_struct('.',2,A3),
    unification(A1+1,A3+1),
    unify_var(Y,A3+2),

    append(A1+2,A2,A3+2).

append(A1, A2, A3) :-
    unify(A1, []),
    unify(A2,L), unify(A3,L).
append(A1, A2, A3) :-
    unify(A1, [A|X]),
    unify(A2,L),
    unify(A3, [A|Y]),

    put(X,B1), put(L,B2), put(Y,B3),
    append(B1,B2,B3).
```

Většina původních unifikací převedena na jednodušší operace;  
unifikace v posledním kroku je nezbytná (důsledkem dvojího výskytu proměnné)

## Jiný příklad

```
a(c,s(f),d,X) :- g(X).
```

Procedurální pseudokód (testy a přiřazení) a kód abstraktního počítače:

```
procedure a(X,Y,Z,A) is
    if ( X == 'c' &&
        ( is_struct(Y,'s',1) &&
          first_arg(Y) == 'f' ) &&
        Z == 'd' )
    then
        call g(A)
    else
        call fail
end procedure

a(A1, A2, A3, A4) :-
    unify_const(c,A1),
    unify_struct(s,1,A2),
    unify_const(f,A2+1),
    unify_const(d,A3),
    unify_var(A,A4),
    g(A4).
```

tj. posloupnost testů jako v procedurálním jazyce

Vyzkoušejte si: delete(X, [Y|T], [Y|T1]) :- delete(X, T, T1).

## Warrenův abstraktní počítač, WAM I.

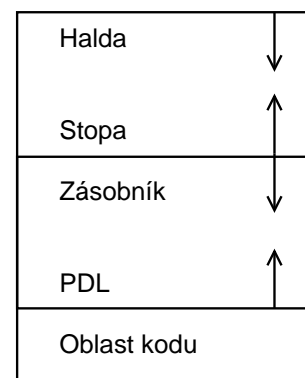
Navržen D.H.D. Warrenem v roce 1983, modifikace do druhé poloviny 80. let

Datové oblasti:

- **Oblast kódu** (programová databáze)
  - separátní oblasti pro uživatelský kód (modifikovatelný) a vestavěné predikáty (nemění se)
  - obsahuje rovněž všechny statické objekty (texty atomů a funktorů apod.)
- **Lokální zásobník (Stack)**
- **Stopa (Trail)**
- **Globální zásobník n. halda(Heap)**
- **Pomocný zásobník (Push Down List, PDL)**
  - pracovní paměť abstraktního počítače
  - použitý v unifikaci, syntaktické analýze apod.

## Rozmístění datových oblastí

- Příklad konfigurace



- Halda i lokální zásobník musí růst stejným směrem
  - lze jednoduše porovnat stáří dvou proměnných srovnáním adres využívá se při zabránění vzniku visících odkazů



## Registry WAMu

### ▪ Stavové registry:

**P** čítač adres (**P**rogram counter)

**CP** adresa návratu (**C**ontinuation **P**ointer)

**E** ukazatel na nejmladší okolí (**E**nvironment)

**B** ukazatel na nejmladší bod volby (**B**acktrack point)

**TR** vrchol stopy (**T**Rail)

**H** vrchol haldy (**H**eap)

**HB** vrchol haldy v okamžiku založení posledního bodu volby (**H**eap on **B**acktrack point)

**S** ukazatel, používaný při analýze složených termů (**S**tructure pointer)

**CUT** ukazatel na bod volby, na který se řezem zařizne zásobník

▪ **Argumentové registry:**  $A_1, A_2, \dots$  (při předávání parametrů n. pracovní registry)

▪ **Registry pro lokální proměnné:**  $Y_1, Y_2, \dots$

- abstraktní znázornění lok. proměnných na zásobníku

## Typy instrukcí WAMu

▪ **put instrukce** – příprava argumentů před voláním podcíle

- žádná z těchto instrukcí nevolá obecný unifikací algoritmus

▪ **get instrukce** – unifikace aktuálních a formálních parametrů

- vykonávají činnost analogickou instrukcím `unify` u `parc.` vyhodnocení
- obecná unifikace pouze při `get_value`

▪ **unify instrukce** – zpracování složených termů

- jednoargumentové instrukce, používají registr `S` jako druhý argument
- počáteční hodnota `S` je odkaz na 1. argument
- volání instrukce `unify` zvětší hodnotu `S` o jedničku
- obecná unifikace pouze při `unify_value` a `unify_local_value`

▪ **Indexační instrukce** – indexace klauzulí a manipulace s body volby

▪ **Instrukce řízení běhu** – předávání řízení a explicitní manipulace s okolím

## Instrukce put a get: příklad

Příklad:  $a(X, Y, Z) :- b(f, X, Y, Z).$

```
get_var    A1, A5
get_var    A2, A6
get_var    A3, A7
put_const  A1, f
put_value  A2, A5
put_value  A3, A6
put_value  A4, A7
execute   b/4
```

## WAM – optimalizace

1. Indexace klauzulí

2. Generování optimální posloupnosti instrukcí WAMu

3. Odstranění redundancí při generování cílového kódu.

▪ Příklad:  $a(X, Y, Z) :- b(f, X, Y, Z).$

naivní kód (vytvoří kompilátor pracující striktně zleva doprava) vs.

optimalizovaný kód (počet registrů a tedy i počet instrukcí/přesunů v paměti snížen):

```
get_var    A1, A5           |           get_var    A3, A4
get_var    A2, A6           |           get_var    A2, A3
get_var    A3, A7           |           get_var    A1, A2
put_const  A1, f            |           put_const  A1, f
put_value  A2, A5           |           execute   b/4
put_value  A3, A6           |
put_value  A4, A7           |
execute    b/4              |
```

## Instrukce WAMu

get instrukce	put instrukce	unify instrukce
get_var Ai,Y	put_var Ai,Y	unify_var Y
get_value Ai,Y	put_value Ai,Y	unify_value Y
get_const Ai,C	put_unsafe_value Ai,Y	unify_local_value Y
get_nil Ai	put_const Ai,C	unify_const C
get_struct Ai,F/N	put_nil Ai	unify_nil
get_list Ai	put_struct Ai,F/N	unify_void N
	put_list Ai	

instrukce řízení	indexační instrukce
allocate	try_me_else Next try Next
deallocate	retry_me_else Next retry Next
call Proc/N,A	trust_me_else fail trust fail
execute Proc/N	
proceed	cut_last switch_on_term Var,Const,List,Struct
	save_cut Y switch_on_const Table
	load_cut Y switch_on_struct Table

## WAM – indexace

- Provázání klauzulí: instrukce `XX_me_else`:
  - první klauzule: `try_me_else`; založí bod volby
  - poslední klauzule: `trust_me_else`; zruší nejmladší bod volby
  - ostatní klauzule: `retry_me_else`; znovu použije nejmladší bod volby po neúspěchu
- Provázání podmnožiny klauzulí (podle argumentu):
  - `try`
  - `retry`
  - `trust`
- „Rozskokové“ instrukce (dle typu a hodnoty argumentu):
  - `switch_on_term` Var, Const, List, Struct  
výpočet následuje uvedeným návěstím podle typu prvního argumentu
  - `switch_on_YY`: hashovací tabulka pro konkrétní typ (konstanta, struktura)

## Příklad indexace instrukcí

Proceduře

```

a(atom) :- body1.
a(1) :- body2.
a(2) :- body3.
a([X|Y]) :- body4.
a([X|Y]) :- body5.
a(s(N)) :- body6.
a(f(N)) :- body7.

```

### odpovídají instrukce

```

a:   switch_on_term L1, L2, L3, L4   L5a: body2
L2:  switch_on_const atom :L1a      L6:  retry_me_else L7
      1 :L5a                        L6a: body3
      2 :L6a                        L7:  retry_me_else L8
L3:  try L7a                        L7a: body4
      trust L8a                     L8:  retry_me_else L9
L4:  switch_on_struct s/1 :L9a       L8a: body5
      f/1 :L10a                     L9:  retry_me_else L10
L1:  try_me_else L5                 L9a: body6
L1a: body1                         L10: trust_me_else fail
L5:  retry_me_else L6               L10a: body7

```

## WAM – řízení výpočtu

- `execute Proc`: ekvivalentní příkazu `goto`
  - `proceed`: zpracování faktů
  - `allocate`: alokuje okolí (pro některé klauzule netřeba, proto explicitně generováno)
  - `deallocate`: uvolní okolí (je-li to možné, tedy leží-li na vrcholu zásobníku)
  - `call Proc,N`: zavolá Proc, N udává počet lok. proměnných (odpovídá velikosti zásobníku)  
Možná optimalizace: vhodným uspořádáním proměnných lze dosáhnout postupného zkracování lokálního zásobníku
- ```

a(A,B,C,D) :- b(D), c(A,C), d(B), e(A), f.
generujeme instrukce
allocate
call b/1,4
call c/2,3
call d/1,2
call e/1,1
deallocate
execute f/0

```