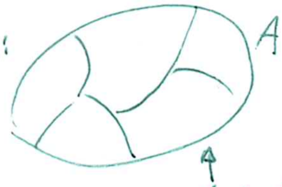
Df: <u>Ekvivalenční třída</u> prvku $x \in A$: $R[x] := \{a \in A \mid aRx\}$

nebo xRa ... to je díky symetrii totéž

👁 $\forall x \in A: x \in R[x]$ díky reflexivitě

Věta: Nechť R je ekvivalence na množině A.
① $\forall x \in A: R[x] \neq \emptyset$.
② $\forall x,y \in A$: buď $R[x] = R[y]$, nebo $R[x] \cap R[y] = \emptyset$.
③ $\{R[x] \mid x \in A\}$ jednoznačně určuje R.

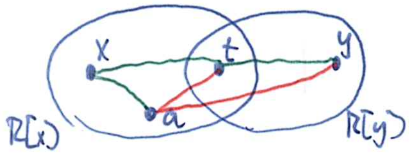
Představa:



Dk: ① triviální díky $x \in R[x]$
② ukážeme, že pokud $R[x] \cap R[y] \neq \emptyset$, pak $R[x] \subseteq R[y]$ ... prohozením x,y získáme $R[x] \supseteq R[y]$ a zkombinováním inkluzí rovnost.

Nechť $\underbrace{t \in R[x] \cap R[y]}_{tRx \,\&\, tRy}$ a $\underbrace{a \in R[x]}_{\text{tedy } aRx}$. Ukážeme, že $\underbrace{a \in R[y]}_{aRy}$.

Obrázkem:



$aRx \longrightarrow aRt \longrightarrow aRy$
$tRx \Rightarrow xRt \nearrow aRt$
$tRy \nearrow aRy$

③ xRy rozhodneme podle $x \in R[y]$.

👁 Třídy pro naše příklady ekvivalencí: ② rovnost mod n → n zbytkových tříd
⑥ neorient. dosažitelnost → komponenty souvislosti
⑦ orient. — " — → — " — silné souvislosti

Df: Množinový systém $\mathcal{S} \subseteq 2^X$ je <u>rozklad</u> množiny X ≡
① $\forall A \in \mathcal{S}: A \neq \emptyset$
② $\forall A,B \in \mathcal{S}: A \neq B \Rightarrow A \cap B = \emptyset$
③ $\bigcup_{A \in \mathcal{S}} A = X$

ekviv. třídy tvoří rozklad, naopak ke každému rozkladu vytvoříme ekvivalenci "být v téže třídě", tedy $aRb \equiv \exists A \in \mathcal{S}: \{a,b\} \subseteq A$

👁 Pozor, někdy se více hodí rozklad dovolující prázdné třídy, třeba u bipart. grafů rozklad V.

<u>Na okraj:</u> Relace typu "být si blízko" nebývají ekvivalence – nejsou tranzitivní.
Třeba na $\mathbb{R}$: $xBy \equiv |x-y| \leq 1$. Tehdy $1B2$ a $2B3$, ale $\neg 1B3$.

<u>Motivace:</u> Teď zkusíme zobecnit "je menší (nebo rovno)"

Df: Relace R na množině A je <u>(částečné) uspořádání</u> ≡
R je reflexivní, antisymetrická a tranzitivní.

Df: Prvky $a,b \in A$ jsou <u>porovnatelné</u> ≡ aRb nebo bRa.

Často značíme $\leq$, $\preceq$, $\sqsubseteq$ apod.

Uspořádání je <u>lineární</u> (úplné) ≡ každé 2 prvky jsou porovnatelné.

Df: <u>Částečně uspořádaná množina</u> (ČUM) je dvojice (A,R), kde A je množina a R uspořádání na A.

Podobně: Ostré uspořádání $a < b \equiv a \leq b \;\&\; a \neq b$

$\hookrightarrow$ ireflexivní ($\forall x\; x \not< x$), antisymetrické, tranzitivní

Příklady:

1. $(\mathbb{N}, \leq)$ lineární
2. $(\mathbb{Q}, \leq)$ lineární
3. id_X žádné 2 různé prvky nejsou porovnatelné
4. $(\mathbb{N}^+, \backslash)$ - dělitelnost $2\backslash 4$, $4 \backslash 12$, ale $4, 6$ neporovnatelné

   pozor: $\backslash$ na $\mathbb{Z}$ není uspoř., protože $-2\backslash 2 \;\&\; 2 \backslash -2$
5. $(2^X, \subseteq)$ - inkluze množin pro $X = \{1,2,3\}$: $\{1\} \subseteq \{1,3\}$, kdežto $\{1,3\}, \{2,3\}$ neporov.
6. lexikografické uspořádání: pro $(A, \leq)$ ČUM definujeme $\leq_{LEX}$ na A^2:

   $(x_1, x_2) \leq_{LEX} (y_1, y_2) \equiv x_1 < y_1 \vee (x_1 = y_1 \;\&\; x_2 \leq y_2)$

   - na A^k: $(x_1 \ldots x_k) \leq_{LEX} (y_1 \ldots y_k) \equiv x_1 \ldots x_k = y_1 \ldots y_k \;\vee$
     $\exists i: 1 \leq i \leq k \;\&\; x_1 = y_1 \;\&\; \ldots \;\&\; x_{i-1} = y_{i-1} \;\&\; x_i < y_i$
   - na A^* (množina všech konečných posloupností prvků z A, tedy řetězců znaků z A):
     $(x_1 \ldots x_k) \leq_{LEX} (y_1 \ldots y_\ell)$ pro $n := \min(k, \ell)$ je
     $(x_1 \ldots x_n) <_{LEX} (y_1 \ldots y_n) \;\vee$
     $(x_1 \ldots x_n) = (y_1 \ldots y_n) \;\&\; k \leq \ell$ $\Big\}$ $ab < abc < ac$

Znázornění: Hasseův diagram

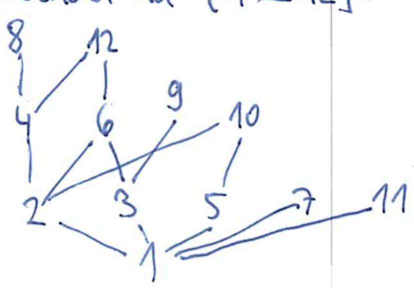
např.

co je nahoře, je větší & hrany plynoucí z tranzitivity nekreslíme

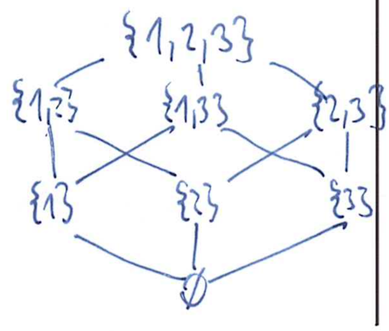
Df: Relace bezprostředního předchůdce pro ČUM $(X, \leq)$ je $\lhd$ na X t.ž.

$\forall x, y \in X: x \lhd y \equiv x < y \;\&\; \nexists z \in X: x < z \;\&\; z < y$

- Pro dělitelnost na $\{1 \ldots 12\}$:



- Pro $(2^{\{1,2,3\}}, \subseteq)$:



Df: Pro ČUM $(X, \leq)$ je prvek $x \in X$:

- nejmenší $\equiv \forall y \in X: x \leq y$ 👁 existuje nejvýše jeden
- minimální $\equiv \nexists y \in X: y < x$
- podobně největší a maximální

👁 v lineárně uspoř. množině je nejmenší totéž co minimální, obecně nejmenší $\Rightarrow$ minimální, ale ne naopak.

Df: $A \subseteq X$ je:

- řetězec $\equiv \forall a, b \in A$ jsou porovnatelné
- antiřetězec $\equiv \forall a, b \in A, a \neq b$ jsou neporovnatelné

👁 množina všech min. prvků tvoří antiřetězec

Věta: Každá konečná neprázdná ČUM má aspoň 1 minimální prvek. ㉖

pro nekonečné zjevně neplatí – viz třeba $(\mathbb{Q}, \leq)$

Dk #1: Nechť $(X, \leq)$ je ČUM.
Zvolme $x_1 \in X$ libovolně.
Pokud x_1 není min., existuje $x_2 < x_1$.
Pokud x_2 není min., existuje $x_3 < x_2$.
Atd. Přitom $x_1, x_2, \dots$ jsou navzájem různá: pokud $x_i > x_{i+1} > x_{i+2} > \dots > x_i$, pak z tranzitivity $x_i > x_i$, což je ve sporu s ireflexivitou.
Ale posl. nemůže pokračovat do nekonečna, neboť X je konečná.

Dk #2: Ke každému $x \in X$ přiřadíme $L_x := \{y \in X \mid y \leq x\}$, zjevně $x \in L_x$.
tomu se říká dolní množina prvku x
Zvolíme $a \in X$: $|L_a|$ je min.
Pokud $|L_a| = 1$, a je minimální prvek.
Pokud $|L_a| > 1$, vybereme $b \in L_a \setminus \{a\}$ ... $L_b \subseteq L_a \setminus \{a\}$ díky tranzitivitě a antisymetrii
$\Rightarrow |L_b| < |L_a|$, což je spor s min. $|L_a|$.

$\leq^{-1}$ je také uspořádání (opačné) – prohodili jsme min/max, nejv./nejm. atd.

Věta (o lineárním rozšíření): Pro každou (konečnou) $(X, \leq)$ ČUM $\exists \trianglelefteq$ lineární uspoř. na X t.ž. $\leq \subseteq \trianglelefteq$.
pro nekonečné je to složitější a potřebujeme axiom výběru

Dk: Indukcí podle $n := |X|$.
Pro $n = 0$: stačí zvolit $\trianglelefteq = \emptyset$.
$n \to n+1$: $(X, \leq)$ má nějaký minimální prvek $m \in X$.
Zvolíme $X' := X \setminus \{m\}$, $\leq' := \leq \cap\, X' \times X'$.
$(X', \leq')$ je ČUM s n prvky $\Rightarrow$ podle IP existuje lineární rozšíření $\trianglelefteq'$.
Sestavíme $\trianglelefteq := \trianglelefteq' \cup \{(m, x) \mid x \in X\}$
a nahlédneme, že $\trianglelefteq$ je lin. uspoř. rozšiřující $\leq$.

Grafový pohled – konečné neprázdné ČUM jsou acyklické orientované grafy se smyčkami (jediné povolené cykly),
→ ostré uspořádání je bez smyček
které jsou navíc tranzitivní $\equiv$ kdykoliv existuje cesta z x, y, pak (x, y) je hrana. } každá cesta má zkratku

Lineární rozšíření je tzv. topologické uspořádání $\leq$ na V t.ž. $(x,y) \in E \Rightarrow x \leq y$.
"Srovnáme vrcholy na (vodorovnou) přímku tak, aby všechny hrany vedly zleva doprava."

Ještě přidáme v analýze často používané:

Df: Pro $A \subseteq X$, kde $(X, \leq)$ je ČUM:

- $s \in X$ je horní závora $A \equiv \forall a \in A: a \leq s$
- $s \in X$ je supremum $A \equiv s$ je nejmenší z horních závor A.
- analogicky dolní závora a infimum (největší dolní závora)

je jednoznačně určeno, existuje-li

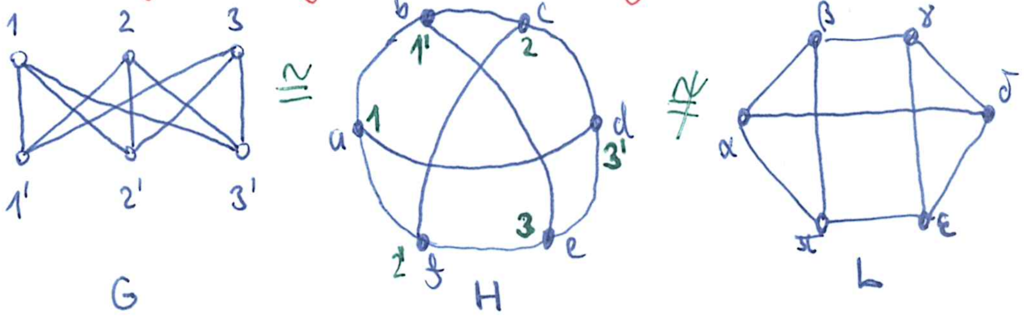
např. v $(\mathbb{N} \setminus \{0\}, \backslash)$ je $\sup\{a,b\}$ nejmenší společný násobek a $\inf\{a,b\}$ největší společný dělitel. (funguje i pro větší množiny)

Izomorfismus – "jedna struktura vypadá jako druhá" – potkali jsme pro grafy, teď pořádně a obecněji

Df: Grafy $G=(V,E)$ a $G'=(V',E')$ jsou *izomorfní* (značíme $G \cong G'$) $\equiv$
$\exists f: V \to V'$ bijekce t.ž. $\forall x,y \in V: \{x,y\} \in E \Leftrightarrow \{f(x), f(y)\} \in E'$. } f nazýváme *izomorfismus* mezi G a G'

f říká, jak přejmenovat grafu G vrcholy, aby vznikl G'!

Příklad:

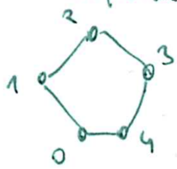


- $G \cong H$ sestrojením izomorfismu
- $G \ncong K_5$: mají jiný # vrcholů
- $G \ncong K_6$: mají jiné stupně
- $G \ncong L$: G je bipartitní, L má $\triangle$

obecně: izomorfismus zachovává všechny vlastnosti, které nezáleží na jménech vrcholů

Pozn.: Ověřit, jestli f je izomorfismus, je algoritmicky jednoduché, ale rozhodnout, zda nějaký existuje, je nejspíš těžké!

Df: *automorfismus* je izomorfismus G s G.



má kromě identity 9 dalších automorfismů

- Podobně můžeme izomorfismus definovat pro *orientované grafy*:
  $f: V \to V'$ bijekce: $\forall x,y \in V: (x,y) \in E \Leftrightarrow (f(x), f(y)) \in E'$.
- Nebo pro *uspořádání*: ČUM $(X, \leq) \cong (X', \leq') \equiv$
  $\exists f: X \to X'$ bijekce: $\forall x,y \in X: x \leq y \Leftrightarrow f(x) \leq' f(y)$.

↳ obecněji: $(X, R_1 \ldots R_k) \cong (X', R'_1 \ldots R'_k) \equiv \exists f: X \to X'$ bijekce kompatibilní s relacemi $R_1 \ldots R_k$, tedy

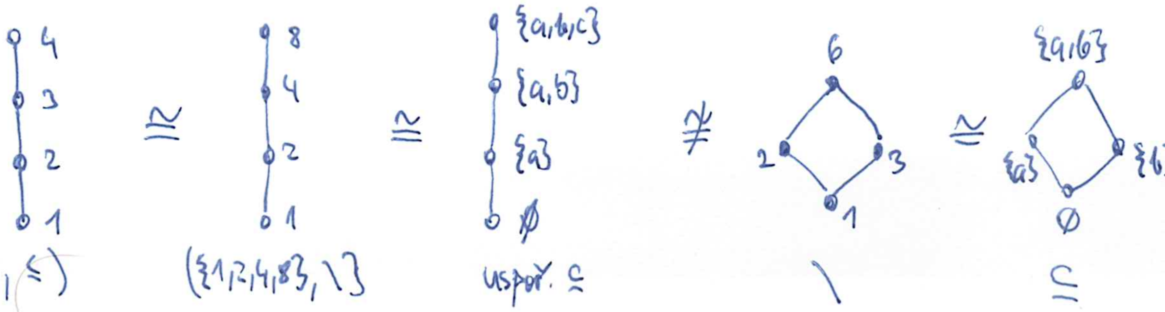
množina + k relací na ní "relační systém"

$\forall i$ $\text{arita}(R_i) = \text{arita}(R'_i) =: a_i$
kolika-tice jsou v relaci
$\forall x_1 \ldots x_{a_i} \in X$
$(x_1 \ldots x_{a_i}) \in R_i \Leftrightarrow (f(x_1) \ldots f(x_{a_i})) \in R'_i$.

Například: $(\mathbb{R}, 0, +) \cong ((0,\infty), 1, \cdot)$
konstanta je unární relace; $+$ a $\cdot$ jsou ternární relace

izomorfismus je $x \mapsto e^x$

Zpět k *izomorfismům uspořádání*:



$([4], \leq)$ ≅ $(\{1,2,4,8\}, \backslash)$ ≅ uspoř. $\subseteq$ ≇ $\backslash$ ≅ $\subseteq$

Nebo pro nekonečné ČUM:

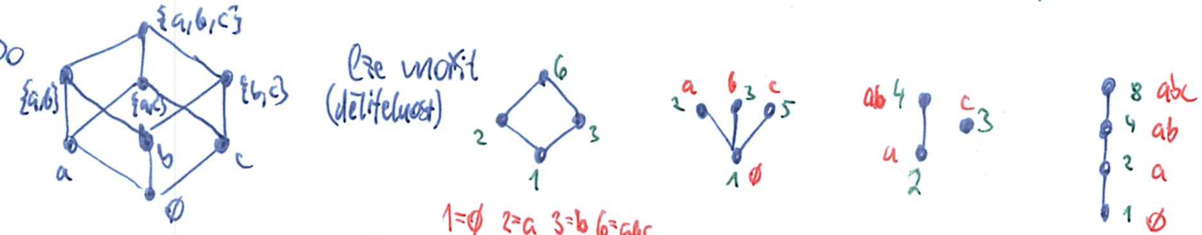
Mezi $\mathbb{N}^+$, $\mathbb{N}$, $\mathbb{Z}$ a $\mathbb{Q}$ existují bijekce, ale:

- $(\mathbb{N}^+, \leq) \cong (\mathbb{N}, \leq)$, zatímco
- $(\mathbb{N}, \leq) \not\cong (\mathbb{Z}, \leq_\mathbb{Z})$ – jedna ČUM má nejmenší prvek, druhá ne
- $(\mathbb{Z}, \leq_\mathbb{Z}) \not\cong (\mathbb{Q}, \leq_\mathbb{Q})$ – uspoř. na $\mathbb{Q}$ je husté ($\forall x,y\ x<y \Rightarrow \exists z: x<z \,\&\, z<y$), zatímco na $\mathbb{Z}$ nikoliv

"Každé uspořádání lze najít někde uvnitř inkluze."

Df: Vnoření $(X, \leq)$ do $(X', \leq')$ je $f: X \to X'$ prosté t. ž. $\forall x,y \in X: x \leq y \Leftrightarrow f(x) \leq' f(y)$. } vlastně izomorfismus X s nějakou indukovanou podstrukturou v X'

Příklady: Do



$1=\emptyset$ $2=a$ $3=b$ $6=abc$

ale i $1=\emptyset$ $2=ab$ $3=bc$ $6=abc$

Věta (o vložení do inkluze): Pro každou $(X, \preceq)$ ČUM existuje vnoření do $(2^X, \subseteq)$.
↑ i nekonečnou

Dk: Stačí zvolit $f(x) := L_x = \{y \in X \mid y \preceq x\}$ (dolní množiny – už známe)

① f je prostá: pokud $L_x = L_y$, pak z $x \in L_x$, $y \in L_y$ plyne $x \in L_y$ & $y \in L_x$, tedy $x \preceq y$ & $y \preceq x$, což dá tranzitivitou $x=y$.

② $x \preceq y \Rightarrow f(x) \subseteq f(y)$: pokud $a \in L_x$, pak $a \preceq x$ a z tranzitivity $a \preceq y$, tedy $a \in L_y$.

③ $f(x) \subseteq f(y) \Rightarrow x \preceq y$: $x \in L_x \Rightarrow x \in L_y \Rightarrow x \preceq y$.

Vraťme se ještě k řetězcům a antiřetězcům: Jak dlouhé mohou být?

Df: Pro konečnou ČUM $P = (X, \preceq)$ je:

- $\alpha(P) := \max\{|A| \mid A \subseteq X$ je antiřetězec$\}$ – "šířka"
- $\omega(P) := \max\{|R| \mid R \subseteq X$ je řetězec$\}$ – "výška"

} uspořádání

pro "krychličku" z minulých příkladů je $\alpha = 3$, $\omega = 4$

Věta (o Dlouhém a Širokém): Pro každou konečnou ČUM $P = (X, \preceq)$ je $\alpha(P) \cdot \omega(P) \geq |X|$.

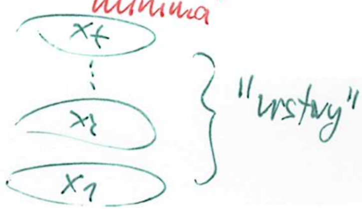
Dk: Sestrojíme: $X_1 :=$ minimální prvky$(X, \preceq)$, $X_1' := X \setminus X_1$

$X_2 :=$ min. prvky $(X_1', \preceq_1)$, $X_2' := X_1' \setminus X_2$
↑ $\preceq$ omezené na X_1'

⋮

X_t takové, že $X_t' = \emptyset$

"postupně ukrajujeme minima"



① proces skončí: $|X_i'| > |X_{i+1}'|$, takže prvky časem dojdou

② $X_1 - X_t$ tvoří rozklad množiny X.

③ každá X_i je antiřetězec $\Rightarrow \forall i \ |X_i| \le \alpha(P)$

④ existuje řetězec délky t $\Rightarrow t \le \omega(P)$

└ proč: zvolme $a_t \in X_t$ libovolně

$a_t \notin X_{t-1}$, proto musí existovat $a_{t-1} \in X_{t-1}$ t.ž. $a_{t-1} < a_t$.

$a_{t-1} \notin X_{t-2} \Rightarrow \exists a_{t-2} \in X_{t-2}$ t.ž. $a_{t-2} < a_{t-1}$

atd. až do $a_1 \in X_1$.

$\{a_1 — a_t\}$ tvoří řetězec.

z ②-④ plyne: $|X| = \sum_i |X_i| \le t \cdot \alpha(P) \le \omega(P) \cdot \alpha(P)$, což je tvrzení věty.

Aplikace: Věta (Erdős-Szekeres): Posloupnost čísel délky n^2+1 obsahuje monotónní podposloupnost délky $n+1$.

Už jsme zmínili na začátku semestru

neostře, tedy nerostoucí nebo neklesající

Dk: Mějme $x_1 — x_{n^2+1} \in \mathbb{R}$.

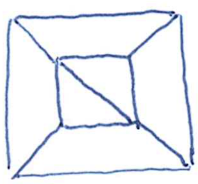
Na $[n^2+1]$ zvolme relaci $\preceq$: $i \preceq j \equiv i \le j \ \& \ x_i \le x_j$

① $\preceq$ je uspořádání.

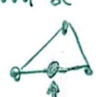
② řetězec odpovídá neklesající pp., antiřetězec nerostoucí pp.

Stačí aplikovat D&Š.

KRESLENÍ GRAFŮ DO ROVINY



- vrcholy → body v rovině
- hrany → oblouky – spojité křivky, které samy sebe neprotínají
  ↳ formálně: spojitá prostá funkce $[0,1) \to \mathbb{R}^2$
- "hrany se nekříží"
  - pokud vrchol leží na hraně, je její koncový vrchol — nesmí se
  - pokud mají 2 hrany společný bod, je to jejich společný koncový vrchol



izolovaný vrchol

definujeme neformálně, nemajíce zatím vybudovanou analýzu a topologii

↳ rovinné nakreslení grafu → Df: Graf je rovinný ≡ má aspoň 1 rovinné nakreslení.

↓ Někdy též "graf nakreslený do roviny"

Df: Topologický rovinný graf ≡ graf spolu s rovinným nakreslením

☺ Nakreslení cesty je oblouk, nakreslení cyklu uzavřená křivka ← topologická kružnice (jako oblouk, ale $f(0)=f(1)$)

Df: Stěny nakreslení ≡ oblasti, na něž dělí rovinu sjednocení nakreslení hran (včetně vnější stěny)

9-úhel. stěna ... zde žádná není

4 stěny, 2 stěny, 1 stěna, 3 stěny, 2 stěny, 3 stěny, 3 stěny, struktura stěn závisí na nakreslení