

Записки по Теория на Множествата
При проф. Тинко Тинчев

Atanas Ormanov

November 3, 2022

Лекция 1

Book recommendation:

Introduction to Set Theory (3d Edition) by Karel Hrbacek & Thomas Jech

Съпоставка м-ду Актуална безкрайност и Потенциална безкрайност:

На пръв поглед ако $B \subseteq A$ и $B \neq A$, то В има по-малко елементи, но при безкрайни мн-ва не е задължително.

def Принцип за неограничената абстракция:

Нека $\mathcal{A}(x)$ е едноместно свойство на обекта x . Тогава има множество A , такова че $x \in A \Leftrightarrow \mathcal{A}(x)$

Парадокс на Ръсел:

Нека \mathcal{R} е св-во такова че $\mathcal{R}(x) \Leftrightarrow x \notin x$ за произволно x

От принципа за неограничената абстракция (*) - има множество R ,

такова че $x \in R \Leftrightarrow \mathcal{R}(x)$ за произволно x

... $R \in R \Leftrightarrow R \notin R$

Езикът на теория на множествата се състои от:

- Двуместни свойства: $=, \in$
(равенство в смисъла на Лайбниц означава неотличимост)
- Булеви връзки: $\vee, \wedge, \neg, \Rightarrow, \Leftrightarrow$
- Квантори: $\forall x\phi, \exists x\phi$

ZF - аксиоми на Цермело Френкел

ZFC - ZF заедно с аксиомата за избора

def Теоритико множествени свойства:

В света (универсума) има само множества (това са обектите с които ще работим)

TM свойствата разделяме на:

1) Логически аксиоми

- $\forall x\forall y(x = y \Rightarrow y = x)$
- $\forall x\forall y(x = y \Rightarrow y = x)$
- $\forall x\forall y\forall z(x = y \wedge y = z \Rightarrow x = z)$
- $\forall x\forall y\forall z(x \in y \wedge y = z \Rightarrow x \in z)$
- $\forall x\forall y\forall z(x = y \wedge y \in z \Rightarrow x \in z)$

1-3 са аксиомите за еквивалентност на равенството

4-5 са аксиомите за конгруентност

2) Аксиоми на ZF:

1. $\exists x(x = x)$ - Има поне един обект в света
2. $\forall x \forall y (\forall z (z \in x \Leftrightarrow z \in y) \Rightarrow x = y)$ - Обемност / екстенционалност. Ако 2 множества имат едни и същи елементи, то те са равни.
3. $\exists x(x = x)$ - принцип за ограничената абстракция / схема за отделянето.

Док 2.2: $\forall y \forall z (y = z \Rightarrow \forall x (x \in y \Leftrightarrow x \in z))$

Нека предположим че $y = z$, нека x е произволно множество. Използваме логическа аксиома 4 за да докажем.

Док 2.3: Нека $\phi(x, u_1, u_2, \dots, u_n)$ е ТМ. св-во, нека u_1, \dots, u_n са произволно мн-ва. Всеки път, когато A е множество, съществува множество, чийто елементи са точно онези елементи на A , за които е в сила $\phi(x, u_1, u_2, \dots, u_n)$.

$\forall u_1 u_2 \dots u_n \forall A \exists B \forall x (x \in B \Leftrightarrow x \in A \wedge \phi(x, u_1, u_2, \dots, u_n))$ - св-во на x .

Тв При фиксирани A, u_1, \dots, u_n - множества и теоритико множествено свойство ϕ , съществуват единствено множество B , за което $\forall x (x \in B \Leftrightarrow x \in A \wedge \phi(x, \bar{u}))$, където \bar{u} са параметри.

Док: Нека B_1 и B_2 са такива мн-ва, че: $\forall x (x \in B_1 \Leftrightarrow x \in A \wedge \phi(x, \bar{u})) \quad \forall x (x \in B_2 \Leftrightarrow x \in A \wedge \phi(x, \bar{u}))$ Искаме да док че $B_1 = B_2$. Нека $y \in B_1$ е произволен. Тогава $y \in A \wedge \phi(y, \bar{u})$. Следователно $y \in B_2$. Така $\forall x (x \in B_1 \Leftrightarrow x \in B_2)$. От аксиомата за обемност $B_1 = B_2$.

Тв Съществува празно множество

Док: Ще докажем че $\exists A \forall x (x \notin A)$

Нека B е множество (От аксиомата 0). Нека $\phi(x) \Leftrightarrow \neg(x = x)$. Нека M е единственото множество, такова че $\forall x (x \in M \Leftrightarrow x \in B \wedge \phi(x))$. Ще док. че $\forall x (x \notin M)$. Допускаме че $x \in M$ е произволно. Тогава $x \in B \wedge \phi(x)$. Така $\phi(x)$, т.е. $x \neq x$, противоречи с 1-вата лог. аксиома. Следователно $x \notin M$. Понеже x е произволно то $\forall x (x \notin M)$.

Опр За множество A , параметри \bar{u} и св-во ϕ , съществува единствено такова B , което бележим така: $B = \{x \mid x \in A \wedge \phi(x, \bar{u})\}$

Тв Съществува единствено празно множество.

Док: Нека M_1 и M_2 са празни, т.е. $\forall x (x \notin M_1)$ и $\forall x (x \notin M_2)$ Нека t е произволно множество, тогава $t \notin M_1$ и $t \notin M_2$. Но t беше произволно, значи $t \in M_1 \Leftrightarrow t \in M_2$ и от аксиомата за обемност $M_1 = M_2$ Празното множество бележим с \emptyset

Означение: $A \subseteq B \Leftrightarrow \forall x (x \in A \Rightarrow x \in B)$

Тв За всяко множество A , е изп. че $\emptyset \subseteq A$

Тв Не същ. множество, което съдържа всички мн-ва: $\neg \exists A \forall x (x \in A)$

Док: Допускаме противното. Нека B е такова че $\forall x(x \in B)$
Нека $R = \{x \mid x \in R \wedge x \notin x\}$. Използваме аксиомата схема за отделяне с $A = B$ и $\phi(x) \Leftrightarrow x \notin x$. Отделяме онези x , за които $x \notin x$. Така R е множество. Тогава $R \in B$. Получаваме че $R \in R \Leftrightarrow R \in B \wedge R \notin R \Leftrightarrow R \notin R$ - противоречие с допускането. Тоест няма такива мн-ва.

Future reading:

- actual infinity vs potential infinity
- Banach–Tarski paradox (occurs after the patch of Russel’s paradox)
- Cantor’s definition of real numbers

Лекция 2

Тв За всеки две множества A и B , съществува единствено множество C , такова че $\forall x(x \in C \Leftrightarrow x \in A \wedge x \in B)$.

Док за съществуване: Нека $\phi(x, u) \Leftrightarrow x \in u$. Според аксиомната схема за отделяне в-ху множеството A и ϕ за $u = B$, същ. множество $C = \{x \mid x \in A \wedge \phi(x, B)\} = \{x \mid x \in A \wedge x \in B\}$.
Значи за всяко x , $x \in C \Leftrightarrow x \in A \wedge x \in B$

Док за единственост: Нека C_1 и C_2 са такива мн-ва, че $x \in C_i \Leftrightarrow x \in A \wedge x \in B, i = 1, 2$.
Тогава за всяко x , $x \in C_1 \Leftrightarrow x \in A \wedge x \in B \Leftrightarrow x \in C_2$ и по аксиомата за обемност $C_1 = C_2$.
Това множество означаваме с $A \cap B$.

Тв За всеки две множества A и B , съществува единствено множество C , такова че $\forall x(x \in C \Leftrightarrow x \in A \wedge x \notin B)$

$\phi(x, u) \Leftrightarrow x \notin u$, т.е. отделяме от A всички ел. x , за които $\phi(x, B)$
 $x \in C \Leftrightarrow x \in A \wedge x \notin B, i = 1, 2$
 $x \in C_1 \Leftrightarrow x \in C_2, \forall x$
 $C_1 = C_2$

Това единствено множество бележим $A \setminus B$ и наричаме разлика на A и B .

Можем да правим "голямо" сечение

Тв Нека $A \neq \emptyset$. Тогава съществува единствено множество B , което съдържа точно множествата, които са елементи на всеки един елемент на A .
 $\forall x(x \in B \Leftrightarrow \forall y(y \in A \Rightarrow x \in y))$

Док за същ.: Нека $y_0 \in A$, защото A е непразно. Нека $\phi(x, u) \Leftrightarrow \forall y(y \in u \Rightarrow x \in y)$. От аксиомната схема за отделянето, има множество

$B' = \{x \in y_0 \mid \phi(x, A)\} = \{x \mid x \in y_0 \wedge \forall y(y \in A \Rightarrow x \in y)\}$

Ще док че $\forall x(x \in B' \Leftrightarrow \forall y(y \in A \Rightarrow x \in y))$ Нека $x \in B'$. Тогава $x \in y_0 \wedge \forall y(y \in A \Rightarrow x \in y)$, в частност $\forall y(y \in A \Rightarrow x \in y)$.

Обратното, нека x е т.ч. $\forall y(y \in A \Rightarrow x \in y)$.

Но $y_0 \in A$, следователно $x \in y_0$. Така $x \in y_0 \wedge \forall y(y \in A \Rightarrow x \in y)$ от където $x \in B'$

Док единств.: Нека B_1 и B_2 са такива мн-ва че ... $x \in B_i \Leftrightarrow \forall y(y \in A \Rightarrow x \in y)$ за $i = 1, 2$

Така за всяко x , $x \in B_1 \Leftrightarrow \forall y(y \in A \Rightarrow x \in y) \Leftrightarrow x \in B_2$ Т.е. има единствено такова множество, бележим го $\bigcap A$ или $\bigcap_{x \in A} x$

Приемаме че $\bigcap \emptyset \Leftrightarrow \emptyset$

Аксиома за чифта За всеки 2 мн-ва a и b , съществува множество A , измежду чиито ел. са a и b .

$\forall a \forall b \exists A(a \in A \wedge b \in A)$

Тв За всеки 2 мн-ва a и b същ. единствено множество B , т.ч. $\forall x(x \in B \Leftrightarrow x = a \vee x = b)$

Док ед.: Нека B_1 и B_2 са мн-ва, т.ч. $\forall x(x \in B_1 \Leftrightarrow x = a \vee x = b)$
Тогава за всяко x , $x \in B_1 \Leftrightarrow x = a \vee x = b \Leftrightarrow x \in B_2$ След. $B_1 = B_2$

Док същ.: Нека A е такова множество че $a \in A$ и $b \in A$. Нека $\phi(x, u_1, u_2) \Leftrightarrow x = u_1 \vee x = u_2$
По аксиомата схема за отд., същ. множество $B = \{x \mid x \in A \wedge \phi(x, a, b)\}$.

Ще док. че $\forall x(x \in B \Leftrightarrow x = a \vee x = b)$. Нека x е произв. и нека $x \in B$. Тогава $x \in A \wedge \phi(x, a, b)$, в частност $\phi(x, a, b)$ т.е. $x = a \vee x = b$.

Нека сега $x = b \vee x = b$. Така $\phi(x, a, b)$. Понеже $a \in A$ и $b \in A$, то $x \in A$. Следователно $x \in B$
 Това единствено множество ще означаваме $\{a, b\}$ и ще нар. чифт на A и B .

Заб: Ако $a = b$, то $\{a, a\} = \{a\}$ наричаме синглетон на a .

Определимо е в езика на ТМ дали x е синглетон.

x е синглетон $\Leftrightarrow \exists a(x = \{a\}) \Leftrightarrow \exists a \forall y(y \in x \Leftrightarrow y = a)$.

Тогава можем да използваме "синглетон" като свойство във ф-ла. Сега ясно се вижда че сме разширили езика защото следните са различни $\emptyset, \{\emptyset\}, \{\{\emptyset\}\}$ и т.н. (така получаваме безкрайна редица)

СВ $\{a, b\} = \{b, a\}$. Ясно се вижда че $\forall x(x \in \{a, b\} \Leftrightarrow x \in \{b, a\})$

def $\langle a, b \rangle = \langle a_1, b_1 \rangle \Leftrightarrow a = a_1 \wedge b = b_1$

Опр Наредена двойка на мн-вата x и y наричаме множеството $\{\{x\}, \{x, y\}\}$ и ще означаваме $s \langle x, y \rangle$.

Заб: Ако използваме x вместо $\{x\}$ ще можем да правим цикли на принадлежност - $A \in B \in C$.
 другия път ще въведем "правило" което ще забрани такива неща.

Тв За всяко x_1, y_1, x_2, y_2 е в сила, че $\langle x_1, y_1 \rangle = \langle x_2, y_2 \rangle \Leftrightarrow x_1 = x_2 \wedge y_1 = y_2$

Док: $(\Leftarrow) x_1 = x_2 \wedge y_1 = y_2$, показваме че $\{x_1\} = \{x_2\} \wedge \{x_1, y_1\} = \{x_2, y_2\}$
 $\{\{x_1\}, \{x_1, y_1\}\} = \{\{x_2\}, \{x_2, y_2\}\}$ и от там $\langle x_1, y_1 \rangle = \langle x_2, y_2 \rangle$

(\Rightarrow) Нека $\langle x_1, y_1 \rangle = \langle x_2, y_2 \rangle$

1. $x_1 = y_1$, тогава $\langle x_1, y_1 \rangle = \{\{x_1\}, \{x_1, x_2\}\} = \{\{x_1\}, \{x_1\}\} = \{\{x_1\}\} = \langle x_2, y_2 \rangle = \{\{x_2\}, \{x_2, y_2\}\}$. Следователно $\{x_1\} = \{x_2\} = \{x_2, y_2\}$. Така: $x_1 = x_2$ и $x_2 = y_2$.
 Тогава $x_1 = x_2 = y_2 = y_1$
2. $x_1 \neq y_1$. Тогава $\{x_1\} \neq \{x_1, y_1\}$. Тогава $\{x_2\} \neq \{x_2, y_2\}$. Тогава $y_2 \neq x_2$, защото иначе чифта и синглетона щяха да съвпадат. От тук $\{x_1\} \neq \{x_2, y_2\}$. Но $\{x_1\} \in \langle x_2, y_2 \rangle$, и така $\{x_1\} = \{x_2\}$. След. $\{x_1, y_1\} \neq \{x_2\}$, от където $\{x_1, y_1\} = \{x_2, y_2\}$. От $\{x_1\} = \{x_2\}$, следва че $x_1 = x_2$. Тогава $\{x_1, y_1\} = \{x_2, y_1\} = \{x_2, y_2\}$. Понеже $y_1 \neq x_1 = x_2$, то $y_1 = y_2$

Аксиома за обединение За всяко множество A съществува множество B , т.ч. всеки елемент на елемент на A е елемент на B .

$\forall x \forall y (x \in y \wedge y \in A \Rightarrow x \in B)$

ТВ За всяко множество A съществува единствено множество B ,
т.ч. $\forall x(x \in B \Leftrightarrow \exists y(y \in A \wedge x \in y))$

Док за ед: $i = 1, 2. \forall x(x \in B_i \Leftrightarrow \exists y(y \in A \wedge x \in y))$ за всяко x ,
 $x \in B_1 \Leftrightarrow \exists y(y \in A \wedge x \in y) \Leftrightarrow x \in B_2$, т.е. $B_1 = B_2$

Док за същ. Нека C е такова множество, че $\forall x \forall y(y \in A \wedge x \in y \Rightarrow x \in C)$.

Нека $B = \{x \mid x \in C \wedge \exists y(y \in A \wedge x \in y)\}$

Сега ако $x \in B \Rightarrow x \in C \wedge \exists y(y \in A \wedge x \in y) \Rightarrow \exists y(y \in A \wedge x \in y)$

Нека $\exists y(y \in A \wedge x \in y)$. Нека y_0 е свидетел за това ($y_0 \in A \wedge x \in y_0$).

Понеже $y_0 \in A \wedge x \in y_0$, то $x \in C$. Следователно $x \in B$

Значи съществува такова множество и то е единствено. Ще го бележим с $\bigcup A$.

Заб: Означение означава че ще го използваме във формула като съкращение(syntax sugar).

Не може да се дефинира операция за допълнение. Тоест:

ТВ За нито едно множество A не съществува множество \bar{A} , т.ч. $\forall x(x \in \bar{A} \Leftrightarrow x \notin A)$

Док: Допускаме противното - нека A и \bar{A} са такива мн-ва, такова че за всяко x $x \in \bar{A} \Leftrightarrow x \notin A$.

Нека $V = \bigcup \{A, \bar{A}\}$ - от аксиомата за чифта и обединението. Нека x е произволно. Ако $x \in A$, то $\exists y(y \in \{A, \bar{A}\} \wedge x \in y)$ от където $x \in V$. Ако пък $x \notin A$, то $x \in \bar{A}$ и отново $\exists y(y \in \{A, \bar{A}\} \wedge x \in y)$, т.е. $x \in V$. След $\forall x(x \in V)$, противоречие!

$$\bar{0} = \emptyset$$

$$\bar{1} = \{\bar{0}\}$$

$$\bar{2} = \bar{1} \cup \{\bar{1}\} = \{\bar{0}, \bar{1}\}$$

...

$$\overline{n+1} = \bar{n} \cup \{\bar{n}\} \text{ (n + 1 елемента)}$$

Аксиома за степенното множество За всяко множество A съществува множество B ,
измежду чиито елементи са всички подмножества на A .
 $\forall A \exists B \forall x(x \subseteq A \Rightarrow x \in B)$

ТВ За всяко множество A същ. единствено множество B , т.ч. $\forall x(x \in B \Leftrightarrow x \subseteq A)$

Док за същ.: Нека C е т.ч. $\forall x(x \subseteq A \Rightarrow x \in C)$.

Нека $B = \{x \mid x \in C \wedge x \subseteq A\}$. Нека $x \in B$. След $x \in C \wedge x \subseteq A$, от където $x \subseteq A$. След.
 $x \in C$, от където $x \in C \wedge x \subseteq A$, т.е. $x \in B$

Заб: $x \in C \wedge x \subseteq A \Leftrightarrow x \subseteq A$, защото $x \subseteq A \Rightarrow x \in C$

Док за единственост: Взимаме B_1, B_2 и $\forall x(x \in B_i \Leftrightarrow x \subseteq A)$

$x \in B_1 \Leftrightarrow x \subseteq A \Leftrightarrow x \in B_2$, т.е. $B_1 = B_2$.

Такова множество B съществува и е единствено и ще означаваме с $\mathcal{P}(A) = \{x \mid x \subseteq A\}$

Какво можем да изведем от тук?

- $\emptyset \in \mathcal{P}(A)$ за всяко A
- $A \in \mathcal{P}(A)$, за всяко A

- $A \in \mathcal{P}(A)$, за всяко A
- $A \subseteq B \implies \mathcal{P}(A) \subseteq \mathcal{P}(B)$ - монотонност
- Можем ли да твърдим монотонността в обратната посока? Да!
- Възможно ли е $\mathcal{P}(A) \subseteq A$? Не! (дори и за празното). Това е същото като $\mathcal{P}(A) \in \mathcal{P}(A)$, но това все още не можем да докажем.

Но можем да докажем следното:

ТВ Не същ. множество A , т.ч. $\mathcal{P}(A) \subseteq A$

Док: Допускаме противното и нека A е такова множество, че $\mathcal{P}(A) \subseteq A$.

Нека $\mathcal{R}_A = \{x \mid x \in A \wedge x \notin x\}$. Според аксиомата схема за отделяне \mathcal{R}_A е множество. Освен това, $\mathcal{R}_A \subseteq A$. След $\mathcal{R}_A \in \mathcal{P}(A)$ и по допускане $\mathcal{P}(A) \subseteq A$, от където $\mathcal{R}_A \in A$.

Но $\mathcal{R}_A \in A \Leftrightarrow \mathcal{R}_A \in A \wedge \mathcal{R}_A \notin \mathcal{R}_A \Leftrightarrow \mathcal{R}_A \notin \mathcal{R}_A$. Противоречие! След. $\neg \exists A(\mathcal{P}(A) \subseteq A)$

Опр Казваме, че множеството z е транзитивно, ако $z \subseteq \mathcal{P}(z)$. (ще бележим с $trans(z)$)

Тоест z е транзитивно $\Leftrightarrow \forall y(y \in z \Rightarrow y \subseteq z) \Leftrightarrow \forall x \forall y(x \in y \wedge y \in z \Rightarrow x \in z)$

$\bigcup z \subseteq z$

ТВ Нека x е множество. Тогава:

1. $trans(x) \Rightarrow trans(\bigcup x)$
2. $\forall y(y \in x \Rightarrow trans(y)) \Rightarrow trans(\bigcup x)$
3. $\forall y(y \in x \Rightarrow trans(y)) \Rightarrow trans(\bigcap x)$
4. $trans(x) \Rightarrow trans(\mathcal{P}(x))$
5. $trans(x) \Rightarrow trans(x \cup \{x\})$

Заб: $S(x) = x \cup \{x\}$ е наследник на x

Док 1: Нека x е транз. Нека $y \in \bigcup x$. Следователно $\exists z(y \in z \wedge z \in x)$. Нека z_0 е свидетел за това: $y \in z_0, z_0 \in x$. Но $trans(x)$, от където $y \in x$. От $y \in x$, винаги е вярно че $y \subseteq \bigcup x$. Тогава $y \subseteq \bigcup x$. След $\bigcup x$ е транзитивно.

Док 2: Нека вс. ел. на x е транзитивно множество. Нека $y \in \bigcup x$. Нека z е т.ч. $y \in z \wedge z \in x$. Но z е транзитивно ($z \in x$) значи $y \subseteq z$. Понеже $z \in x$, то $z \in \bigcup x$. Така $y \subseteq z \wedge z \subseteq \bigcup x$, от където $y \subseteq \bigcup x$. Т.е. $trans(\bigcup x)$

Док 3: Нека x е множество от транзитивни множества.

Заб: Трябва да внимаваме, защото $\forall y(y \in \emptyset \Rightarrow trans(y))$

Ако $x = \emptyset$, то $\bigcup x = \bigcup \emptyset = \emptyset$

Нека сега $x \neq \emptyset$. Нека $y \in \bigcap x$. Тогава $\forall z(z \in x \Rightarrow y \in z)$. Понеже $\forall z(z \in x \Rightarrow trans(z))$, то $\forall z(z \in x \Rightarrow y \subseteq z)$. Така y съдържа елементи, които са общи за всички елементи на x . Тогава $y \subseteq \bigcap x$. Следователно $trans(\bigcap x)$.

Док 4: Нека $trans(x)$.

Можем да използваме че $\bigcup z \subseteq z$ и можем да докажем следното $\bigcup \mathcal{P}(x) = x \subseteq \mathcal{P}(x)$

Друг подход:

$$trans(x) \implies x \subseteq \mathcal{P}(x) \implies \mathcal{P}(x) \subseteq \mathcal{P}(\mathcal{P}(x)) \implies trans(\mathcal{P}(x))$$

Док 5: Нека $trans(x)$. Нека $y \in S(x) = x \cup \{x\}$. Ако $y \in x$, то понеже $trans(x)$ имаме че $y \subseteq x$. Но $x \subseteq S(x) = x \cup \{x\}$. Така $y \subseteq S(x)$. Ако $y \in \{x\}$, то $y = x \subseteq S(x)$.
 $\forall y(y \in S(x) \Rightarrow y \subseteq S(x))$. Така $trans(S(x))$

Въвеждаме още съкратен синтаксис (синтактична захар) за $\phi(x)$ и A - множество:

- $(\exists x \in A)(\phi(x)) \Leftrightarrow \exists x(x \in A \wedge \phi(x))$
- $(\forall x \in A)(\phi(x)) \Leftrightarrow \forall x(x \in A \Rightarrow \phi(x))$
- $\exists! x(\phi(x)) \Leftrightarrow \exists x(\phi(x) \wedge \forall y(\phi(y) \Rightarrow x = y))$

Лекция 3

def Декартово произведение

$A \times B = \{ \langle a, b \rangle \mid a \in A \wedge b \in B \}$. Тук $\phi(x) \Leftrightarrow \exists a \exists b (x = \langle a, b \rangle \wedge a \in A \wedge b \in B)$
и $x \in A \times B \Leftrightarrow \phi(x)$

Наблюдение: $\langle a, b \rangle, a \in A$ и $b \in B$

$\{a\} \subseteq A \subseteq A \cup B, \{a, b\} \subseteq A \cup B$

$\{a\}, \{a, b\} \in \mathcal{P}(A \cup B)$

$\{\{a\}, \{a, b\}\} \subseteq \mathcal{P}(A \cup B)$

$\langle a, b \rangle \subseteq \mathcal{P}(A \cup B)$

$\langle a, b \rangle \in \mathcal{P}(\mathcal{P}(A \cup B))$

ТВ За вс. 2 мн-ва A и B , същ. единствено мн-во C , такова че:
 $\forall u (u \in C \Leftrightarrow \exists a \exists b (a \in A \wedge b \in B \wedge u = \langle a, b \rangle))$

Док за единственост: за домашна.

Док за съществуване: Нека $C = \{u \mid u \in \mathcal{P}(\mathcal{P}(A \cup B)) \wedge \phi(u)\}$.

Имаме че $\forall u (\phi(u) \Rightarrow u \in \mathcal{P}(\mathcal{P}(A \cup B)))$, от където $\forall u (u \in C \Leftrightarrow \phi(u))$. Това единствено множество ще бележим с $A \times B$ и ще наричаме декартово произведение на A и B .

ТВ За всеки A, B, C - множества, е в сила че:

1. $A \times \emptyset = \emptyset$
2. $\exists A \exists B (A \times B = B \times A)$, т.е. операцията не е комутативна
3. $(A \times B) \times C = A \times (B \times C)$? Не е асоциативна!
4. $A \times (B \cup C) = (A \times B) \cup (A \times C)$
5. $A \times (B \cap C) = (A \times B) \cap (A \times C)$
6. $B \times (\bigcup A) = \bigcup \{B \times x \mid x \in A\}$ - като за начало се питаме синтаксиса коректен ли е?
Тоест това от десния край е мн-во ли е?

Док 5:

(\subseteq) Нека $x \in A \times (B \cap C)$. Нека $a \in A, b \in B \cap C$ са т.ч. $x = \langle a, b \rangle$. Но $b \in B, b \in C$, от където $\langle a, b \rangle \in A \times B$ и $\langle a, b \rangle \in A \times C$. Така $x \in (A \times B) \cap (A \times C)$.

(\supseteq) Нека $x \in (A \times B) \cap (A \times C)$. Тогава $x \in A \times B$ и $x \in A \times C$. Нека $a \in A, b \in B$, т.ч. $x = \langle a, b \rangle$. Нека $a' \in A$ и $c \in C$ са такива че $x = \langle a', c \rangle$.

Понеже $\langle a, b \rangle = \langle a', c \rangle$, то $a = a'$ и $b = c$. Следователно $b \in B \cap C$, от където $x = \langle a, b \rangle \in A \times (B \cap C)$.

Док 6: Първо да докажем че операцията е коректна.

$B \times x, x \in A \Rightarrow x \subseteq \bigcup A \Rightarrow B \times x \subseteq B \times (\bigcup A) \Rightarrow B \times x \in \mathcal{P}(B \times (\bigcup A))$.

Тук $M \Rightarrow \mathcal{P}(B \times (\bigcup A))$, което ще е резултат от отделянето.

Лема Съществува единствено мн-во $\forall u(u \in C \Leftrightarrow (\exists x \in A)(u = B \times x))$

Док: Единственост - от аксиомата за обемност.

(съществуване): Нека $C = \{u \mid u \in \mathcal{P}(B \times \bigcup A) \wedge (\exists x \in A)(u = B \times x)\}$.

$u \in C \implies u \in \mathcal{P}(B \times \bigcup A) \wedge \phi(u) \implies \phi(u)$. Сега от $\phi(u) \Rightarrow u \in \mathcal{P}(B \times \bigcup A)$ следва ...

(\subseteq) Нека $u \in B \times (\bigcup A)$ е произволно. Нека $\langle b, c \rangle = u$ като $b \in B$ и $c \in \bigcup A$. Нека $a \in A$ е т.ч. $c \in a$. Тогава $u = \langle b, c \rangle \in B \times a, a \in A$. Но $B \times a \in \{B \times x \mid x \in A\}$, от където $u \in \bigcup \{B \times x \mid x \in A\}$

(\supseteq) Нека $u \in \bigcup \{B \times x \mid x \in A\}$. Нека $a \in A$ е т.ч. $u \in B \times a$. Нека $b \in B, c \in a$ са т.ч. $u = \langle b, c \rangle$. Но $a \in A \implies a \subseteq \bigcup A$, така $c \in \bigcup A$. Тогава $u = \langle b, c \rangle \in B \times (\bigcup A)$.

Сега от Тинко:

Множествата са естествени числа - \mathbb{N} ,

т.е. един обект е множество \iff този обект е естествено число.

Нека x и y са множества, $x = y \iff x = y$ като естествени числа.

Сега ще дефинираме принадлежност.

Нека $n > 0$, тогава $n = (1b_{k-1}...b_1b_0) = 1.2^k + ... + b_1.2^1 + b_0.2^0$

Нека x и y са множества. Казваме че $y \in x$ ако $b_{y-1} = 1$ в двоичното представяне на x .

Вижда се че логическите аксиоми са в сила - еквивалентност на равенството и конгруентност.

Какво означава аксиомата за екстенционалност $\forall x \forall y (\forall z (z \in x \Leftrightarrow z \in y) \Rightarrow x = y)$?

Ами x и y имат еднакви двоични представяния, т.е. те са равни.

Аксиома за чифта: Нека a и b са множества:

1. $a = b$, тогава $x = 2^a$

2. $a \neq b$, тогава $x = 2^a + 2^b$

Схема за отделяне: Нека $\phi(x)$ е ТМ свойство.

Нека A е съвкупността на естествените числа x , за които $\phi(x)$ е вярно. Нека B е множество.

Сега се чудим дали $\exists C \forall x (x \in C \Leftrightarrow x \in B \wedge \phi(x))$ е изпълнено.

Ами това са тези битове b на B , за които е вярно свойството $\phi(b)$. Съответно в двоичния запис на C само на съответните позиции на тези b -та има 1, на всички останали има 0.

Аксиома за безкрайност

Форма на Цермело: $\exists A (\emptyset \in A \wedge \forall x (x \in A \Rightarrow \{x\} \in A))$

Нека A_0 е множество със свойството $\emptyset \in A_0 \wedge \forall x (x \in A_0 \Rightarrow \{x\} \in A_0)$. $\emptyset \in A_0 \Rightarrow \{\emptyset\} \in A_0$, така $\{\emptyset\} \in A_0$ и т.н. показваме за произволен брой вложения на \emptyset .

Форма на Фон Нойман: $\exists A (\emptyset \in A \wedge \forall x (x \in A \Rightarrow x \cup \{x\} \in A))$

A_0 : $\emptyset \in A_0, \{\emptyset\} \in A_0, \{\emptyset, \{\emptyset\}\} \in A_0$ и т.н. Ние ще ползваме тази дефиниция когато говорим за естествени числа, където $0 \Leftarrow \emptyset$.

Аксиома за регулярност/фундираност $\forall x(x \neq \emptyset \Rightarrow \exists y(y \in x \wedge y \cap x = \emptyset))$
(Формулирана от Мириманов през 1917г и от Фон Нойман през 1925г)

T

1. $\neg \exists x(x \in x)$
2. $\neg \exists x \exists y(x \in y \wedge y \in x)$
3. $\neg \exists x \exists y \exists z(x \in y \wedge y \in z \wedge z \in x)$
4. Не съществува редица от мн-ва $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1}, \dots$, такива че $x_0 \in x_1, x_1 \in x_2, \dots$

Док 1: Да допусканем, че $\exists x(x \in x)$. Нека x_0 е свидетел за това съществуване, т.е. нека x_0 е мн-во със свойството $x_0 \in x_0$. Нека $x_1 = \{x_0\}$, т.е. $x_0 \in x_1$. Значи $x_1 \neq \emptyset$, следователно $\exists y(y \in x_1 \wedge y \cap x_1 = \emptyset)$. Нека y_0 е свидетел за това съществуване, т.е. $y_0 \in x_1 \wedge y_0 \cap x_1 = \emptyset$. Така $y_0 \in x_1$, но $x_1 = \{x_0\}$, следователно $y_0 = x_0$ и така $x_0 \in x_0$. Следователно $x_0 \in y_0, x_0 \in \{x_0\}, \{x_0 = x_1\}$. Така $x_0 \in y_0$ и $x_0 \in x_1$. Значи $x_0 \in y_0 \cap x_1$. Това е абсурд, понеже $y_0 \cap x_1 = \emptyset$.

Док 2: Да доп. че $\exists x \exists y(x \in y \wedge y \in x)$. Нека x_0 и y_0 са мн-ва, т.ч. $x_0 \in y_0 \wedge y_0 \in x_0$. Нека $x_1 = \{x_0, y_0\}$. Така $x_1 \neq \emptyset$. От $x_1 \neq \emptyset \Rightarrow \exists y(y \in x_1 \wedge y \cap x_1 = \emptyset)$. Следователно $\exists y(y \in x_1 \wedge y \cap x_1 = \emptyset)$. Нека y_1 е такова мн-во, че $y_1 \in x_1 \wedge y_1 \cap x_1 = \emptyset$. $y_1 \in x_1, x_1 = \{x_0, y_0\}$. Следователно $y_1 = x_0 \vee y_1 = y_0$. Да разгледаме случаите:

1. $y_1 = x_0$. Разглеждаме y_0 . Знаем че $y_0 \in x_0$ и $x_0 \in y_0$. Така $y_0 \in y_1$, но $y_0 \in x_1$ защото $x_1 = \{x_0, y_0\} \Rightarrow y_0 \in y_1 \cap x_1 \Rightarrow$ противоречие $y_1 \cap x_1 = \emptyset$
2. $y_1 = y_0$. $x_0 \in y_0$, следователно $x_0 \in y_1$. Така ?...?
3. Сами! Hint: Допускаме че $x_0 \in y_0 \wedge y_0 \in z_0 \wedge z_0 \in x_0$ и $x_1 \rightleftharpoons \{x_0, y_0, z_0\}$

Аксиомна схема за замяната (С тази аксиома вече имаме аксиомната схема \mathcal{ZF})

Имаме един детерминистичен преобразувател (на интуитивно ниво функция) - $\phi(x, y, \bar{u})$, в който можем да фиксираме \bar{u} и за дадено x то ни връща y .

Аксиомната схема твърди, че за такова ϕ с дефиниционна област A , има съответен образ на ϕ . Френкел забелязва че ако разгледаме $\mathbb{N}, \mathcal{P}(\mathbb{N}), \dots, \mathcal{P}^n(\mathbb{N})$, то не можем да гарантираме че това последното $\mathcal{P}(N)^n$ съществува.

Схемата: Нека $\forall u_1 \dots \forall u_n ((\forall x \forall y_1 \forall y_2 (\phi(x, y_1, \bar{u}) \wedge \phi(x, y_2, \bar{u})) \Rightarrow y_1 = y_2) \Rightarrow \forall A \exists B \forall z (z \in B \Leftrightarrow \exists x (x \in A \wedge \phi(x, z, \bar{u}))))$

Разглеждаме: $\mathcal{P}(\emptyset) = \{\emptyset\}, A \rightleftharpoons \mathcal{P}(\{\emptyset\}) = \{\emptyset, \{\emptyset\}\}$

$\phi(x, y) \rightleftharpoons (x = \emptyset \wedge y = a) \vee (x = \{\emptyset\} \wedge y = b)$

$\forall x \forall y_1 \forall y_2 (\phi(x, y_1) \wedge \phi(x, y_2) \Rightarrow y_1 = y_2)$

$\exists B \forall z (z \in B \Leftrightarrow \exists x (x \in A \wedge \phi(x, z)))$

Аксиома за избора (\mathcal{AC}) Нека имам някакво разделяне(разбиване) на множеството A и взема по един елемент от всяка част. $\forall z (z \in A \Rightarrow \bigcap z \text{ е синглетон } (\exists u (z \cap c = \{u\})))$

С помощта на аксиомата за избора се доказва че всяко множество може да бъде добре наредено (contraversial). $\forall x(x \in A \Rightarrow \emptyset) \Rightarrow \exists f(Func(f))$

$$Fom(f) = A \wedge \forall x(x \in A \Rightarrow f(x) \in x)$$

Това поражда и парадокса на Банарх Тарски: Взимаме кълбо В с $r = 1$, значи може да разделим $B = B_1 \cup B_2 \cup \dots \cup B_7$. След което можем да вземем $B_1 \cup B_2 \cup B_3$ с $r = 1$ и $B_4 \cup B_5 \cup \dots \cup B_7$ с $r = 1$ - абсурд! Аксиомата за избора не е конструктивна!

Аксиомата: Аксиома на мултипликативност - форма на Ръсел, защото още не сме въвели понятието за функция

$$\forall A(\forall x(x \in A \Rightarrow x \neq \emptyset) \wedge \forall x \forall y(x \in A \wedge y \in A \wedge x \neq y \Rightarrow x \cap y = \emptyset) \Rightarrow \exists C \forall x(x \in A \Rightarrow \exists u(x \cap C = \{u\})))$$

Заб: Ако A е крайно - всичко е точно. Но ако A е безкрайно вече е различно.

$f : A \rightarrow B, A \twoheadrightarrow B$ (сюрекция), то можем да ограничим домейна за да получим биекция. Тоест съществува $A_0 \subseteq A : f \upharpoonright A_0$ е биекция м-ду A_0 и B .

Лекция 4

(Бинарни) Релации Това са множества (обекти от света ни).

Пример: $P_1(A, l) \Leftrightarrow$ точката A лежи на правата l .

Обаче може да имаме различни свойства, които описват еднакви релации (множества).

Ако $P_2(A, l) \Leftrightarrow$ правата l минава през точката A ,

то $R_1 = \{ \langle A, l \rangle \mid P_1(A, l) \}$ и $R_2 = \{ \langle A, l \rangle \mid P_2(A, l) \}$ са равни. За нас релация е просто множество от наредени двойки $R \subseteq A \times B$

Опр Бинарна релация е множество, чийто елементи са наредени двойки.

$Rel(R) \Leftrightarrow \forall z(z \in R \Rightarrow \exists x \exists y(z = \langle x, y \rangle))$

Примери:

1. \emptyset - никъде недефинираната релация

2. A е множество, $A \times A$ е релация (пълна релация над A)

3. A е мн-во, $id_A = \{ \langle x, x \rangle \mid x \in A \}$ е идентитет на A .

Заб: $T = \{ \langle x, x \rangle \mid x = x \}$ не е множество (поражда парадокса на Ръсел)

def Нека R е релация.

Дефиниционна област на R наричаме: $Dom(R) \Leftrightarrow \{x \mid \exists y(\langle x, y \rangle \in R)\}$

Област на стойностите на R наричаме: $Rng(R) \Leftrightarrow \{y \mid \exists x(\langle x, y \rangle \in R)\}$

ТВ За всяка релация R , $Dom(R)$ и $Rng(R)$ са множества.

Док: $x \in Dom(R) \Rightarrow \exists y(\langle x, y \rangle \in R) \Rightarrow \exists y(\{x\} \times \{y\} \cap R \neq \emptyset) \Rightarrow \{x\} \in \bigcup R \Rightarrow Dom(R) \subseteq \bigcup \bigcup R$, $Dom(R)$ е определима съвкупност (клас).

$\bigcup \bigcup R$ е множество $\Rightarrow Dom(R)$ е множество.

Аналогично получаваме $y \in Rng(R) \Rightarrow y \in \bigcup \bigcup R \Rightarrow Rng(R) \subseteq \bigcup \bigcup R$ - множество.

ТВ $Rel(R) \Rightarrow R \subseteq Dom(R) \times Rng(R)$

Док: Нека $z \in R$. Тогава z е наредена двойка. Нека x и y са т.ч. $z = \langle x, y \rangle$.

Тогава $x \in Dom(R)$ и $y \in Rng(R)$. Следователно $z = \langle x, y \rangle \in Dom(R) \times Rng(R)$

Операции върху релации R, S - релации, то $\Rightarrow R \cup S, R \cap S, R \setminus S$ са релации

$R^{-1} \Leftrightarrow \{ \langle x, y \rangle \mid \langle y, x \rangle \in R \}$ е съвкупност от наредени двойки. Обаче множество ли е?

$R^{-1} = \{ \langle x, y \rangle \mid \langle y, x \rangle \in R \} = \{u \mid \exists x \exists y(u = \langle x, y \rangle \wedge \langle y, x \rangle \in R)\} = \{u \mid u \in Rng(R) \times Dom(R) \wedge \exists x, y(u = \langle x, y \rangle \wedge \langle y, x \rangle \in R)\}$

def Операция - композиция на релации. $(f \circ g)(x) = g(f(x))$

Опр Композицията на релациите R и S наричаме мн-вото:

$R \circ S \Leftrightarrow \{ \langle x, y \rangle \mid \exists z(\langle x, z \rangle \in R \wedge \langle z, y \rangle \in S) \} = \{u \mid (\exists x, y, z)(u = \langle x, y \rangle \wedge \langle x, z \rangle \in R \wedge \langle z, y \rangle \in S)\} = \{u \mid u \in Dom(R) \times Rng(S) \wedge (\exists x, y, z)(u = \langle x, y \rangle \wedge \langle x, z \rangle \in R \wedge \langle z, y \rangle \in S)\}$

СВ Нека R, S_1, S_2 са релации. Тогава са изпълнени:

1. $R \circ (S_1 \circ S_2) = (R \circ S_1) \circ S_2$ - асоциативност
2. $(S_1 \cup S_2) \circ R = (S_1 \circ R) \cup (S_2 \circ R)$
 $R \circ (S_1 \cup S_2) = (R \circ S_1) \cup (R \circ S_2)$
3. $R \circ (S_1 \cap S_2) \subseteq (R \circ S_1) \cap (R \circ S_2)$, обратното включване не винаги е вярно.
4. $R \circ (S_1 \setminus S_2) \supseteq (R \circ S_1) \cap (R \circ S_2)$
5. $(S_1 \circ S_2)^{-1} = S_2^{-1} \circ S_1^{-1}$

Док 3: Нека $u \in R \circ (S_1 \cap S_2)$. Нека x, y, z , т.ч. $u = \langle x, y \rangle, \langle x, z \rangle \in R$ и $\langle z, y \rangle \in S_1 \cap S_2$. Тогава $\langle z, y \rangle \in S_1$ и $\langle z, y \rangle \in S_2$. След. $\langle x, y \rangle \in R \circ S_1$ и $\langle x, y \rangle \in R \circ S_2$. Така $u = \langle x, y \rangle \in (R \circ S_1) \cap (R \circ S_2)$.

$R = \{\langle x, z \rangle, \langle x, t \rangle\}, z \neq t$
 $S_1 = \{\langle z, y \rangle\}$
 $S_2 = \{\langle t, y \rangle\}$
 $S_1 \cap S_2 = \emptyset, R \circ (S_1 \cap S_2) = R \circ \emptyset = \emptyset$
 $R \circ S_1 = \langle x, y \rangle$
 $R \circ S_2 = \langle x, y \rangle$
 $\implies (R \circ S_1) \cap (R \circ S_2) = \{\langle x, y \rangle\}$

Док 4: Нека $u \in (R \circ S_1) \setminus (R \circ S_2)$. Така $u \in R \circ S_1$ и $u \notin R \circ S_2$. Нека x, y, z са такива че $\langle x, z \rangle \in R$ и $\langle z, y \rangle \in S_1$. Понеже $u \notin R \circ S_2$, то $\forall t (\langle x, t \rangle \in R \implies \langle t, y \rangle \notin S_2)$. Но $\langle x, z \rangle \in R$, след. $\langle z, y \rangle \notin S_2$. Обаче $\langle z, y \rangle \in S_1$, от където $\langle z, y \rangle \in S_1 \setminus S_2$. От $\langle x, z \rangle \in R$, следва че $u = \langle x, y \rangle \in R \circ (S_1 \setminus S_2)$.
 Обратното не е винаги вярно!

Заб: (\circ) не е комутативна!

Опр Нека $Rel(R)$ и $A \subseteq Dom(R)$. Образ на A при R наричаме множеството:
 $R[A] = \{y \mid \exists (x \in A)(\langle x, y \rangle \in R)\} \subseteq Rng(R)$

Опр Нека $Rel(R)$ и $B \subseteq Rng(R)$. Праобраз на B при R наричаме множеството:
 $R^{-1}[B] = \{x \mid \exists (y \in B)(\langle x, y \rangle \in R)\} \subseteq Dom(R)$

Тв (за коректност) Нека R е релация и $B \subseteq Rng(R)$. Тогава $(R^{-1})[B] = R^{-1}[B]$, където $(R^{-1})[B]$ е образ на B при R^{-1} , а $R^{-1}[B]$ е праобраз на B при R .

Док: За вс. x е в сила че $x \in (R^{-1}[B]) \iff \exists y (\langle x, y \rangle \in R^{-1} \wedge y \in B) \iff \exists y (y \in B \wedge \langle x, y \rangle \in (R^{-1})^{-1}) \iff \exists y (y \in B \wedge \langle x, y \rangle \in R) \iff x \in (R^{-1})^{-1}[B]$

Тв Нека $\forall x (x \in X \implies x \subseteq Dom(R))$. Тогава $R[\bigcup X] = \bigcup \{R[x] \mid x \in X\}$. Тук $Rel(R)$ и X е множество. Това е коректно защото $(\forall x \in X) x \subseteq Dom(R) \implies \bigcup X \subseteq Dom(R)$.
 $a \in \bigcup X \implies \exists x (x \in X \wedge a \in x) \implies a \in Dom(R)$. Сега това множество ли е?
 Нека $x \in X \implies x \subseteq Dom(R) \implies R[x] \subseteq R[Dom(R)]$. Тогава ако $A \subseteq A_1 \subseteq Dom(R) \implies R[A] \subseteq R[A_1]$ и съответно $B \subseteq B_1 \subseteq Rng(R) \implies R^{-1}[A] \subseteq R^{-1}[B_1]$. Значи това е определяема съвкупност $\{R[x] \mid x \in X\} \subseteq \mathcal{P}(Rng(R))$. Всичко е коректно, сега доказателството.

Док: Нека $b \in R[\bigcup X]$. Нека $a \in \bigcup X$ е т.ч. $\langle a, b \rangle \in R$. Нека $x_0 \in X$ е такъв че $a \in x_0$.
Тогава $b \in R[x_0]$. Следователно $b \in \bigcup \{R[x] \mid x \in X\}$

Сега обратното включване. Нека $b \in \bigcup \{R[x] \mid x \in X\}$. Нека $x_0 \in X$ е т.ч. $b \in R[x_0]$. Но $x_0 \subseteq \bigcup X$. Пак от монотонността следва че $b \in R[x_0] \subseteq R[\bigcup X]$.

Тв Нека $Rel(R)$ и X е мн-во за което е изп. че $\forall x(x \in X \Rightarrow x \subseteq Dom(R))$. Тогава $R[\cap X] \subseteq \cap \{R[x] \mid x \in X\}$, като не винаги е в сила обратното включване. Ако допълнително $(\forall y Rng(R))(\exists! x \in Dom(R))(\langle x, y \rangle \in R)$ (нещо като инективност), то тогава $R[\cap X] = \cap \{R[x] \mid x \in X\}$.

Док: Нека $b \in R[\cap X]$. Нека $a \in \cap X$ е такава че $\langle a, b \rangle \in R$. Следователно за всяко $x \in X, a \in x$. Следователно за всяко $x \in X, b \in R[x]$. Така b принадлежи на всички елементи на $\{R[x] \mid x \in X\}$, значи $b \in \cap \{R[x] \mid x \in X\}$.

Пример: $X = \{\{a_1\}, a_2\}$ и $a_1 \neq a_2, R = \{\langle a_1, b_1 \rangle, \langle a_2, b_2 \rangle\}$
 $\cap X = \{a_1\} \cap \{a_2\} = \emptyset, R[\cap X] = \emptyset$
 $R[\{a_1\}] = \{y \mid (\exists x \in \{a_1\})(\langle x, y \rangle \in R)\} = \{y \mid \langle a_1, y \rangle \in R\} = \{b\}$.
Значи $R[\{a_2\}] = \{b\}, \{R[x] \mid x \in X\} = \{\{b\}\}$.
 $\cap \{\{b\}\} = \{b\}, A = \{a\}, a = \{b\},$
 $x \in \cap A \Leftrightarrow \forall a \in A(x \in a)$

Нека $(\forall y \in Rng(R))(\exists! x \in Dom(R))(\langle x, y \rangle \in R)$. Нека $b \in \cap \{R[x] \mid x \in X\}$.
Следователно за всяко $x \in X, b \in R[x]$, т.е. за всяко $x \in X$ същ $a \in x$, т.ч. $\langle a, b \rangle \in R$.

$b \in Rng(R): x \neq \emptyset$. Нека $x_0 \in X$. Тогава $b \in R[x_0]$. След $b \in Rng(R)$. Нека $a_0 \in x_0$ е т.ч. $\langle a_0, b \rangle \in R$. Нека сега $x \in X$ е произволно и $a \in x$ е т.ч. $\langle a, b \rangle \in R$. Но $\langle a_0, b \rangle \in R$, от където $a_0 = a$. В частност $a_0 \in x$, но x е произволно. Следователно $a_0 \in \cap X$. Но тогава $b \in R[\cap X]$, защото $\langle a_0, b \rangle \in R$ и $a_0 \in \cap X$. Така $\cap \{R[x] \mid x \in X\} \subseteq R[\cap X]$

< Функции >

Опр Казваме че релацията R е функция,
ако $Funct(R)$, където $Funct(R) \Leftrightarrow Rel(R) \wedge \forall x \forall y \forall y' (\langle x, y \rangle \in R \wedge \langle x, y' \rangle \in R \Rightarrow y = y')$

1. $Funct(R) \Rightarrow Rel(R)$
2. $Funct(R), Dom(R) = A, Rng(R) \subseteq B$, то пишем $R : A \rightarrow B$
3. $Funct(R), Dom(R) \subseteq A, Rng(R) \subseteq B$, то ще казваме че R е частична функция от A към B . Ще пишем $R : A \rightarrowtail B$
4. $R : A \rightarrow B$ и $Rng(R) = B$, ще казваме че R е сюрекция (епиморфизъм) на A върху B .
Означаваме с $R : A \twoheadrightarrow B$
5. $R : A \rightarrow B, R$ е инекция (мономорфизъм), ако $\forall x \forall x' \forall y (x \neq x' \wedge \langle x, y \rangle \in R \Rightarrow \langle x', y \rangle \notin R)$. Означаваме $R : A \rightarrowtail B$

6. $R : A \rightarrow B$ е биекция, ако R е сюрекция на A в-ху B и R е инекция. Означаваме $R : A \twoheadrightarrow B$

Понеже функциите са релации, директно се пренасят и понятията за образ и праобраз.

Ще използваме f, g, h, \dots , за да означаваме че дадена релация е функция.

Ако $Func(f)$, вместо $\langle x, y \rangle \in f$ ще пишем $f(x) = y$

Следствие Нека $Func(f)$ и нека X и Y са такива мн-ва че:

$(\forall x \in X)(x \subseteq Dom(f))$ и $(\forall y \in Y)(y \subseteq Rng(f))$.

Тогава $f[\bigcup X] = \bigcup \{f[x] \mid x \in X\}$ и $f[\bigcap X] \subseteq \bigcap \{f[x] \mid x \in X\}$ (равенство не винаги се достига).

Изпълнено е че $f^{-1}[\bigcup X] = \bigcup \{f^{-1}[x] \mid x \in X\}$ и $f^{-1}[\bigcap X] = \bigcap \{f^{-1}[x] \mid x \in X\}$.

$\forall y \in Rng(R) \exists! x \in Dom(R)(\langle x, y \rangle \in R)$

(\Rightarrow) Нека $Func(f^{-1})$. Нека x, x', y са т.ч. $x \neq x'$ и $\langle x, y \rangle \in f$. Тогава $\langle y, x \rangle \in f^{-1}$. Ако доп, че $\langle x', y \rangle \in f$, то $\langle y, x' \rangle \in f^{-1}$. Понеже f^{-1} е функция, то $x = x'$. Но f^{-1} е функция, т.е. $x \neq x' \Rightarrow$ Противоречие! $\Rightarrow \langle x', y \rangle \notin f$ и значи f е инективна.

(\Leftarrow) Нека f е инективна. Нека x, y, y' са т.ч. $\langle x, y \rangle, \langle x, y' \rangle \in f^{-1}$.

Тогава $\langle y, x \rangle, \langle y', x \rangle \in f$ и понеже f е инективна то $y = y'$. Следователно $Func(f^{-1})$.

Тв Нека f и g са функции.

Тогава $f \circ g$ е функция с $Dom(f \circ g) = \{x \mid x \in Dom(f) \wedge f(x) \in Dom(g)\}$.

За всяко $x \in Dom(f \circ g)$ е вярно $(f \circ g)(x) = f(g(x))$.

Док: $Rel(f \circ g)$. Нека $\langle x, y \rangle, \langle x, y' \rangle \in f \circ g$. Нека z, z' са т.ч. $\langle x, z \rangle \in f \wedge \langle z', y \rangle \in g$ и $\langle x, z' \rangle \in f \wedge \langle z', y' \rangle \in g$

$Func(f) \Rightarrow z = z' \Rightarrow \langle z, y \rangle, \langle z, y' \rangle \in g \Rightarrow y = y'$ (от $Func(g)$)

Нека $x \in Dom(f \circ g)$. Нека y е т.ч. $\langle x, y \rangle \in f \circ g$. Нека z е т.ч. $\langle x, z \rangle \in f$ и $\langle z, y \rangle \in g$. Тогава $x \in Dom(f)$ и $z = f(x)$. Но $z \in Dom(g)$, от където $f(x) \in Dom(g)$.

Сега наобратно. Взимаме $x \in Dom(f)$ и $f(x) \in Dom(g)$. Тогава $\langle x, f(x) \rangle \in f$ и $\langle f(x), g(f(x)) \rangle \in g$. Следователно $\langle x, g(f(x)) \rangle \in f \circ g$. В частност получаваме че $x \in Dom(f \circ g)$ и понеже $Func(f \circ g)$, то $(f \circ g)(x) = g(f(x))$.

Опр Казваме, че функциите f и g са съвместими, ако $Func(f \cup g)$.

Опр $f : A \rightarrow B, A_1 \subseteq A$

Рестрикция на f до A_1 : $f \upharpoonright A_1 \Leftarrow f \cap (A_1 \times Rng(f))$

Тв f и g са съвместими $\iff f \upharpoonright (Dom(f) \cap Dom(g)) = g \upharpoonright (Dom(f) \cap Dom(g))$

Док: *To be continued...*

Да уточним някакви неща:

$$f : A \rightarrow B, A_1 \subseteq A = \text{Dom}(f)$$

$$\text{Рестрикция на } f \text{ до } A_1: f \upharpoonright A_1 = f \cap (A_1 \times \text{Rng}(f)) = \{ \langle x, f(x) \rangle \mid x \in A_1 \}$$

1. $\text{Funct}(f \upharpoonright A_1)$
2. $f \upharpoonright A_1 \subseteq f \upharpoonright A$
3. $A_1 \subseteq A_2 \subseteq A \Rightarrow f \upharpoonright A_1 \subseteq f \upharpoonright A_2$

Опр f и g са съвместими функции, ако $f \cup g$ е функция.

ТВ Функциите f и g са съвместими $\Leftrightarrow f \upharpoonright (\text{Dom}(f) \cap \text{Dom}(g)) = g \upharpoonright (\text{Dom}(f) \cap \text{Dom}(g))$

Док: (\rightarrow) Нека $\text{Funct}(f \cup g)$. Нека $u \in f \upharpoonright (\text{Dom}(f) \cap \text{Dom}(g))$. Тогава $u = \langle x, y \rangle$ като $x \in \text{Dom}(f) \cap \text{Dom}(g)$ и $y = (f \upharpoonright (\text{Dom}(f) \cap \text{Dom}(g)))(x) = f(x)$. Понеже $x \in \text{Dom}(g)$, то $\langle x, g(x) \rangle \in g$. Така $\langle x, f(x) \rangle, \langle x, g(x) \rangle \in f \cup g$. Понеже $\text{Funct}(f \cup g)$, то $f(x) = y = g(x)$. След. $u = \langle x, y \rangle = \langle x, g(x) \rangle \in g$ и понеже $x \in \text{Dom}(f) \cap \text{Dom}(g)$, то $u = \langle x, y \rangle \in g \upharpoonright (\text{Dom}(f) \cap \text{Dom}(g))$.

(\Leftarrow) Нека $f \upharpoonright (\text{Dom}(f) \cap \text{Dom}(g)) = g \upharpoonright (\text{Dom}(f) \cap \text{Dom}(g))$. Ясно е, че $\text{Rel}(f \cup g)$. Нека $\langle x, y \rangle, \langle x, y' \rangle \in f \cup g$

Възможни са 3 случая:

1. $\langle x, y \rangle, \langle x, y' \rangle \in f$. Но $\text{Funct}(f)$, от където $y = y'$.
2. $\langle x, y \rangle, \langle x, y' \rangle \in g$. Подобно - получава се $y = y'$
3. $\langle x, y \rangle \in f, \langle x, y' \rangle \in g$. Тогава $x \in \text{Dom}(f), x \in \text{Dom}(g)$. След $x \in \text{Dom}(f) \cap \text{Dom}(g)$. Така $y = f(x) = g(x) = y'$

ТВ Нека F е множество от две по две съвместими функции. Тогава $\bigcup F$ е функция като: $\text{Dom}(\bigcup F) = \bigcup \{ \text{Dom}(f) \mid f \in F \}$ $\text{Rng}(\bigcup F) = \bigcap \{ \text{Rng}(f) \mid f \in F \}$

Док: Ясно е, че $\text{Rel}(\bigcup F)$. Нека $\langle x, y \rangle \in \bigcup F$ и $\langle x, y' \rangle \in \bigcup F$. Нека $f, f' \in F$ са такива че $\langle x, y \rangle \in f$ и $\langle x, y' \rangle \in f'$. Тогава $\text{Funct}(f \cup f')$, като $\langle x, y \rangle, \langle x, y' \rangle \in f \cup f'$. Следователно $y = y'$. Така получаваме $\text{Funct}(\bigcup F)$.

Нека $x \in \text{Dom}(\bigcup F)$. Нека y е т.ч. $\langle x, y \rangle \in \bigcup F$. Нека $f_0 \in F$ е такова че $\langle x, y \rangle \in f_0$. Тогава $x \in \text{Dom}(f_0)$ и следователно $x \in \bigcup \{ \text{Dom}(f) \mid f \in F \}$. Нека сега $f_0 \in F$ е т.ч. $x \in \text{Dom}(f_0)$. Но $f_0 \subseteq \bigcup F$ и $\bigcup F$ е функция, следователно $\text{Dom}(f_0) \subseteq \text{Dom}(\bigcup F)$. Следователно $x \in \text{Dom}(\bigcup F)$

Лекция 5

Опр За $f : \mathcal{P}(A) \rightarrow \mathcal{P}(A)$, ще казваме че f е монотонна, ако:
 $(\forall X_1 \supset A)(\forall X_2 \subseteq A)(X_1 \subseteq X_2 \rightarrow f(X_1) \subseteq f(X_2))$

Опр И за монотонна $f : B \rightarrow B$, x е неподвижна точка на f , ако $f(x) = x$

Лема (Тарски)

Нека $f : \mathcal{P}(A) \rightarrow \mathcal{P}(A)$ е монотонна функция. Тогава f има неподвижна точка.

Нещо повече, f има най-малка и най-голяма неподвижна точка:

тоест съществуват $X_1, X_2 \in \mathcal{P}(A)$ т.ч. $f(X_1) = X_1, f(X_2) = X_2$ и за всяко $X \in \mathcal{P}(A)$ с $f(X) = X$ е изпълнено, че $X_1 \subseteq X \subseteq X_2$.

Док: Нека $\Pi = \{X \mid X \subseteq A \wedge f(X) \subseteq X\}$ Понеже $A \in \Pi$, то $\Pi \neq \emptyset$. Нека $X_1 = \bigcap \Pi$. За вс. $X \in \Pi$, $X_1 = \bigcap \Pi \subseteq X$. Понеже f е монотонна, то за вс. $X \in \Pi$, $f(X_1) \subseteq f(X) \subseteq X$. Следователно $f(X_1) \subseteq \bigcap \Pi = X_1$. Понеже $X_1 \subseteq A$, то $X_1 \in \Pi$. Отново от монотонността на f имаме, че $f(f(X_1)) \subseteq f(X_1)$. Значи $f(X_1) \in \Pi$. Следователно $X_1 \subseteq f(X_1)$. От тук $f(X_1) = X_1$ и така X_1 е неподвижна точка на f . Ясно се вижда че: $f(X) = X \implies x \in \Pi \implies X_1 = \bigcap \Pi \subseteq X \implies X_1$ е най-малката неподвижна точка на f

За най-голяма неподвижна точка - за домашна!

(от Тинко)

< Равномощни множества. Сравняване на множества по мощност >

def Казваме че A и B са равномощни, ако съществува биекция на A върху B , тоест $\exists f(f : A \rightarrow B)$. Означения: $|A| = |B|$ или $\overline{A} = \overline{B}$
Съответно $\overline{A} \neq \overline{B} \iff \neg(\overline{A} = \overline{B})$

Казваме че мощността на A не надминава мощността на B , ако $\exists f(f : A \rightarrow B)$.
Пишем $\overline{A} \leq \overline{B}$.

Казваме че мощността на A е строго по-малка от мощността на B , ако $\overline{A} \leq \overline{B} \wedge \overline{A} \neq \overline{B}$.
Пишем $\overline{A} < \overline{B}$.

Св

1. $\overline{A} = \overline{A}, Id_A : A \rightarrow A$
2. $\overline{A} = \overline{B} \implies \overline{B} = \overline{A}$
3. $\overline{A} = \overline{B} \wedge \overline{B} = \overline{C} \implies \overline{A} = \overline{C}$

Док 2: Нека $f_0 : A \rightarrow B$ (свидетел за съществуващата биекция), тогава $f_0^{-1} : B \rightarrow A$.
Значи $\exists f'(f' : B \rightarrow A)$

Док 3: $\exists f(A \twoheadrightarrow B)$ и $\exists f(B \twoheadrightarrow C)$. Нека вземем свидетели: $f_0 : A \twoheadrightarrow B$, $f_1 : B \twoheadrightarrow C$.

Нека $h = f_0 \circ f_1$, т.е. $h(x) = f_1(f_0(x))$. Вижда се че $h : A \twoheadrightarrow C$. Следователно $\exists f'(f' : A \twoheadrightarrow C)$

Нека A и c са произволни множества. Тогава $\overline{\overline{A}} = \overline{\overline{A} \times \{c\}}$ и $\overline{\overline{A}} = \overline{\{c\} \times A}$

Дефинираме $f : f(a) = \langle a, c \rangle$ за вс. $a \in A$. $f = \{u \mid \exists a(a \in A \wedge u = \langle a, c \rangle)\} = \{\langle a, c \rangle \mid a \in A\}$, съответно тук отделяме $u \in A \times \{c\}$. **idk???**

ТВ $A \neq \emptyset \iff \neg \exists B \forall x(x \in B \iff \overline{x} = \overline{A})$

Док: Нека $A \neq \emptyset$. $a_0 \in A$. Да доп. че $\exists B \forall x(x \in B \iff \overline{x} = \overline{A})$. Нека B е свидетел за съществуването $\forall x(x \in B \iff \overline{x} = \overline{A})$. И нека вземем $B_0 \Leftarrow \{w \mid w \in B \wedge \exists c(w = A \times \{c\})\}$. Значи $Rel(\bigcup B_0)$.

Нека t е произволно множеството, тогава $A \times \{t\} \in B_0$. Значи за $\langle a_0, t \rangle \in \bigcup B_0$.

Тогава $t \in Rng(\bigcup B_0)$. Така, $\forall t(t \in Rng(\bigcup B_0))$ - абсурт! (от допускането че B_0 съществува).

Допускането че $A \neq \emptyset$ беше съществено.

Ако $A = \emptyset$, то $\exists B(x \in B \iff \overline{x} = \overline{A})$. И единствената възможност е $B = \{\emptyset\}$

ТВ $\forall A \forall B \exists A' \exists B'(\overline{A} = \overline{A'} \wedge \overline{B} = \overline{B'} \wedge A' \cap B' = \emptyset)$

Ще дефинираме $\overline{A} + \overline{B} \Leftarrow \overline{A' \cup B'}$. Как го постигаме?

Взимаме $c_1 \neq c_2$ и тогава $A' \Leftarrow A \times \{c_1\}$ и $B' \Leftarrow B \times \{c_2\}$. А $A' \cap B' = \emptyset$

СВ Ако $\overline{A'} = \overline{A''} \wedge \overline{B'} = \overline{B''} \wedge A' \cap B' = \emptyset \wedge A'' \cap B'' = \emptyset \implies \overline{A' \cup B'} = \overline{A'' \cup B''}$

Док: Взимаме свидетели $f_1 : A' \twoheadrightarrow A''$ и $f_2 : B' \twoheadrightarrow B''$, тогава $f_1 \cup f_2$ е функция, защото f_1 и f_2 са съвместими. Съответно $Dom(f_1 \cup f_2) = Dom(f_1) \cup Dom(f_2) = A' \cup B'$. Аналогично за $Rng(f_1 \cup f_2)$

def Бихме искали да го дефинираме така $\overline{\overline{A} \cdot \overline{B}} = \overline{\overline{A} \times \overline{B}}$.

Пак ще вземем равномошни на A и B . $\overline{A} = \overline{A'} \wedge \overline{B} = \overline{B'} \implies \overline{\overline{A} \cdot \overline{B}} = \overline{\overline{A'} \times \overline{B'}}$.

def Ами степенуване - k^n ? Ако $\overline{A} = k$ и $\overline{B} = n$, то това ще са всички функции от B в A .

Искаме да покажем $\overline{\overline{A}} = \overline{\overline{B} \cdot A}$. Тоест $B_A = \{f \mid f : B \rightarrow A\}$.

$\overline{A} = \overline{A'} \wedge \overline{B} = \overline{B'} \implies \overline{\overline{A}} = \overline{\overline{B'} \cdot A'}$

Задачи

1. $\forall A \exists A'(\overline{A} = \overline{A'} \wedge A \cap A' = \emptyset)$

2. Нека $A \cap B = \emptyset$, тогава $\overline{\overline{A \cup B}} = \overline{\overline{A}} \times \overline{\overline{B}}$

3. $2 \Leftarrow \{0, 1\}$, където $0 \Leftarrow \emptyset$, $1 \Leftarrow \{\emptyset\}$

4. $\overline{\overline{A_2}} = \overline{\overline{\mathcal{P}(A)}}$

5. $\overline{\overline{A \times B}} = \overline{\overline{A}} \cdot \overline{\overline{B}}$ (TODO: някакъв по-човешки синтаксис)

Т (Кантор-Шрьодер-Берщайн) $\overline{A} \leq \overline{\overline{B}} \wedge \overline{\overline{B}} \leq \overline{A} \implies \overline{A} = \overline{\overline{B}}$

Док: Нека $f : A \rightarrow B, g : B \rightarrow A$. Търсим биекция h . Можем да дефинираме $h \Leftrightarrow (f \upharpoonright X) \cup (h^{-1} \upharpoonright (A \setminus X))$, за някое $X \subseteq A$. Как да вземем такова X ? Трябва ни $A \setminus g[B \setminus f[x]] = X$ (търсим неподвижна точка?). Дефинираме $F : \mathcal{P}(A) \rightarrow \mathcal{P}(A)$, за $X \subseteq A$ полагаме $F(X) \Leftrightarrow A \setminus g[B \setminus f[x]]$ и твърдим че F е монотонно. *To be continued...*