

Dodatna poglavja iz matematike za fizike

Skripta

Jože Zobec,

Miha Čančula

POVZETO PO PREDAVANJIH

Izred. prof. dr. Sašo Strle

Uvod

Predmet je sestavljen iz dveh delov:

1. Teorija (diskretnih) grup in njih upodobitve,
 - grupe, podgrupe, homomorfizmi, kvocientne grupe (strukturni izreki)
 - reprezentacije končnih grup in kompaktnih grup
2. Gladke mnogoterosti in tenzorji
 - tangentni sveženj \rightarrow kovariantni in kontravariantni tenzorji,
 - diferencialne forme \in multilinearne algebra
 - integracija na mnogoterosti
 - krovni prostori, fundamentalna grupa

To skripto sem se odločil napisati, ker v je do sedaj nihče se ni poizkusil, in ker je dobro imeti tako gradivo na računalniku. Matematiki operirajo z mnogimi, nam fizikom nenavadnimi pojmi in težko jim je slediti. Dobro je, če lahko na računalniku enostavno uporabiš iskalnik besed ter se tako lažje navigiraš preko tako zajetnega gradiva. To je meni glavna motivacija.

Odločil sem se, da bom poleg tega dodal tudi neke vrste cheat-sheet za fizike, ki vsebuje pojme, ki so fizikom grozljivi, pa vendar niso (npr. *homomorfizem*, *endomorfizem*, *algebra*...). Tam je vse na enem mestu.

Jože Zobec,

Ribnica, 31. oktober 2013

Del I

Grupe

Poglavje 1

Osnovni pojmi

Definicija:

Grupa G je neprazna množica z binarno operacijo μ , ki jo imenujemo množenje: $\mu : G \times G \rightarrow G$, za katero velja ($a, b, c \in G$):

1. operacija μ je asociativna: $\mu(\mu(a, b), c) = \mu(a, \mu(b, c))$.
2. množica G vsebuje element, ki je za operacijo μ identiteta – e : $\mu(e, a) = a$.
3. $\forall a \in G, \exists a^{-1} \in G$, ki je inverzni element za operacijo μ : $\mu(a, a^{-1}) = e$.

Z drugimi besedami, imamo množico, ki je zaprta za neko asociativno operacijo μ . Po navadi enačimo $\mu(a, b) \equiv ab$ in pišemo skrajšano.

Definicija:

Grupa G je *komutativna* ali *abelova*, če za $\forall a, b \in G$ velja $ab = ba$. V tem primeru operacijo μ imenujemo seštevanje in zapišemo $a + b = b + a$.

Opombe:

- Množica z asociativno operacijo je *polgrupa* (tj. nima nujno vseh inverzov ali identitete).
- Polgrupa z enoto (identiteto) je *monoid*.
- Identiteto, e , običajno označimo z 1.
- V primeru abelove grupe včasih operacijo označimo z znakom '+' in identiteto z '0'.

Primeri iz znanih množic števil:

- $(\mathbb{N}, +)$, $+: \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ je asociativna, vendar nima identitete (število 0 ni naravno število) – torej je polgrupa.
- $(\mathbb{N} \cup \{0\}, +)$ je monoid, saj nimamo inverzov. Do grupe dopolnimo tako: $(\mathbb{Z}, +)$.
- (\mathbb{N}, \cdot) je spet monoid. Do grupe manjkajo ulomki. Grupa je torej (\mathbb{Q}, \cdot) .

Opazimo, da imamo nad množico \mathbb{Q} v resnici dve asociativni operaciji: množenje in seštevanje.

Definicija:

Obseg je (neprazna) množica O , ki ima med svojimi elementi dve asociativni operaciji: množenje, za katero je O grupa; in seštevanje, za katero je O abelova grupa, med operacijama pa velja distributivnostni zakon. Tj. $\forall a, b, c \in O, a(b + c) = ab + ac$.

Kadar imamo opravka z množico, ki je abelova grupa za operacijo seštevanja, za operacijo množenja pa le polgrupa, govorimo o *kolobarju*.

Ostali primeri grup:

- Za $\forall n \in \mathbb{N}$ je množica ostankov pri deljenju z n končna grupa z n elementi, operacija je '+', po modulu n . Ta grupa je $\mathbb{Z}_n = \{0, 1, 2, \dots, n-1\}$; $(a, b) \mapsto a + b \pmod{n}$:

– identiteta: 0,

– inverz: $a^{-1} = n - a$

- $S^1 = \mathbb{T}$ – krožnica. $S^1 = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| = 1\}$ je grupa za operacijo množenja kompleksnih števil, to je gladka krivulja. Enotsko krožnico lahko parametrično zapišemo tudi kot $\{e^{i\phi} \mid \phi \in \mathbb{R}\}$.

- $C_n = \{e^{2i\pi k/n} \mid k \in 0, 1, 2, \dots, n-1\}$, oz. ciklična grupa z n elementi. Grupna operacija je množenje kompleksnih števil. Dobimo jo kot grupo n -tih korenov. C_n in \mathbb{Z}_n sta algebrajično ekvivalentna.

Definicija:

Če sta G in H grupi, je preslikava $f : G \rightarrow H$ *homomorfizem*, če velja $f(g_1 \cdot g_2) = f(g_1)f(g_2)$. Bijektivni homomorfizem imenujemo *izomorfizem*. G in H sta *izomorfni*, če med njima obstaja kak tak izomorfizem.

Zgled:

Trdimo, da sta \mathbb{Z}_n in C_n izomorfni. Poiskati moramo $f : \mathbb{Z}_n \rightarrow C_n$. Uganemo

$$f(k) \equiv e^{2i\pi k/n},$$

kar je očitno bijekcija. Pokazati moramo, da je še homomorfizem. V grupi \mathbb{Z}_n je naša operacija grupnega množenja seštevanje po modulu n . Torej

$$f(k_1 \cdot k_2) = f(k_1 + k_2 \pmod{n}) = e^{2i\pi(k_1+k_2)/n} = e^{2i\pi k_1/n} e^{2i\pi k_2/n} = f(k_1)f(k_2).$$

■

1.1 Grupe linearnih transformacij

Definicija:

Množica V je *vektorski prostor* nad obsegom $\mathbb{F} \in \{\mathbb{R}, \mathbb{C}, \mathbb{H}\}$, kadar imamo elementi operaciji seštevanja:

$$\begin{aligned} + : V \times V &\rightarrow V, \\ (v, w) &\mapsto v + w, \end{aligned}$$

za katero je abelova grupa; in množenje s skalarji,

$$\begin{aligned} \cdot : \mathbb{F} \times V &\rightarrow V, \\ (\lambda, v) &\mapsto \lambda v, \end{aligned}$$

za katero je asociativna in velja distributivnostni zakon. Pri množenju s skalarjem ponavadi ne pišmo pike.

Algebra je vektorski prostor nad kolobarjem.

Naj bo V vektorski prostor nad obsegom \mathbb{F} in naj bo $L_{\mathbb{F}}(V)$ množica linearnih preslikav (veljata *asociativnost* in *homogenost*):

$$\begin{aligned} T : V &\rightarrow V, \\ T(\lambda v + \mu w) &= \lambda T(v) + \mu T(w). \end{aligned}$$

Linearne preslikave lahko množimo s skalarji:

$$\begin{aligned} (S + T)v &= Sv + Tv, \\ (\lambda S)v &= \lambda(Sv). \end{aligned}$$

Opazimo, da je $L_{\mathbb{F}}(V)$ vektorski prostor nad \mathbb{F} . Poleg tega, pa lahko preslikave v $L_{\mathbb{F}}(V)$ še komponiramo, čemur rečemo produkt:

$$(ST)(v) = S(T(v)).$$

Poraja se nam vprašanje: ali je $L_{\mathbb{F}}(V)$ za množenje (komponiranje) grupa? Ničelna linearna preslikava gotovo ni obrnljiva, $0 : V \rightarrow V$, $v \mapsto 0$. Kaj pa ostale? Preslikava $T : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$, $(x, y) \mapsto (x, 0)$ ni obrnljiva.

Obrnljive so natanko *bijektivne linearne preslikave*. Množico vseh teh označimo z

$$GL_{\mathbb{F}}(V) = \{T \in L_{\mathbb{F}}(V) \mid T \text{ ima inverz}\}.$$

$GL_{\mathbb{F}}(V)$ imenujemo *splošna linearna grupa* – grupa za komponiranje linearnih preslikav. Naj bo $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ baza v prostoru V , nad obsegom \mathbb{F} . Potem lahko linearne preslikave predstavimo z matrikami

$$M_n(\mathbb{F}) = \{\text{matrike dimenzije } n \times n, \text{ s koeficienti v } \mathbb{F}\}.$$

Potem $GL_{\mathbb{F}}(V)$ ustrezajo obrnljive matrike dimenzije $n \times n$ s koeficienti v \mathbb{F} , ki jih označimo z

$$GL_{\mathbb{F}}(V) = \{A \in M_n(\mathbb{F}) \mid \det A \neq 0\}.$$

V definiciji grupe nismo trdili dnoličnosti inverzov in enote, pa te kljub temu velja. Še več, za grupo potrebujemo le „polovico“ lastnosti.

Trditev:

Naj bo G množica z asociativno operacijo, za katero velja:

- $\exists e \in G$, tako da $a \cdot e = a$, $\forall a \in G$,
- $\forall a \in G$, $\exists b \in G$, tako da $a \cdot b = e$.

Potem velja:

- (1) Če je $a \cdot a = a \Rightarrow a = e$.
- (2) G je grupa (zgoraj velja še $ae = a$ in $ab = e$).
- (3) e je en sam in b je za a enolično določen.

Dokaz: Dokazali bomo ciklično: $(1) \Rightarrow (3) \Rightarrow (2) \Rightarrow (1) \Rightarrow (3)$.

(1) Recimo, da je $a \cdot a = a$. Velja $\forall a \exists b$, tako da $a \cdot b = e$.

$$\begin{aligned} aa &= a / \cdot b \\ (aa)b &= \underbrace{ab}_e \\ a(ab) &= e \\ \Rightarrow ae &= e \end{aligned}$$

To je očitno res lahko samo, kadar $a = e$.

(3) e je en sam: recimo, da obstaja še e' z istimi lastnostmi: $\Rightarrow ae' = a, \forall a \in G$. Ker velja $\forall a \in G$, si za a izberemo $a = e'$

$$\Rightarrow a = e' : e' \cdot e' = e' \Rightarrow e' = e, \text{ po točki (1).}$$

Za dani a je b en sam: pa recimo, da je $ab = e$ in $ab' = e$.

(2) Naj za a in b velja $ab = e$. Videti želimo

$$ba = e : (ba) \cdot (ba) = b \underbrace{(ab)}_e a = \underbrace{(be)}_b a = ba.$$

Po točki (1) sledi, da je $(ba) = e$. Preveriti moramo še, da je $ea = a$, $\forall a \in G$:

$$\underbrace{e}_{ab} a = (ab)a = a(ba) = ae = a.$$

(3) Vrnimo se še nazaj k točki (3) in pokažimo enoličnost b :

$$\begin{aligned} ab &= e, \quad ab' = e, \\ ab' &= e / b \cdot \quad (\text{množimo z leve}) \\ \Rightarrow \underbrace{(ba)}_e b' &= b \\ eb' &\Rightarrow b \end{aligned}$$

■

Definicija:

Naj bo G grupa. Podmnožica $H \subseteq G$ je *podgrupa*, če je H skupaj z operacijo v G grupa. To označimo s $H \leq G$.

Očitno za H velja:

1. $e \in H$, identiteta,
2. $a \in H$, potem je tudi $a^{-1} \in H$,
3. $\forall a, b \in H$ je $ab \in H$.

Trditev:

Neprazna podmnožica $H \subseteq G$ je podgrupa, če in samo če:

- (i) $e \in H$
- (ii) $\forall a \in H$ je $a^{-1} \in H$
- (iii) $\forall a, b \in H$ je $ab \in H$

Dokaz: Res iz privzetkov in lastnosti množenja v G . ■

Trditev:

Neprazna podmnožica $H \subseteq G$ je podgrupa $\iff \forall a, b \in H$ velja $ab^{-1} \in H$.

Dokaz:

(\Rightarrow) Očitno.

(\Leftarrow) Tu si bomo pomagali s prejšnjim izrekom:

- za $b = a$ dobimo $a \cdot a^{-1} \in H$, kar zadosti pogoju (i).
- če vzamemo $a = e$ in $b = a \Rightarrow ab^{-1} = ea^{-1} = a^{-1} \in H$, kar zadosti pogoju (ii).
- $ab = a \cdot (b^{-1})^{-1} \in H$, kar zadosti pogoju (iii).

■

Posledica:

Naj bo G grupa; $\forall a \in G$ je množica

$$\langle a \rangle = \{a^n \mid n \in \mathbb{Z}\}$$

podgrupa v G , ki jo imenujemo *ciklična grupa*, generirana z a . Pri tem a^n pomeni:

$$\begin{aligned} a^0 &\equiv e, \\ a^1 &\equiv a, \\ a^2 &\equiv a \cdot a, \\ &\dots \\ a^n &\equiv a \cdot a^{n-1} = \underbrace{a \cdot a \cdot \dots \cdot a}_{n\text{-krat}}, \quad n \in \mathbb{N}. \end{aligned}$$

Element a^{-1} imenujemo inverz a . Velja $a^{-n} \equiv (a^{-1})^n$.

Dokaz: Preveriti moramo, da je za $a^n, a^m \in \langle a \rangle \in$, tudi $a^n \cdot a^{-m} \in \langle a \rangle$.

$$a^n \cdot a^{-m} = a^{n-m}$$

Recimo, da je $n, m > 0$. Za $n \geq m$ velja:

$$a^n a^{-m} = a^n (a^{-1})^m = a^{n-m+m} (a^{-1})^m = a^{n-m} \underbrace{a^m \cdot (a^{-1})^m}_e = a^{n-m}.$$

Za $n < m$ velja:

$$a^n a^{-m} = a^n (a^{-1})^m = \dots = a^{n-m} = (a^{-1})^{m-n}.$$

■

Primeri podgrup:

1. $(S^1, \cdot) \leq (\mathbb{C} \setminus \{0\}, \cdot)$,
2. $(C_n, \cdot) \leq (S^1, \cdot)$,
3. $(\mathbb{Z}_n, +_{\text{mod } n}) \not\leq (\mathbb{Z}, +)$, ker operaciji nista isti,
4. $(n\mathbb{Z}, +) \leq (\mathbb{Z}, +)$, kjer $n\mathbb{Z} = \{nk \mid k \in \mathbb{Z}\}$, torej množica celih večkratnikov števila n . Opazimo lahko, da je $n\mathbb{Z}$ ciklična grupa, generirana z n : kn pomeni

$$\underbrace{n + n + n \dots + n}_{k\text{-krat}},$$

v multiplikativnem smislu, je to n^k . Aditivni inverz je $(-1)n$, kar multiplikativno pišemo n^{-1} .

5. $\underbrace{SL_n(\mathbb{F})}_{\leq GL_n(\mathbb{F})} = \{A \in GL_n(\mathbb{F}) \mid \det A = 1\}$. Enostavno se lahko prepričamo, da je res podgrupa:

- $I \in SL_n(\mathbb{F})$, $\det I = 1$
- $A \in SL_n(\mathbb{F})$, $A^{-1} : \det(A^{-1}) = 1/\det A = 1 \Rightarrow A^{-1} \in SL_n(\mathbb{F})$
- $A, B \in SL_n(\mathbb{F})$, $\det(AB) = \det A \det B = 1 \Rightarrow AB \in SL_n(\mathbb{F})$

6. $O_n = \{A \in GL_n(\mathbb{R}) \mid A^T A = I\} \leq GL_n(\mathbb{R})$
7. $U_n = \{A \in GL_n(\mathbb{C}) \mid A^* A = I\} \leq GL_n(\mathbb{C})$, v fiziki bi A^* pisali kot A^\dagger .
8. $SO_n = SL_n(\mathbb{R}) \cap O_n$
9. $SU_n = SL_n(\mathbb{C}) \cap U_n$
10. $Sp_n = \{A \in GL_n(\mathbb{H}) \mid A^* A = I\} \leq GL_n(\mathbb{H})$, *simplektična* grupa – ohranja neko količino (v fiziki bi to bila energija). Množica \mathbb{H} je prostor kvaternionov.

Trditev:

Naj bodo $H_i \leq G$, za $i \in I$ (I je indeksna množica in se bo še velikokrat pojavljala). Potem je tudi

$$\bigcap_{i \in I} H_i \leq G$$

Dokaz: Sledi iz trditve o $ab^{-1} \dots$. Očitno res. ■

Posledica:

$\forall X \subseteq G$ obstaja najmanjša podgrupa v G , ki vsebuje X . Tej grupi rečemo podgrupa, generirana z X in jo označimo z $\langle X \rangle$.

1.2 Homomorfizmi in izomorfizmi

Definicija:

G, H grupi. Preslikava $f : G \rightarrow H$ je *homomorfizem*, če je $f(ab) = f(a)f(b) \forall a, b \in G$. Bijektivni homomorfizem imenujemo *izomorfizem*:

Opomba: Če je $f : G \rightarrow H$ homomorfizem, potem je $f(e) = e$ in $f(a^{-1}) = (f(a))^{-1}$ (torej enoto preslika v enoto in inverze preslika v inverze).

Definicija:

Endomorfizem je homomorfizem, ki slika sam nase.

Avtomorfizem je bijektivni endomorfizem, tj. izomorfizem, ki slika sam nase.

Primeri:

- H, G grupi, $H \leq G$. *Inkluzijska preslikava* $i : H \rightarrow G, h \mapsto h$ je homomorfizem.
- G grupa, $a \in G$.
 - *Leva translacija* za a je $L_a : G \rightarrow G, g \mapsto ag$.
 - *Desna translacija* za a je $R_a : G \rightarrow G, g \mapsto ga$.

L_a in R_a sta homomorfizma le za $a = e$, tedaj je $L_a = R_a$, tj. identiteta. Za $a \neq e$ pa velja $L_a(e) \neq e, R_a(e) = a \neq e$. Ampak: L_a in R_a sta bijekciji, inverza sta $L_{a^{-1}}$ in $R_{a^{-1}}$.

- $f_a : G \rightarrow G, g \mapsto aga^{-1}$ je *konjugacija* ali *notranji avtomorfizem*.

Dokaz:

- $f_a(gh) = agha^{-1} = ag \underbrace{a^{-1}a}_e ha^{-1} = f_a(g) \cdot f_a(h)$ – res endomorfizem.
- $f_a = L_a \circ R_{a^{-1}}$, obe sta bijektivni, tj. je tudi njun kompozitum, f_a bijektivna – res avtomorfizem. ■

- $\exp : (\mathbb{R}, +) \rightarrow ((0, \infty), \cdot)$ je izomorfizem (inverz je \ln , oz. \log).

Dokaz:

- Očitno bijektivna funkcija.
- Dokazati moramo, da je homomorfizem:

$$\exp(x + y) = \exp(x) \cdot \exp(y) \quad \blacksquare$$

- Za $d, n \in \mathbb{N}$ je $f_d : C_n \rightarrow C_{nd}, z \mapsto z^d$ (spomnimo se, da je $C_n = \{z \in \mathbb{C} \mid z^n = 1\}$ grupa n -tih korenov) homomorfizem.

Dokaz: Res slika v C_{nd} :

$$z^n = 1; f(z) = z^d \Rightarrow z^{nd} = (z^n)^d = 1^d = 1.$$

To je očitno homomorfizem, ki slika v C_{nd} , vendar f_d ni surjektivna. ■

- Matrična homomorfizma nad obsegom \mathbb{F} :

– Determinanta za množenje matrik: $\det : (GL_n(\mathbb{F}), \cdot) \rightarrow (\mathbb{F}, +)$, $A \mapsto \det A$ obseg.

Dokaz: $\det(AB) = \det A \det B$. ■

– Sled za seštevanje matrik: $\text{tr} : (M_n(\mathbb{F}), +)$, $A = [a_{ij}]_{i,j=1}^n \mapsto \text{tr}(A) = \sum_{i=1}^n a_{ii}$

Dokaz: $\text{tr}(A + B) = \text{tr}(A) + \text{tr}(B)$. ■

Za lažjo pisavo bomo uvedli nekaj oznak.

Oznaka: G grupa, $A, B \subseteq G$ podmnožici.

- $AB \equiv \{ab \mid a \in A, b \in B\}$
- $Aa \equiv \{aa \mid a \in A\}$
- $aB \equiv \{ab \mid b \in B\}$

Definicija:

G, H grupi, $H \leq G$. H je edinka v G (normalna podgrupa), če $\forall a \in G$ velja

$$aHa^{-1} \subseteq H.$$

Oznaka je $H \triangleleft G$.

Lema:

$H \leq G$ je edinka $\iff aHa^{-1} = H \forall a \in G$.

Dokaz:

(\Leftarrow) Očitno, saj je $aHa^{-1} = H \leq H$.

(\Rightarrow) Vemo: $aHa^{-1} \subseteq H$, $\forall a \in G$. Za poljubno izbrani $a \in G$ velja $aHa^{-1} \subseteq H$. Za svoj „ a “ izberem njegov inverz, tj. ' a^{-1} ', kar nam da $a^{-1}Ha \subseteq H$. To pomeni, $\forall h \in H, a^{-1}ha \in H$, torej $a^{-1}ha = k \in H \Rightarrow h = aka^{-1} \in aHa^{-1} \Rightarrow \forall h \in H$ je $h \in aHa^{-1} \Rightarrow H \subseteq aHa^{-1}$. Vemo, da če $A \subseteq B$ in $B \subseteq A \Rightarrow A = B$, tj.

$$aHa^{-1} = H.$$

■

Trditev:

Naj bo $f : G \rightarrow H$ homomorfizem grup. Potem velja:

(1) Slika f : $\text{im } f = \{f(g) \mid g \in G\} \leq H$.

(2) Jedro f : $\ker f = \{g \in G \mid f(g) = e\} \triangleleft G$.

Dokaz:

(1) Pokažimo, da je $\text{im } f$ res podgrupa v H :

Za $f(g_1), f(g_2) \in \text{im } f$ moramo preveriti, da je $f(g_1)(f(g_2))^{-1} \in \text{im } f$.

$$f(g_1)(f(g_2))^{-1} = f(\underbrace{g_1 g_2^{-1}}_{\in G}) \in \text{im } f \Rightarrow \text{je res grupa.}$$

(2) Pokažimo, da je $\ker f$ res edinka v G :

• Res grupa:

- $e \in \ker f$, ker je homomorfizem (identiteto slika v identiteto, tj. $e \in \ker f$).
- $a \in \ker f \Rightarrow f(a) = e \Rightarrow f(a^{-1}) = e^{-1} = e \Rightarrow a^{-1} \in \ker f$,
- $a, b \in \ker f \Rightarrow f(a) = e = f(b) \Rightarrow f(ab) = f(a)f(b) = ee = e \Rightarrow ab \in \ker f$.

• Res edinka:

$$g \in \ker f \text{ in } a \in G : f(aga^{-1}) = f(a)f(g)f(a^{-1}) = f(a)ef(a^{-1})e \Rightarrow aga^{-1} \in \ker f.$$

■

Na osnovi tega dobimo kanonično dekompozicijo homomorfizma $f : G \rightarrow H$ tako, da ga predstavimo kot kompozitum surjektivnega homomorfizma, izomorfizma in injektivnega homomorfizma.

To znamo narediti pri linearni algebri:

Trditev:

Če sta V, W vektorska prostora nad obsegom \mathbb{F} in je $T : V \rightarrow W$ linearna preslikava, označimo s $\ker T = \{v \in V \mid T(v) = 0\}$; in $\text{im } T = \{T(v) \mid v \in V\}$, velja

$$V \rightarrow V/\ker T \xrightarrow{\bar{T}} \text{im } T \hookrightarrow W$$

To „klobaso“ interpretiramo kot

- $V \rightarrow V/\ker T$ je kvocientna projekcija: $v_1 \sim v_2$, če je $(v_1 - v_2) \in \ker T$. Simbol ' \sim ' predstavlja ekvivalenčno relacijo.
- $V/\ker T \xrightarrow{\bar{T}} \text{im } T$ je preslikava inducirana s T , tj. slika enako, kot T .
- $\text{im } T \hookrightarrow W$ je inkluzija (oz. inkluzijska preslikava, glej str. 13).

Podobno bi radi naredili za grupe (tj. dobili kanonično dekompozicijo homomorfizma grup).

Definicija:

Naj bo $H \leq G$. Levi odsek H v G je aH , $a \in H$, desni odsek pa Ha , $a \in G$. Element a je *predstavnik* odseka.

Opomba: Odsek ima več predstavnikov. Kdaj je $aH = bH$ (kdaj je levi odsek za dva predstavnika enak)?

- Če na desni v H izberemo e , sledi $b \cdot e \in bH = aH \Rightarrow b \in aH$.

$$\Rightarrow b = ah \text{ za nek } h \in H \Rightarrow a^{-1}b = h \in H.$$

Če a in b predstavljata isti odsek, potem je $ab^{-1} \in H$ (in ekvivalentno $b^{-1}a \in H \Rightarrow$ v eno smer velja).

- Če je $a^{-1}b = h \in H$, potem $b = ah$, zato je $bH = ahH$. Ker je H grupa, je $hH \in H \Rightarrow \overbrace{ah}^b H \subseteq aH$. Lahko tudi zamenjamo vlogi a in $b \Rightarrow aH = bH$.

- $a \sim b \stackrel{\text{def}}{\iff} a^{-1}b \in H$ je ekvivalenčna relacija. $a \sim b$ v tem primeru pomeni $aH = bH$.

Trditev:

Naj bo $H \leq G$. Potem sta odseka aH in bH bodisi disjunktna (preseka je prazna množica), bodisi enaka. Slednje velja $\iff a^{-1}b \in H$.

Dokaz: Če aH in bH nista disjunktna obstaja $c \in aH \cap bH \Rightarrow c = ah = bk$; $h, k \in H$. Ker $H \ni hk^{-1} = a^{-1}b \Rightarrow a^{-1}b \in H \Rightarrow$ sta enaka.

$$\Rightarrow a^{-1}b \in H \Rightarrow aH = bH \text{ (dokazali v opombi)}^1.$$

■

Posledica:

Po zadnji trditvi grupa G razpade na disjunktne odseke po podgrupi H :

$$G = a_1H \cup a_2H \cup \dots \cup a_nH = \bigcup_{i \in I} a_iH,$$

izberemo tako, da iz vsakega ekvivalenčnega razreda vzamemo enega predstavnika. Podobno lahko naredimo z desnimi odseki:

$$G = Hb_1 \cup Hb_2 \cup \dots \cup Hb_n = \bigcup_{i \in I} Hb_i$$

Ali je število (medsebojno disjunktne) levih odsekov enako številu (medsebojno disjunktne) desnih odsekov? Ustrezajoči levi in desni odseki *niso nujno enaki*!

Definicija:

- če je G končna grupa, in $H \leq G$, označimo št. odsekov H v G kot $[G : H]$. Isto oznako uporabimo tudi, če je G neskončna, $[G : H]$ pa je še vedno končno. To število imenujemo *indeks* grupe H v G .
- Število elementov grupe G označimo z $|G| \in \mathbb{N} \cup \{\infty\}$. To imenujemo *moč* ali *red* grupe.
- Naj bo $a \in G$. Najmanše število $n \in \mathbb{N}$, za katerega je $a^n = e$, imenujemo *red elementa* a . Če tak n ne obstaja, je red ∞ (neskončno).

Trditev:

Lagrangejev izrek: G končna grupa, $H \leq G$. Potem

$$[G : H] = \frac{|G|}{|H|}.$$

Posebej sledi, da moč podgrupe deli moč grupe.

Dokaz: Odseki H v G določajo (razcep) za G : $G = a_1H \cup a_2H \cup \dots \cup a_nH$, vsi navedeni odseki so disjunktni.

- Da unija odsekov zastopa ves G , saj je poljuben $a \in G$ v odseku aH (ker $e \in H$).
- V a_iH je ravno $|H|$ elementov ($\forall i \in I$), saj je L_{a_i} bijekcija.

$$|G| = |a_1H| + \dots + |a_nH| = n \cdot |H| = [G : H] \cdot |H|.$$

■

Trditev:

G, H grupi, $H \leq G$. Levi odseki H v G so v bijektivni korespondenci z desnimi odseki.

Dokaz:

- Iščemo preslikavo, za katero bi radi pozneje pokazali, da je bijekcija:

$$F : \{\text{levi odseki}\} \rightarrow \{\text{desni odseki}\},$$

$$aH \rightarrow Ha^{-1}.$$

Zakaj je dobro $F(aH) = Ha^{-1}$ vidimo, če preverimo, kdaj sta desna odseka enaka: $Hb = Hc \iff b = hc \iff bc^{-1} \in H$, za leve je pa $a^{-1}b \in H \Rightarrow$ na eni strani moramo dobiti inverz, da bosta pogoja enaka.

- Preverimo, da je F dobro definirana (tj. da je relacija F res preslikava): če sta aH in bH enaka leva odseka, jih mora F preslikati v enaka desna,

$$aH = bH \iff a^{-1}b \in H,$$

$$Ha^{-1} = Hb^{-1} \iff a^{-1}(b^{-1})^{-1} = a^{-1}b \in H,$$

to pa pomeni

- Dva enaka slika v dva enaka \Rightarrow je funkcija.
 - Dva različna slika v 2 različna – $a^{-1}b \notin H \Rightarrow a^{-1}(b^{-1})^{-1} = (b^{-1}a)^{-1} \notin H \Rightarrow$ injekcija.
 - Vsi so slike: vsak ima a^{-1} inverz.
- Očitno je bijekcija. ■

Posledica:

Če je G končna grupa in $a \in G$, potem

$$\text{red}(a) \mid |G|$$

(red a deli moč grupe G). Še več, $\text{red}(a)$ je moč ciklične podgrupe, generirane z a :

$$\text{red}(a) = |\langle a \rangle|$$

Dokaz: Naj bo $H = \langle a \rangle \leq G$, po Langrangejevem izreku sledi $|H|$ deli $|G|$. Dokazati moramo le še $\text{red}(a) = |\langle a \rangle|$. Elementi H so

$$\langle a \rangle = \{e, a^{\pm 1}, a^{\pm 2}, a^{\pm 3} \dots\}.$$

Ker je G končna, se bodo začeli ponavljati. Naj bo $k \in \mathbb{N}$ najmanjše število, da za nek $m \in \mathbb{Z}$ velja $a^{m+k} = a^m$. Od tod z množenjem z a^{-m} dobimo $a^k = e$. Ker je k najmanjši možni, je to ravno $\text{red}(a)$. Potem $\forall m \in \mathbb{Z}$ velja

$$\begin{aligned} m &= qk + r, \quad q \in \mathbb{Z}, \quad 0 \leq r < k, \\ a^m &= a^{qk} \cdot a^r = (a^k)^q a^r = e^q a^r = a^r. \end{aligned}$$

\Rightarrow v ciklični grupi so natanko elementi e, a, \dots, a^{k-1} .

$\Rightarrow |\langle a \rangle| = k = \text{red}(a)$. ■

Zgled:

Če je $[G : H] = 2$, je $H \triangleleft G$.

Rešitev:

- G razpade na dva odseka (vemo).
- Radi bi pokazali: $\forall a \in G$ je $aHa^{-1} \subseteq H$.
 - če je $a \in H \Rightarrow aHa^{-1} \subseteq H$, ker je H grupa.
 - izberimo poljuben $a \notin H (\Rightarrow a^{-1} \notin H)$ – spet želimo $aHa^{-1} \subseteq H$. Opazimo: $aH \neq H = eH \Rightarrow$ sta disjunktna $\Rightarrow G = eH \cup aH$.
 - Podobno velja, da sta H in Ha dva različna desna odseka $\Rightarrow aH = Ha \neq H$. Ta izraz lahko z desne množimo z a^{-1} dobimo

$$aHa^{-1} = H.$$
■

Zgled:

G, H grupi, $H \leq G$. Velja $H \triangleleft G \iff \forall$ levi odsek, je tudi desni odsek.

Rešitev:

(\Rightarrow): $aHa^{-1} = Ha \Rightarrow aH = Ha, \forall a \in G. \square$

(\Leftarrow): $\forall a \exists b$, tako da: $aH = Hb$. želimo $b = a$. Ali smemo?

Za $e \in H$ na desni dobimo $eb = b \in aH; b = ah, h \in H. a^{-1}b \in H$.

$$\begin{aligned} aH &= Hb, \\ aHb^{-1} &= H, \\ aH(ah)^{-1} &= a \underbrace{Hh^{-1}}_H a^{-1} = aHa^{-1}. \square \end{aligned}$$

■

Trditev:

G grupa, $H \triangleleft G$. Potem je množica levih odsekov H v G grupa za operacijo

$$aH \cdot bH \stackrel{\text{def}}{=} abH,$$

kar nakazuje, da je to natanko tedaj, ko so levi odseki enaki desnim.

- Oznaka za to grupo je $G/H = \{aH \mid a \in G\}$. Imenujemo jo *faktorska*, ali *kvocientna* grupa grupe G po edinki H (z operacijo \cdot).
- Enota za G/H je $eH = eH$, inverz pa $(aH)^{-1} = a^{-1}H$.

Dokaz

- Asociativnost sledi iz asociativnosti množenja v G .
- Notranja: $aH \cdot bH \in G/H$.

$$aH \cdot bH = abb^{-1}HbH = abHH = abH \in G/H.$$

■

Zgornji izrek nam da tole zaporedje grup in homomorfizmov:

$$\begin{aligned} p: a &\longrightarrow aH, \\ \{e\} \rightarrow H &\xhookrightarrow{i} G \xrightarrow{p} G/H \rightarrow \{e\}. \end{aligned} \tag{1.1}$$

Tu se moramo spomniti

- inkluzija i je injektivna,
- inducirana preslikava $G \xrightarrow{p} G/H$ je surjektivna,
- $\ker p = H, \text{im}(i) = H$.

Vse preslikave tu so homomorfizmi. To zaporedje je *eksaktno*: pri vski grupi je jedro izhodnega homomorfizma enako sliki vhodnega.

- pri H : slika je $\{e\}$; jedro je $\{e\}$, ker je inkluzija injektivna.
- pri G : slika je H ; jedro je $\{a \in G \mid p(a) = aH = eH = H\}$. Pogoji $aH = H \iff a \in H$.
- pri G/H : slika od p je G/H ; jedro je G/H , ker se vse slika v e .

Trditev:

$H \triangleleft G$, $f : G \rightarrow K$ homomorfizem, za katerega velja $H \subseteq \ker f$ ($f : \{H\} \rightarrow \{e\}$).
Potem f določa homomorfizem $\bar{f} : G/H \rightarrow K$ s predpisom

$$\begin{array}{ccc} G & \xrightarrow{f} & K \\ & \searrow p \quad \nearrow \bar{f} & \\ & G/H & \end{array}$$

se pravi

$$\begin{array}{ccc} G & \xrightarrow{f} & K \\ \text{in hkrati} & & \\ G & \xrightarrow[p]{\quad} G/H \xrightarrow[\bar{f}]{\quad} & K \end{array}$$

za katerega velja $f = \bar{f} \circ p$.

Dokaz:

- Preveriti moramo, da je \bar{f} , da je \bar{f} dobro definiran in homomorfizem. Težava je v tem, da odsek nima samo enega predstavnika. ($aH = bH$, $a \neq b$), \bar{f} pa je določena predstavnikom. $aH = bH \Rightarrow$ želimo vedeti $f(a) = \bar{f}(ab) = \bar{f}(bH) = f(b)$.

$$\begin{aligned} &\Rightarrow a^{-1}b \in H \subseteq \ker f \\ &f(a^{-1}b) = f(a)^{-1}f(b) = e. \quad \square \end{aligned}$$

- Da je \bar{f} homomorfizem takoj sledi: $\bar{f}(aH \cdot bH) = \bar{f}(abH) = f(ab) = f(a) \cdot f(b) = \bar{f}(aH) \cdot \bar{f}(bH)$.

■

Od tod takoj sledi kanonična dekompozicija homomorfizma.

Trditev:

Prvi izrek o izomorfizmu: Naj bo $f : G \rightarrow H$ homomorfizem (kot že vemo, je jedro edinka). Potem je

$$\bar{f} : G/\ker f \rightarrow \text{im } f$$

izomorfizem in zaporedje

$$\{e\} \rightarrow \ker f \hookrightarrow G \xrightarrow{P} G/\ker f \xrightarrow{\bar{f}} \text{im } f \hookrightarrow H$$

je *kanonična dekompozicija homomorfizma grup* f , kar lahko zapišemo tudi

$$f = i \circ \bar{f} \circ P$$

Dokaz: Jedro homomorfizma, $\ker f$, je edinka v G , zato sledi, da obstaja inducirani homomorfizem $\bar{f} : G/\ker f \rightarrow H$. Trdimo: \bar{f} je injektiven in zato bijektiven na $\text{im } f$. Če je $a \cdot \ker f$ v jedru \bar{f} , torej $\bar{f}(a \cdot \ker f) = e$, je $f(a) = e$ in $a \in \ker f \Rightarrow a \cdot \ker f = \ker f$, ki je identiteta v $G/\ker f$. Edini odsek, ki se s \bar{f} preslika v e je identiteta.

■

Zgled:

$(\mathbb{Z}, +)$; $n\mathbb{Z} = \{nk \mid k \in \mathbb{Z}\}$ je podgrupa v \mathbb{Z} . Potem je $n\mathbb{Z} \triangleleft \mathbb{Z}$ (edinka).

Bolj na splošno: Če je G abelova in $H \leq G$, je H edinka, tj. $aHa^{-1} = \{aha^{-1} \mid h \in H\} = \{aa^{-1}h \mid h \in H\} = H$.

Kaj je kvocientna grupa po edinki $n\mathbb{Z}$? Grupa $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ je množica odsekov $n\mathbb{Z}$ v \mathbb{Z} . Hitro vidimo, da je $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z} = \{n\mathbb{Z}, 1 + n\mathbb{Z}, \dots, n-1 + n\mathbb{Z}\}$ je izomorfna grupi ostankov pri deljenju z n , tj.

$$\begin{aligned} f : \mathbb{Z} &\rightarrow \mathbb{Z}_n \\ k &\mapsto k \pmod{n} \end{aligned}$$

Dokaži: f je surjetkivni homomorfizem in $\ker f = n\mathbb{Z}$, zato je $\bar{f} : \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \xrightarrow{\cong} \mathbb{Z}_n$.

Ponovitev: G, H grupi, $H \leq G \iff \forall a, b \in H : ab^{-1} \in H$.

- (1) H je edinka, če jo ohranjajo konjugacije, $aHa^{-1} \subseteq H \forall a \in G$ ($\iff aHa^{-1} = H$).
- (2) Kvocientna grupa: $G/H = \{aH \mid a \in G\}$ je grupa, če je H edinka (tedaj so levi odseki enaki desnim in velja $aH \cdot bH = aHHb = aHb = abH$).
- (3) $f : G \rightarrow H$ homomorfizem grup $\Rightarrow \ker f \triangleleft G$.
- (4) $\text{im } f$ inducira izomorfizem $\bar{f} : G/\ker f \xrightarrow{\cong} \text{im } f$
- (5) To da dekompozicijo kot $f : G \xrightarrow{p} G/\ker f \xrightarrow{\bar{f}} \text{im } f \hookrightarrow H$

Točki (4) in (5) sta prvi izrek o izomorfizmu. Grupa $G/\ker f$ ima za elemente množico $\{a \cdot \ker f \mid a \in G\}$.

Zgled:

Pokaži, da je $SL_n(\mathbb{F})$ edinka v $GL_n(\mathbb{F})$ in „izračunaj“ pripadujočo kvocientno grupo (tj. poišči znano grupo, ki ji je kvocientna grupa izomorfna).

Ideja: Poiščemo homomorfizem $f : GL_n(\mathbb{F}) \rightarrow H$ v primeru grupe H tako, da je $\ker f = SL_n(\mathbb{F})$. Potem bo prvi izrek o izomorfizmu

$$\bar{f} : GL_n(\mathbb{F})/SL_n(\mathbb{F}) \xrightarrow{\cong} \text{im } f \subseteq H$$

Rešitev: Ta homomorfizem je očitno determinanta (vse matrike iz $SL_n(\mathbb{F})$ so v jedru), za \mathbb{F} pa vzamemo $\mathbb{F}^* \equiv \mathbb{F} \setminus \{0\}$.

$$\begin{aligned}\det : GL_n(\mathbb{F}) &\rightarrow \mathbb{F}^* \\ A &\mapsto \det A\end{aligned}$$

Velja tudi, da je $SL_n(\mathbb{F})$ edinka:

Dokaz: Naj bosta $A, A^{-1} \in GL_n(\mathbb{F})$ in $S \in SL_n(\mathbb{F})$, $SL_n(\mathbb{F}) = \{S \mid \det S = 1\}$.

$$\begin{aligned}\det(A^{-1}) &= (\det A)^{-1}, \text{ lastnost homomorfizma,} \\ \det(ASA^{-1}) &= \det(A) \det(S) (\det(A))^{-1} = \det S = 1, \\ &\Rightarrow ASA^{-1} \in SL_n(\mathbb{F}), \forall A \in GL_n(\mathbb{F}), \\ &\Rightarrow A(SL_n(\mathbb{F}))A^{-1} = SL_n(\mathbb{F}),\end{aligned}$$

Kar pa pomeni $SL_n(\mathbb{F}) \triangleleft GL_n(\mathbb{F})$. ■

Kaj pa je $\text{im}(\det)$? Determinanta je surjektivna, saj za poljuben $a \in \mathbb{F}^*$ velja

$$\det \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & 1 & & \\ & & & & a & \\ & & & & & 1 \\ & & & & & & \ddots & \\ & & & & & & & 1 \end{bmatrix} = a.$$

Potem to pomeni

$$\overline{\det} : GL_n(\mathbb{F})/SL_n(\mathbb{F}) \xrightarrow{\cong} \mathbb{F}^*,$$

torej je kvocientna grupa $GL_n(\mathbb{F})/SL_n(\mathbb{F}) \cong \mathbb{F}^*$, kar pa pomeni, da je kvocientna grupa kar \mathbb{F}^* .

Trditev:

Drugi in tretji izrek o izomorfizmu: Naj bo G grupa in $H, K \leq G$. Potem velja:

(2) Če je $K \triangleleft G$, potem je $H \cap K \triangleleft H$ in $H/K \cap H \cong HK/K$

(3) Če je $K \leq H$ in sta obe edinki v G , potem je

$$\begin{aligned}H/K &\triangleleft G/K \\ &\text{in} \\ G/K/H/K &\cong G/H\end{aligned}$$

Dokaz:

(3) Naj bo $f : G/K \rightarrow G/H$ homomorfizem s predpisom $f(aK) = aH$. Relacija f je res homomorfizem, saj je

$$f(aK \cdot bK) = f(abK) = abH = aH \cdot bH = f(aK)f(bK).$$

f je očitno surjektivna, saj dobimo v sliki vse odseke, zato moramo izračunati le $\ker f$, pa dobimo

izomorfizem

$$\bar{f} : G/K \big/_{\ker f} \rightarrow G/H.$$

V $\ker(f)$ so vsi odseki aK , ki se s f preslikajo v identični odsek $eH \equiv H$, v G/H ,

$$aK \xrightarrow{f} aH = H \iff a \in H.$$

Torej so v jedru ravno tisti odseki, ki imajo predstavnike v H :

$$\{aK \mid a \in H\} \equiv H/K \cong \ker f.$$

■

(2) Naj bo $p : G \rightarrow G/K$ kvocientni homomorfizem in $q \equiv p/H$,

$$q : H \rightarrow G/K.$$

Trdimo, da je jedro q : $\ker q = H \cap K$; in slika q : $\text{im } q = HK/K$. Velja

$$q(a) = \text{identiteta} \iff p(a) = \text{identiteta} \iff a \in K.$$

Vendar $a \in H$. Torej velja $a \in K \cap H \Rightarrow K \cap H \triangleleft H$.

Po prvem izreku o izomorfizmu sledi $q : H/K \cap H \xrightarrow{\cong} \text{im } q$. V sliki so vsi odseki oblike aK , $a \in H$. Kot množica elementov v G to ustreza produktu množic $HK = \{ab \mid a \in H, b \in K\}$. Ta množica je podgrupa v G , ker je K edinka.

$$a_1b_1 \cdot a_2b_2 = \underbrace{a_1a_2}_{\in H} \underbrace{(a_2^{-1}b_1a_2)}_{\substack{\in K \text{ (edinka)} \\ \in K}} b_2 \in HK.$$

Torej so $\text{im } q$ odseki HK po K , to je HK/K .

■

1.2.1 Komutatorska podgrupa

Grupa je *abelova*, če produkt komutira: $ab = ba$, $\forall a, b \in G$.

$$\begin{aligned} ab &= ba \quad / \cdot a^{-1} \\ aba^{-1} &= b \quad / \cdot b^{-1} \\ aba^{-1}b^{-1} &= e \quad \xleftarrow{(!)} \end{aligned}$$

Definicija:

Za $a, b \in G$ je $[a, b] \equiv aba^{-1}b^{-1}$ *komutator* elementov a in b . *Komutatorska podgrupa*, $[G, G]$, je najmanjša podgrupa, ki vsebuje vse komutatorje v G .

Opomba: $[G, G]$ očitno vsebuje produkte komutatorjev in vsi elementi so take oblike: $e[a, a]$.

$$[a, b]^{-1} = (aba^{-1}b^{-1})^{-1} = bab^{-1}a^{-1} = [b, a].$$

Trditev:

Naj bo G poljubna grupa. Velja:

- (1) $[G, G] \triangleleft G$,
- (2) $G/[G, G]$ je abelova in jo imenujemo *abelacija* ali *abelianizacija* grupe G .
- (3) Če je H poljubna abelova grupa in $f : G \rightarrow H$ homomorfizem, potem $[G, G] \leq \ker f$

Dokaz:

- (1) Ker je vsak element iz $[G, G]$ produkt komutatorjev za poljuben $a \in G$, tudi $c[a, b]c^{-1}$ nek komutator, saj za produkt

$$[a_1, b_1] \cdot [a_2, b_2] \cdot \dots \cdot [a_k, b_k]$$

velja

$$c[a_1, b_1] \cdot \dots \cdot [a_k, b_k]c^{-1} = c[a_1, b_1]c^{-1}c[a_2, b_2]c^{-1} \dots c[a_k, b_k]c^{-1}$$

Izračunajmo konjugacijo:

$$\begin{aligned} c[a, b]c^{-1} &= caba^{-1}b^{-1}c^{-1} = cac^{-1}cbc^{-1}ca^{-1}c^{-1}cb^{-1}c^{-1} \\ &= (cac^{-1})(cbc^{-1})(cac^{-1})^{-1}(cbc^{-1})^{-1} = [cac^{-1}, cbc^{-1}] \in [G, G]. \blacksquare \end{aligned}$$

- (2) Pokazati moramo, da odseki v $G/[G, G]$ komutirajo (tj. ta kvocientna grupa je abelova):

$$a[G, G] \cdot b[G, G] \stackrel{?}{=} b[G, G] \cdot a[G, G]$$

Pokazati moramo, da ab in ba predstavljati isti odsek, to pa je $\iff (ba)^{-1}ab \in [G, G]$:

$$(ba)^{-1}ab = a^{-1}b^{-1}ab = [a^{-1}, b^{-1}] \in [G, G]. \blacksquare$$

- (3) Če je $f : G \rightarrow H$ homomorfizem v abelovo grupo, želimo videti, da je $[G, G] \leq \ker f$. Dovolj je, če

$$f([a, b]) = e,$$

če pokažemo za enega, to je

$$f(aba^{-1}b^{-1}) = \overbrace{f(a)f(b)f(a^{-1})f(b^{-1})}^{\text{elementi v } H \text{ komutirajo}} = f(a)f(a^{-1})f(b)f(b^{-1}) \stackrel{\text{homo.}}{=} f(a)f(a)^{-1}f(b)f(b)^{-1} = e$$

■

Vsebina: Komutatorska podgrupa je najmanjša edinka v G , po kateri je kvocient abelov.

Poglavje 2

Simetrije in upodobitve

Definicija:

Naj bo X poljubna množica. *Simetrična* ali *permutacijska množica* X je množica vseh bijekcij $X \rightarrow X$.

To imenujemo *permutacije* ali *simetrije* na X , oznaka za grupo je $S(X)$. Posebej če je X končna in $|X| = n$, označimo $S(X)$ z S_n in elemente X označimo z $\{1, 2, \dots, n\}$. V tem primeru permutacije opišemo

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & \dots & n \\ \alpha(1) & \alpha(2) & \alpha(3) & \dots & \alpha(n) \end{pmatrix},$$

če je α permutacija.

Posebne permutacije so cikli:

Definicija:

$\alpha \in S_n$ je r -cikel, če $\exists \overbrace{i_1, i_2, \dots, i_r}^{\text{vsi različni}} \in \{1, 2, \dots, n\}$, ki jih α premakne, ostale elemente pa pusti pri miru (oz. jih fiksira) in velja:

$$\alpha(i_1) = i_2, \alpha(i_2) = i_3, \dots, \alpha(i_{r-1}) = i_r, \alpha(i_r) = i_1.$$

Tak α ponavadi zapišemo kot $\alpha = (i_1, i_2, i_3, \dots, i_r)$.

Definicija:

Dva cikla, α in β sta *disjunktna*, če premakneta različne elemente – tj. β lahko premika kvečjemu elemente, ki jih α fiksira in obratno.

Vaja:

1. $|S_n| = n!$ (očitno).
2. Če je α r -cikel, je $\text{red}(\alpha) = r$:

Dokaz: $\text{red}(\alpha) = k$, če $\alpha^k = e$ in k najmanjše tako število. Jasno je, da je $\alpha^r = e$. Tak r je najmanjši: za $k < r$, α^k preslika i_1 v i_{1+k} , kjer je $1+k \in \{2, \dots, r\}$, zato $i_{1+k} \neq i_1$. ■

3. Naj bo α r -cikel in $d \in \mathbb{N}$. Potem α^d produkt (d, r) disjunktnih ciklov dolžine $r/(d, r)$ (oznaka (d, r) naj bi predstavljala največji skupni delitelj števil d in r).

Dokaz:

- $G = \langle a \rangle$ je ciklična grupa reda r .
- $H = \langle a^d \rangle$ je podgrupa v G

$x = e^{2i\pi/12}$ generira C_{12} , x^d generira podgrupo: $\langle x^d \rangle = \{x^{dk} \mid k \in \mathbb{Z}\}$

◇ $d = 5$: $\langle x^5 \rangle = \{e, x^5, (x^5)^2, \dots, (x^5)^{12}\}$ – imamo 12 različnih elementov – seveda, največji skupni delitelj grup je 1, ker sta si 5 in 12 tuji števili $\Rightarrow \langle x^5 \rangle = \langle x \rangle = C_{12} \leq C_{12}$, saj je $12/(12, 5) = 12/1 = 12$.

◇ $d = 3$: $\langle x^3 \rangle = \{e, x^3, (x^3)^2, (x^3)^3\} \cong C_4$, ker je $12/(12, 3) = 12/3 = 4$.

Odtod sklepamo, da če $k = (d, r)$, potem je H ciklična podgrupa moči (reda) r/k . Dobiti moramo najmanjši n , da je $(\alpha^d)^n = e$. Očitno je $(\alpha^d)^{r/k} = \alpha^{dr/k} = (\alpha^r)^{d/k} = e$. To število je najmanjše s to lastnostjo:

$$\alpha^{dn} = e, \quad \text{upoštevamo, da je } \alpha \text{ reda } r$$

$\Rightarrow r \mid dn$ (r najmanjše število, pri katerem $\alpha^r = e$). Ker je $k = (d, r) \Rightarrow (r/k) \mid n \Rightarrow n \geq r/k$.

Sklep: Če je največja skupna mera števil d in r enaka 1 (tj. $(d, r) = 1$), α^d določa isto grupo moči r in je zato r -cikel. V primeru, da $k \neq 1$ trdimo, da α razpade na produkt k disjunktnih ciklov.

■

Opomba: disjunktni permutaciji (cikla) komutirata.

Trditev:

Vsaka permutacija v $S_n \setminus \{e\}$ je produkt disjunktnih ciklov dolžine ≥ 2 . Ta produkt je do vrstnega reda faktorjev enoličen.

Posledica:

Vsaka permutacija je produkt *transpozicij*, tj. ciklov dolžine (reda) 2: (a, b) , $a \neq b$.

Opomba: Ta izrazitev *ni* enolična. Enolična je le parnost števila transpozicij).

Definicija:

Predznak ali *parnost* permutacije, je število, ki ga dobimo kot $(-1)^{\# \text{transpozicij}}$ v poljubni izrazitvi permutacije s transpozicijami.

Oznaka: α permutacija \Rightarrow predznak $\alpha \dots \text{sign}(\alpha) \in \{\pm 1\}$.

Trditev:

$\text{sign} : S_n \rightarrow C_2 = \{\pm 1\}$, je homomorfizem in jedro tega imenujemo *alternirajoča grupa*, A_n .

Sledi: $A_n \triangleleft S_n$, indeksa 2.

Dokaz: α r -cikel, β p -cikel $\Rightarrow \text{sign}(\alpha\beta) = (-1)^{r+p} = (-1)^r(-1)^p = \text{sign}(\alpha)\text{sign}(\beta)$. sign torej res homomorfizem in je hkrati surjektiven, saj je znak \forall transpozicije -1 . $A_n = \ker(\text{sign})$ je edinka,

$$S_n/A_n = \{\pm 1\},$$

kar pa pomeni $[S_n : A_n] = 2$. ■

Ponovitev:

- X množica, $S(X) = \{\text{bijekcije } X \rightarrow X\}$
- $X = \{1, 2, \dots, n\} \rightarrow S(X) = S_n$

Trditev:**Caylejev izrek:**

- G poljubna grupa. Potem je G izomorfna podgrupi simetrične grupe $S(G)$.
- Če je G končna in $|G| = n$, potem je G izomorna podgrupi v S_n .

Dokaz: Za dano G želimo poiskati ...

- $S(G) = \{f : G \rightarrow G \mid f \text{ bijekcija}\}$
- G je grupa z operacijo $G \times G \rightarrow G$ in potem injektivni homomorfizem $G \rightarrow S(G)$.

Naj bo $L : G \rightarrow S(G)$, $g \mapsto L_g$ (leva translacija). Za levo translacijo velja (str. 13):

- L_g je bijekcija, njen inverz je $L_{g^{-1}}$
- L je homomorfizem: $L(gh) = L_g \circ L_h$ (kompozitum v $S(G)$).
- L je injektivna: če je L_g identiteta, je $L_g(e) = ge = e \Rightarrow g = e \Rightarrow \ker L = e$.

Slika $L(G) \in S(G)$ je torej izomorfna G . ■

Posledica:

Naj bo G končna grupa, $|G| = n$, in \mathbb{F} poljuben obseg. Tedaj je G izomorfna podgrupi v $GL_n(\mathbb{F})$ in \exists homomorfizem $\varphi : G \rightarrow GL_n(\mathbb{F})$ ki je injektiven.

Dokaz: Bolj na splošno: naj bo X poljubna končna množica in $\varphi : G \rightarrow S(X)$ homomorfizem. Ta homomorfizem lahko „dvignemo“ do homomorfizma v neko splošno linearno grupo,

- Naj bo V vektorski prostor nad \mathbb{F} za bazo X , torej

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\},$$

$$V = \left\{ \sum_{i=1}^m \lambda_i x_i \mid \lambda_i \in \mathbb{F} \right\}.$$

- Grupo $S(X)$ lahko vložimo v $GL_{\mathbb{F}}(V)$, tako da vsakemu elementu $\sigma \in S(X)$ priredimo linearno preslikavo, ki permutira vektorje v bazi

$$\begin{aligned} \sigma &\mapsto A_{\sigma}; \\ A_{\sigma} &: V \rightarrow V \\ x_i &\mapsto \sigma(x_i) = x_{\sigma(i)} \end{aligned}$$

- Matrika takšne preslikave je *permutacijska matrika*, ki je obrnljiva ($\det A_{\sigma} = \pm 1$) in jo dobimo z zamenjavo matrike identitete. Na ta način $S(X)$ postane podgrupa v $GL_{\mathbb{F}}(V)$ in φ porodi

$$\begin{array}{ccc} \hat{\varphi} : & G & \longrightarrow GL_{\mathbb{F}}(V) \\ & \searrow \varphi & \nearrow \\ & S(X) & \end{array}$$

Posebej: Če je $\varphi : G \rightarrow S(X)$ injektiven, dobimo injektiven $\hat{\varphi}$. Za $X = G$ je $|X| = |G| = n$, zato je V vektorski prostor nad \mathbb{F} dimenzije n in je $GL_{\mathbb{F}}(V) \equiv GL_n(\mathbb{F})$.

■

2.1 Teorija upodobitev in pridruženih delovanj

Definicija:

Naj bo G grupa in X množica. Potem homomorfizem $\varphi : G \rightarrow S(X)$ imenujemo *upodobitev* (reprezentacija).

Definicija:

Naj bo V vektorski prostor nad obsegom \mathbb{F} . Homomorfizem $\varphi : G \rightarrow GL_{\mathbb{F}}(V)$ imenujemo *linearna upodobitev* G na V .

Opomba:

- Iz dokaza zadnje posledice sledi, da poljubna upodobitev $G \rightarrow S(X)$ porodi linearno upodobitev $G \rightarrow GL_{\mathbb{F}}(V)$, kjer je V vektorski prostor z bazo X nad obsegom \mathbb{F} .
- Upodobitvi $G \rightarrow S(G)$, oz. $G \rightarrow GL_{\mathbb{F}}(V)$, kjer je V vektorski prostor z bazo G , rečemo *regularna upodobitev* (tj. $X = G$).

Glavni rezultat teorije upodobitev končnih grup je, da **linearna regularna upodobitev vsebuje vse linearne upodobitve**.

Poljubna upodobitev $\varphi : G \rightarrow S(X)$, $g \mapsto \sigma$ porodi *delovanje* grupe G na množico X , tj. preslikavo

$$\begin{aligned}\tilde{\varphi} : G \times X &\rightarrow X, \\ (g, x) &\mapsto \varphi(g)(x) = \sigma(x),\end{aligned}$$

z lastnostima:

- $\tilde{\varphi}(e, x) = \varphi(e)(x) = x$, ker je φ homomorfizem, je $\varphi(e)$ spet identiteta.
- $\tilde{\varphi}(g, \tilde{\varphi}(h, x)) = [\varphi(g) \circ \varphi(h)](x) = \varphi(gh)(x) = \tilde{\varphi}(gh, x)$

Dogovor: Kjer imamo opraviti le z enim delovanjem, izpustimo ime preslikave in pišemo kar

$$\tilde{\varphi}(g, x) = gx.$$

V tem zapisu sta zgornji lastnosti

$$\begin{aligned}\varphi(e) = \text{id} &\Rightarrow ex = x \\ (gh)x &= g(hx)\end{aligned}$$

izgledata kot definicija identitete in asociativnosti.

Velja tudi obratno: vsako delovanje G na X določa upodobitev G na X :

$$\left. \begin{array}{l} \text{Upodobitve} \\ \frac{G \rightarrow S(X)}{\text{homomorfizmi}} \end{array} \right\} \longleftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{Delovanja} \\ G \times X \rightarrow X \\ ex = x \\ (gh)x = g(hx) \end{array} \right.$$

Analogno za linearne upodobitve dobimo korespondenco z delovanji, ki so pri fiksnem g linearni.

$$\left. \begin{array}{l} G \rightarrow GL_{\mathbb{F}}(V) \\ V \text{ vekt. prostor} \\ \text{homo.} \end{array} \right\} \longleftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} G \times V \rightarrow V \\ ex = x \\ (gh)x = g(hx) \\ x \mapsto gx \text{ je linearna} \end{array} \right.$$

Definicija:

Naj G deluje na X (imamo delovanje $G \times X \rightarrow X$).

- *Orbita* elementa $x \in X$ je $Gx = \{gx \mid g \in G\}$.
- *Stabilizatorska podgrupa* elementa $x \in X$ je $G_x = \{g \in G \mid gx = x\}$.

Trditev:

Naj G deluje na X .

1. Potem je $G_x \leq G, \forall x \in X$.
2. Stabilizator poljubne druge točke na orbiti Gx je konjugiran stabilizatorju x .
3. Če je X končen, je $|Gx| = [G : G_x]$

Dokaz: [Vaja]

1. G_x je res podgrupa:

- $e \in G_x$: $ex = e \Rightarrow e \in G_x$ po definiciji
- $g \in G_x \Rightarrow g^{-1} \in G_x$:

$$\begin{aligned} gx &= x, \quad / \cdot g^{-1}, \text{ asociativnost} \\ x &= g^{-1}gx = g^{-1}x \Rightarrow g^{-1} \in G_x \end{aligned}$$

- produkt: $ghx = gx = gx = x$ (očitno, ker $gx = x$ in $hx = x$). ■

2. Izberimo poljuben $y \in G_x$. Dokazujemo, da je G_y konjugiran G_x , tj. $\exists a$, tako da: $G_y = aG_xa^{-1}$. Vemo: $y = gx$ za nek $g \in G$. Naj bo $h \in G_y$: $hy = y$,

$$\left. \begin{aligned} hgx &= gx \\ g^{-1}hgx &= x \\ g^{-1}hg &\in G_x \end{aligned} \right\} G_y \subseteq gG_xg^{-1}$$

Sedaj enako naredimo za g^{-1} : $x = g^{-1}y$, ostalo je enako. Od tam sledi, da je tudi $G_x \subseteq g^{-1}G_yg$. To je res natanko tedaj, ko $G_y = gG_xg^{-1}$. ■

3. X končna, $Y = G_x \subseteq X$ tudi končna. $Y \subseteq X$ je invariantna za delovanje G , v smislu, da je $\forall g \in G$ in $\forall y \in Y$: $gy \in Y$.

Trdimo, da je $|Y|$ enaka št. odsekov G_x v G . Glejmo preslikavo $f : G \rightarrow Y$, $g \mapsto gx$. f je surjektivna (po definiciji Y) in

$$f(g) = f(h) \iff gx = hx \iff h^{-1}gx = x, \quad h^{-1}g \in G_x,$$

to pa je natanko tedaj, ko h in g določata isti odsek \Rightarrow št. različnih točk v Y je enako št. različnih odsekov G_x v G . $|Y| = [G : G_x]$. ■

2.2 Operacije na grupah in strukturni izreki

Definicija:

Direktni produkt grup G in H je grupa $G \times H$ z operacijo množenja po komponentah:

$$(g_1, h_1) \cdot (g_2, h_2) = (g_1g_2, h_1h_2).$$

Identiteta je (e, e) , inverz elementa (g, h) je $(g, h)^{-1} = (g^{-1}, h^{-1})$, asociativnost pa sledi iz asociativnosti v G in H .

Opombe:

- V grupi $G \times H$ lahko gledamo G in H kot podgrupi, $G \equiv G \times \{e\}$ in $H \equiv \{e\} \times H$. Pri tej identifikaciji elementi podgrup G in H med seboj komutirajo.
- $(g, e) \cdot (e, h) = (ge, eh) = (g, h)$
- $(e, h) \cdot (g, e) = (eg, he) = (g, h)$
- Poleg tega sta G in H edinki v $G \times H$, njun presek je $G \cap H = \{e\} = (e, e)$.

Iz teh opažanj dobimo

Trditev:

G, H, K grupe, $H, K \triangleleft G$, $H \cap K = \{e\}$ in $HK = G$. Potem je $G = H \times K$.

Dokaz: [Ideja] Najprej vidimo, da elementi iz H komutirajo z elementi iz K (saj $H \cap K = \{e\}$). Upoštevamo **lemo:** G, H abelovi $\Rightarrow G \times H$ abelova.

Primer:

1. $G = C_2 \times C_3 = ?$ Najprej lahko kar zapišemo grupne elemente:

$$\begin{aligned} C_2 &= \{1, -1\}, \\ C_3 &= \{1, \exp(2i\pi/3), \exp(-2i\pi/3)\} \end{aligned}$$

$$G = \{(1, 1), (1, e^{2i\pi/3}), (1, e^{-2i\pi/3}), (-1, 1), (-1, e^{2i\pi/3}), (-1, e^{-2i\pi/3})\}$$

Opazimo, da je $|G| = 6$. A je G izomorfna kakšni znani grupi moči 6, npr. C_6 (v tem primeru, moramo najti element reda 6). Če je G ciklična ima generator reda 6 in preslikava, ki preslika generator v $\exp(2i\pi/6)$ bo izomorfizem $G \rightarrow C_6$. Uganemo:

$$\begin{aligned} (-1, e^{2i\pi/3})^1 &= (-1, e^{2i\pi/3}), \\ (-1, e^{2i\pi/3})^2 &= ((-1) \cdot (-1), e^{2i\pi/3} e^{2i\pi/3}) = (1, e^{-2i\pi/3}), \\ (-1, e^{2i\pi/3})^3 &= (-1, 1), \\ (-1, e^{2i\pi/3})^4 &= (1, e^{2i\pi/3}), \\ (-1, e^{2i\pi/3})^5 &= (-1, e^{-2i\pi/3}), \\ (-1, e^{2i\pi/3})^6 &= (1, 1) \end{aligned}$$

Vidimo: element $(1, \exp(-2i\pi/3))$ generira celotno grupo G , in je reda 6 – tj. $G \cong C_6$, z izomorfizmom:

$$\begin{aligned} f : G &\rightarrow C_6, \\ f\left((-1, e^{2i\pi/3})\right) &= e^{2i\pi/6}, \text{ homomorfizem, torej,} \\ f\left((-1, e^{2i\pi/3})^k\right) &= e^{2i\pi k/6}. \end{aligned}$$

2. $G = C_2 \times C_4$, ali je izomorfna kakšni znani grupi (npr. C_8 , sodeč po prejšnjem primeru)?

$$G = \{(1, 1), (1, i), (1, -1), (1, -i), (-1, 1), (-1, i), (-1, -1), (-1, -i)\}$$

Ne glede na to, s katerim elementom bomo poskušali, največji red elementa je 4. Vendar pa ta grupa ni izomorfna C_4 , saj nimamo bijektivnega homomorfizma, ki bi 8 elementov preslikal v 4. Imamo pač abelovo grupo, ki je bolj komplicirana.

3. $G = C_m \times C_n$, kjer sta m, n tuji si števili (njun največji skupni delitelj je 1).

Vaja: Pokaži $G \cong C_{m \cdot n}$. Bolj splošno: za poljubni ciklični grupi redov m in n

$$G = \langle a \rangle \times \langle b \rangle$$

Trdimo, da ima par $(a, b) \in G$ red $m \cdot n$. Velja $(a, b)^k = (a^k, b^k)$.

- $(a, b)^{mn} = (e, e)$ je očitno.
- mn je najmanjši tak eksponent v \mathbb{N} . Vemo $|G| = mn$. Red vsakega elementa deli mn . Če je (a, b) manjšega reda, kot mn , $\exists k \mid mn : (a, b)^k = (a^k, b^k) = (e, e)$.

$$\left. \begin{array}{l} a^k = e \Rightarrow m \mid k \\ b^k = e \Rightarrow n \mid k \end{array} \right\} = k = mn$$

Če m in n nista tuja, je največji red enak najmanjšemu skupnemu večkratniku, kar je manj od $|G| = mn \Rightarrow$ ni ciklična. ■

Definicija:

- G grupa, X je podmnožica v G , tj. $X \subseteq G$. X generira G , če je $G = \langle X \rangle$ najmanjša podgrupa v G , ki vsebuje $\langle X \rangle$.
- G je *končno generirana*, če \exists končna $X \subseteq G : G = \langle X \rangle$ (tj. število generatorjev v X je končno).
- G je *torzijska*, če je \forall element v G končnega reda.
- Za praštevilo $p \in \mathbb{P}$ je G *p-grupa*, če je red vsakega elementa v G neka potenca p -ja.
- G je *prosta abelova grupa* ranga $n \in \mathbb{N}$, če je $G \cong \underbrace{\mathbb{Z} \times \mathbb{Z} \times \dots \times \mathbb{Z}}_{n\text{-krat}} = \mathbb{Z}^n$.

Trditev:

[Brez dokaza.] Naj bo A abelova grupa. Potem je množica vseh elementov končnega reda v A torzijska podgrupa T . Če je A končno generirana, je A/T prosta abelova grupa končnega ranga in

$$A \cong T \times A/T$$

Trditev:

[Brez dokaza.] Naj bo T končna abelova grupa. Potem \exists zaporedje naravnih števil n_1, n_2, \dots, n_k , kjer

$$n_k \mid n_{k-1} \mid n_{k-2} \mid \dots \mid n_2 \mid n_1$$

in velja

$$T \cong C_{n_1} \times C_{n_2} \times \dots \times C_{n_k}.$$

Opomba: V primeru $C_2 \times C_4$ smo imeli primer takšnega zapisa končne abelove grupe $n_1 = 4, n_2 = 2$.

Posledica:

Če je T končna abelova grupa in $n = |T|$ nima kvadratnih faktorjev, je T ciklična moči n .

Dokaz: Po prejšnjem je $T = C_{n_1} \times \dots \times C_{n_k}$. Če je $n_2 > 1$, potem je $n_2 \mid n_1$ in $n_1 \cdot n_2 \mid n$, potem $n_2^2 \mid n$, kar je v nasprotju s predpostavko. ■

Posledica:

Če je A končno generirana prosta abelova grupa in $B \leq A$ (podgrupa), je tudi B prosta.

Iz vsega tega dobimo metodo za predstavitev poljubne končno generirane abelove grupe A :

- Naj bo $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ končna množica generatorjev in \mathbb{Z}^n prosta abelova grupa ranga n .

$$\{e\} \rightarrow \underbrace{\ker f}_{\cong \mathbb{Z}^m} \longrightarrow \mathbb{Z}^n \xrightarrow{f} A \rightarrow \{e\}$$

$$\mathbb{Z}^m \ni (k_1, k_2, \dots, k_n) \xrightarrow{f} x_1^{k_1} x_2^{k_2} \dots x_n^{k_n} \in A,$$

homomorfizem f je surjektiv, ker so x_i generatorji. Dobimo zgornje eksaktno zaporedje, ki pomeni $A \cong \mathbb{Z}^n / \ker f$. To da opis A z generatorji in relacijami:

$$A = \left[\underbrace{x_1, x_2, \dots, x_n}_{\text{generatorji } A} \mid \underbrace{r_1, r_2, \dots, r_m}_{\text{generatorji } \ker f} \right] \quad (2.1)$$

Opomba: Abelove grupe večinoma pišemo aditivno, v tem primeru direktni produkt zamenjamo z direktno vsoto, \oplus .

Zgled:

1. Ostanki po modulu n :

$$C_n \cong \mathbb{Z}_n = \{0, 1, \dots, n-1\},$$

\mathbb{Z}_n je ciklična z generatorjem 1.

$$\left. \begin{array}{ccc} \underbrace{\ker f}_{=n\mathbb{Z}} \rightarrow \mathbb{Z} & \xrightarrow{f} & \mathbb{Z}_n \\ 1 & \mapsto & 1 \end{array} \right\} \mathbb{Z}_n = [1 \mid n],$$

saj je '1' generator, in $n \cdot 1 = 0 \in \ker f$. Če generator označimo z x , potem je $\mathbb{Z}_n = \langle x \rangle$, relacija pa je $nx = 0$, $\Rightarrow \mathbb{Z}_n = [x \mid nx]$.

2. Naj bo $A = [x, y \mid 2x + y, x - 2y]$. Zapiši A kot vsoto (produkt) proste grupe in cikličnih končnih grup. To pomeni nekako tole

$$A = \mathbb{Z}_x \oplus \mathbb{Z}_y / \langle 2x + y, x - 2y \rangle$$

Ideja je ta, da generatorja (bazo) tako zamenjamo, da bo imenovalec lepši. Potem bosta relaciji preprostejši, \Rightarrow relaciji oblike au, bv . Potem delamo linearno algebro nad \mathbb{Z} .

$$\begin{array}{l} r_1 = 2x + y \\ r_2 = x - 2y \end{array} \quad \left| \quad \text{Ideja: } \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \text{ tj. } u, v \text{ lin. komb. } x \text{ in } y.$$

Matrika $A \in SL(2, \mathbb{Z})$, tj. mora biti obrnljiva, z 'det $A = 1$ ' (sicer so dobre tudi matrike, ki imajo 'det $A = -1$ ', vendar ugibamo, da zadošča det $A = 1$) in celimi koeficienti. Gotovo je ta matrika oblike

$$\begin{bmatrix} 1 & * \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{ali} \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ * & 1 \end{bmatrix}.$$

To nam te ti dve možnosti:

$$\begin{bmatrix} 1 & n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + ny \\ y \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y + nx \end{bmatrix}.$$

Dovoljeni operaciji sta:

$$\begin{aligned} (x, y) &\mapsto (x + ny, y), \\ (x, y) &\mapsto (x, y + nx). \end{aligned}$$

Uporabimo lahko $(x, y) \rightarrow (x - 2y, y) = (u_1, v_1)$. Relaciji tedaj izgledata

$$\begin{aligned} r_2 &= u_1, \\ r_1 &= 2(2y + u_1) + y = 5y + 2u_1 = 5v_1 + 2u_1. \end{aligned}$$

(u_1, v_1) ne moremo pretvoriti na nič lepšega.

Ampak: r_1 in r_2 generirata podgrupo relacij, na teh operatorjih lahko uporabimo isti princip.

$$\begin{aligned} (r_1, r_2) &\rightarrow (r_1 - 2r_2, r_2), \\ \left. \begin{aligned} r_2 &= u_1 \\ r'_1 &= 5v_1 \end{aligned} \right\} A &= \mathbb{Z}_{u_1} \oplus \mathbb{Z}_{u_2} / \langle u_1, 5v_1 \rangle \end{aligned}$$

Ostanejo le ostanki po modulu 5: generator u_1 smo čisto „ubili“, generator v_1 pa nam da le tiste, ki so deljivi s 5. To pomeni

$$A = [u_1, v_1 \mid u_1, 5v_1] = \mathbb{Z}_1 \oplus \mathbb{Z}_5 \cong \mathbb{Z}_5$$

2.3 Struktura končno generiranih abelovih grup

A abelova grupa. Potem

$$A \cong \underbrace{\mathbb{Z}^n}_{\text{prosti del}} \oplus \underbrace{\mathbb{Z}_{c_1} \oplus \mathbb{Z}_{c_2} \oplus \dots \oplus \mathbb{Z}_{c_k}}_{\text{torzijska podgrupa } T},$$

n = rang grupe A , c_i so torzijski koeficienti in

$$c_i \geq 1, \forall i \in I, \quad c_1 \mid c_2 \mid \dots \mid c_k,$$

kanonična dekompozicija.

Če je A generirana z x_1, \dots, x_m .

$$\{0\} \rightarrow \underbrace{K}_{\ker f} \xrightarrow[e_i \mapsto x_i]{\mathbb{Z}^m} A \rightarrow \{0\},$$

$$e_i = (0, \dots, 0, \overbrace{1}^i, 0, \dots, 0).$$

Če generatorje v \mathbb{Z}^m poimenujemo $y_i = e_i$, potem je K kot podgrupa v \mathbb{Z}^m generirana z nekimi r_j , ki so linearne kombinacije y_i

$$r_j = \sum_{i=1}^m a_{ji} y_i$$

Relacije lahko zapišemo v matriko relacij R

$$R = [a_{ji}] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m} \\ \vdots & & \ddots & \end{bmatrix}$$

Ideja za izračuna kanonične dekompozicije A je, da s spremembami nabora generatorjev matriko R preoblikujemo tako, da iz nje lahko odčitamo torzijske koeficiente.

Trditev:

Naj bo A abelova in $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ nabor generatorjev za A . Potem je množica $Y = \{y_1, \dots, y_m\}$ tudi nabor generatorjev za A , če Y dobimo iz X z zaporedjem operacij iz tegale nabora:

1. Zamenjamo lahko dva generatorja:

$$y_j = x_i, \quad y_i = x_j, \quad y_k = x_k \quad \forall k \neq i, j.$$

2. En generator pomnožimo z (-1) :

$$y_i = -x_i, \quad y_k = x_k \quad \forall k \neq i.$$

3. Poljubnemu generatorju prištejemo linearno kombinacijo ostalih:

$$y_i = x_i + \sum_{j \neq i} n_j x_j; \quad n_j \in \mathbb{Z}.$$

Dokaz: Očitno ima vsaka od zgornjih operacij inverz iste vrste, torej res sistem generatorjev preslika v sistem generatorjev (*opomba:* to je Gaussova eliminacija nad \mathbb{Z}).

■

Algoritem: za izračun KD (kanonične dekompozicije): Dani R preoblikujemo v „diagonalno“ matriko,

$$\underbrace{\begin{bmatrix} c_1 & & & & \\ & c_2 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & c_\ell & \\ & & & & 0 & & \\ & & & & & \ddots & \\ & & & & & & 0 \end{bmatrix}}_{\text{Smithova normalna oblika}}, \quad c_1 \mid c_2 \mid \dots \mid c_\ell, \quad c_i \geq 1, \quad m - \ell = \text{rang } A.$$

Matrika R je dimenzije $m \times m$, vendar je njen rang manjši za rang matrike A . Če je $c_1 = 1$: za generator x_1 velja, da je tudi v podgrupi relacij K – v kvocientu dobimo $\mathbb{Z}_{x_1}/\mathbb{Z}_{x_1}$ trivialno grupo.

Postopek: Na mesto $(1, 1)$ postavimo največji skupni delitelj elementov matrike R . Ta postane naš c_1 . Z njim potem najprej uničimo preostale elemente v prvi vrstici (s prištevanjem prvega stolpca), nato z novo prvo vrstico uničimo preostale elemente v prvem stolpcu:

$$R \rightarrow \begin{bmatrix} c_1 & * & * & * \\ * & & & \\ * & & R' & \\ * & & & \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} c_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & & & \\ 0 & & R'' & \\ 0 & & & \end{bmatrix}$$

Nadaljujemo na matriki R'' .

Opomba: Delovanje algoritma da dokaz obstoja kanonične dekompozicije.

Primeri:

- Izračunaj KD grupe, ki je kvocient \mathbb{Z}^3 po podgrupi, generirani z generatorji $(3, 6, -3)$, $(3, 3, -6)$, $(3, 3, 3)$:

$$R = \begin{bmatrix} 3 & 6 & -3 \\ 3 & 3 & -6 \\ 3 & 3 & 3 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 3 & -3 & -3 \\ 3 & -3 & 6 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & -3 & -3 \\ 0 & -3 & 6 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & -3 \\ 0 & 3 & 6 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 3 & & \\ & 3 & \\ & & 9 \end{bmatrix};$$

$$\begin{aligned} c_1 &= 3 \\ \Rightarrow c_2 &= 3, \quad \text{rang } A = 0, \\ c_3 &= 9 \end{aligned}$$

R je matrika relacij za grupo $A = \mathbb{Z}^3/K = \mathbb{Z}_x \oplus \mathbb{Z}_y \oplus \mathbb{Z}_z / \langle 3x, 3y, 9z \rangle = [x, y, z \mid 3x, 3y, 9z] = \mathbb{Z}_3 \oplus \mathbb{Z}_3 \oplus \mathbb{Z}_9$.

Opomba: Operacije iz trditve delamo na vrsticah in s tem spreminjamo generatorje podgrupe relacij ter na stolpcih in s tem spreminjamo generatorje proste grupe.

- Določi KD kvocienta \mathbb{Z}^3 po podgrupi, generirani z $(2, 4, 2)$ in $(4, 3, 1)$:

$$R = \begin{bmatrix} 2 & 4 & 2 \\ 4 & 3 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 3 & 4 \\ 2 & 4 & 2 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & -6 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A \cong \mathbb{Z} \oplus \mathbb{Z}_1 \oplus \mathbb{Z}_2 \cong \mathbb{Z} \oplus \mathbb{Z}_2 = [x_1, x_2, x_3 \mid x_1, 2x_2]$$

V tem primeru x_3 generira prosti del, x_1 ne nastopa v kvocientu, x_2 je reda 2, tj. generira \mathbb{Z}_2 .

2.4 Proste grupe, prosti produkti in predstavitve grup

V prosti abelovi grupi med generatorji velja komutativnost. Vendar, pa ni vsaka prosta grupa abelova. Razčistimo pojem, kaj pomeni prosta grupa:

Definicija:

Prosta grupa je taka, v kateri poleg osnovnih zahtev za grupo ni nobene druge relacije. Elemente take grupe predstavljamo kot besede.

Če so x_1, \dots, x_n v prosti grupi, potem je tudi $x_1 x_2 \dots x_n$ element te grupe in ta se ne da poenostaviti v noben drug element, če $x_i \neq e$ in če v x_i in x_{i+1} ne nastopajo elementi skupaj z inverzom.

To idejo lahko uporabimo za konstrukcijo proste grupe na dani množici generatorjev:

- Naj bo $X = (x_i)_{i \in I}$ množica generatorjev grupe G . Prosto grupo nad X označimo s F_X (*free*), in dobimo takole: tvorimo besede nad abecedo s simboli $x_i, x_i^{-1}, ' _ '$ (s ' $_$ ' sem označil presledek).

- Besede so končni nabori črk abecede: $x_{i_1}^{\epsilon_1} x_{i_2}^{\epsilon_2} \dots x_{i_k}^{\epsilon_k}$, kjer je $\epsilon_i = \pm 1$. Npr.

$$x_1 x_1 x_3 x_2^{-1} x_7 x_{11}^{-1} x_{12} x_{12}^{-1} x_{12} x_{12}$$

- Težave z grupno strukturo: $x_i x_i^{-1} \neq ' _ '$. Te bi lahko izločili, ampak se naravno pojavijo pri množenju, ki je stikanje besed. Iz množice besed za opisano operacijo dobimo grupo tako, da vpeljemo relacijo na besedah, ki $x_i x_i^{-1} = x_i^{-1} x_i = e = ' _ '$ enači z identiteto.

- Ta kvocient imenujemo *prosta grupa nad X*.

Opomba: Preveriti je treba, če ta konstrukt res ustreza definiciji grupe:

- ima identiteto: prazna beseda (presledek),
- vsaka beseda ima inverz: $(x_{i_1}^{\epsilon_1} \dots x_{i_k}^{\epsilon_k})^{-1} = x_{i_k}^{-\epsilon_k} \dots x_{i_1}^{-\epsilon_1}$
- Pokazati jo je sitno, zaradi krajšanja, vendar drži (*verjamemo na besedo* – „pun intended“).

Pomen: Analogno kot pri abelovih je vsaka grupa kvocient neke proste grupe. To izkoristimo za predstavitev poljubne grupe z generatorji in relacijami.

Lema:

Naj bo G grupa in X množica njenih generatorjev. Potem je G kvocient proste grupe nad X , tj. imamo eksaktno zaporedje

$$\{e\} \rightarrow K \xrightarrow{= \ker f} F_X \xrightarrow{f \text{ (homo.)}} G \rightarrow \{e\},$$

ali $G \cong F_X/K$.

Dokaz: Vzamemo prosto grupo F_X in

$$\left. \begin{array}{ccc} f : F_X & \rightarrow & G \\ x_i & \mapsto & x_i \end{array} \right\} \text{ očitno surjektivna – v im } f \text{ so vsi generatorji } G, \text{ in im } f \leq G, \text{ je to cel } G.$$

Ta f je homomorfizem, $K = \ker f$. Potem imamo po standardnih izrekih (izreki o izmorfizmu) $G \cong F_X/K$ oz. to zaporedje je eksaktno. ■

Posledica:

Naj bo G poljubna grupa, X množica in $f : X \rightarrow G$ preslikava.

Potem f določa enolično homomorfizem iz \hat{f} iz proste grupe z generatorji X na G

$$\begin{array}{ccc} \hat{f} : F_X & \rightarrow & G \\ \hat{f}|_X & = & f \end{array} \quad \text{in} \quad \begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{f} & G \\ \searrow & & \nearrow \hat{f} \\ & F_X & \end{array}$$

f določa homomorfizem \hat{f} tako, da diagram komutira.

Dokaz: Definiramo $\hat{f}(x_{i_1}^{\epsilon_1} \dots x_{i_k}^{\epsilon_k}) = f(x_{i_1})^{\epsilon_1} \dots f(x_{i_k})^{\epsilon_k}$, kar velja po asociativnosti v G . ■

Trditev:

[Brez dokaza] Vsaka podgrupa proste grupe je prosta.

Pozor: pri abelovih je rang prodgrupe \leq rangu grupe, pri prostih grupah pa ima lahko podgrupa več generatorjev, kot grupa (prosta grupa na dveh generatorjih vsebuje proste grupe na več generatorjih, kot prodgrupe).

Definicija:

Prosti produkt grup: G, H grupi, njun *prosti produkt* je $G * H$, množica besed in abecede $G \cup H$, kjer je operacija stikanja besed, edine relacije pa so tiste, ki veljajo v G in v H . Vsak element lahko zapišemo v obliki

$$g_1 h_1 g_2 h_2 \dots g_k h_k; \quad g_i \in G, \quad h_i \in H,$$

saj upoštevamo množenje v G in H . Če je kakšen h_i ali g_j identiteta, lahko sosednja elementa zmnožimo v grupi. Kot pri prosti grupi preverimo, da je $G * H$ res grupa (tj. da je prosti produkt grup spet grupa).

Primer: Prosta grupa na dveh generatorjih $F_{\{x,y\}}$ je izomorfná prostemu produktu dveh kopij \mathbb{Z} . V grupi $F_{\{x,y\}}$ so besede $x^{n_1} y^{n_2} x^{n_3} y^{n_4} \dots$ kjer $n_i \in \mathbb{Z}$. V $\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$ z generatorjema x za prvi faktor in y za drugi faktor pa so besede $(n_1 x)(n_2 y)(n_3 x)(n_4 y) \dots$ kjer so faktorji pisani aditivno. Multiplikativno bi zapisali tako kot prej, $x^{n_1} y^{n_2} x^{n_3} y^{n_4} \dots$

$$\begin{aligned} \Rightarrow F_{\{x,y\}} &\cong \mathbb{Z} * \mathbb{Z} \\ F_{\{x_1, \dots, x_n\}} &\cong \underbrace{\mathbb{Z} * \mathbb{Z} * \dots * \mathbb{Z}}_{n \text{ faktorjev}} \end{aligned}$$

Glavna uporaba je predstavitev grupe.

Definicija:

Predstavitev ali *prezentacija* grupe. Če je G poljubna grupa in $X = \{x_i, i \in I\}$ množica njenih generatorjev, potem je $G \cong F_X/K$, kjer je K edinka v F_X , določena kot jedro naravnega homomorfizma

$$\begin{aligned} f : F_X &\rightarrow G \\ x_i &\mapsto x_i \end{aligned}$$

(za K vzamemo najmanjšo tako edinko). Če je R množica generatorjev za edinko K , je predstavitev grupe G z generatorji in relacijami dana z

$$G = \langle X \mid R \rangle. \quad (2.2)$$

Opomba: elementi v R so besede v X in $G = F_X/\text{edinka}$, gen. z besedami v R .

Zgled:

Poišči predstavitv za abelovo grupo $\mathbb{Z} = \mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$ kot kvocient proste grupe $\mathbb{Z} * \mathbb{Z}$.

- $G = \mathbb{Z}^2$ z generatorjema $x = (1, 0)$ in $y = (0, 1)$ (aditiven zapis)

$$\mathbb{Z}^2 \cong \langle \tilde{x}, \tilde{y} \mid [\tilde{x}, \tilde{y}] \rangle = \langle \tilde{x}, \tilde{y} \mid \tilde{x}\tilde{y} = \tilde{y}\tilde{x} \rangle,$$

da smo dobili \mathbb{Z}^2 smo morali generatorjema \tilde{x} in \tilde{y} dodati relacijo komutativnosti.

- Je to res abelova grupa? $F_{\{\tilde{x}, \tilde{y}\}}$ ima za komutatorsko grupo podgrupo, generirano s komuta-

torjem $[\tilde{x}, \tilde{y}]$:

$$\begin{aligned} F_{\{\tilde{x}, \tilde{y}\}} &\xrightarrow{f} \mathbb{Z} \times \mathbb{Z} \\ \tilde{x}^n &\mapsto nx \\ \tilde{y}^n &\mapsto ny \end{aligned}$$

Ker je $\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$ abelova, jedro f vsebuje komutatorsko podgrupo, ki je generirana s komutatorjem $[\tilde{x}, \tilde{y}]$.

Zgled:

Poišči predstavitev S_3 (množica permutacij treh elementov).

Rešitev: Moč grupe je $|S_3| = 3! = 6$ in sicer

$$S_3 = \{e, (12), (13), (23), (123), (132)\}$$

Cilj nam je poiskati čim manjšo množico generatorjev in pripadajoče relacije:

$$\left. \begin{array}{ll} x = (12), & \text{transpozicija} \\ y = (123), & \text{tri-cikel} \end{array} \right\} \text{generatorja (ugibamo)}$$

$$x^2 = e, y^3 = e$$

Potrebujemo še eno zvezo, ker imamo ∞ elementov, S_3 pa jih ima samo 6. Uganemo $xyx = y^2$, tj.

$$S_3 = \langle x, y \mid x^2, y^3, xyx = y^2 \rangle.$$

Zgled:

Izračunaj predstavitev grupe simetrij pravilnega petkotnika G (v tem primeru $G = D_5$ – diederska grupa reda 5). To so togi premiki ravnine, ki petkotnik preslikajo nase – translacije in linearne preslikave. Velja $|D_n| = 2n$.

$$\vec{x} \mapsto \vec{a} + A\vec{x}, \quad \vec{a} = \text{konst. in } \det A \neq 0.$$

- $G \leq S_5$ ($|G| = 10$, $|S_5| = 120$).
- Uganemo generatorje:
 - rotacija: $(12345) = x = \exp(2i\pi/5)$, $x^5 = e$.
 - zrcaljenje: $y = \text{čez simetralo daljice } \overline{3,4}$, $y^2 = e$:

$$y = (25)(34)$$

- $G = \{e, x, x^2, x^3, x^4, y, yx, yx^2, yx^3, yx^4\}$ – res jih je 10.
- So to res vsi (oz. če obrnemo naokrog – to so res vsi, ker moramo poiskati med njimi še eno relacijo). To relacijo lahko najdemo z nekaj sreče:

$$xy = yx^4 = yx^{-1}.$$

Dobili smo relacijo, ki obrne $x^{n_1}y^{n_2} \leftrightarrow y^{m_1}x^{m_2}$. Vse elemente lahko spravimo v obliko $y^k x^\ell$.

$$G = \langle x, y \mid x^5, y^2, xy = yx^{-1} \rangle$$

Opomba: [K zgledu] D_5 ni komutativna ($xy \neq yx$), ima pa ciklični podgrupi reda 2 in 5 – $\langle x \rangle \cong \mathbb{Z}_5$ in $\langle y \rangle \cong \mathbb{Z}_2$, ampak še vedno tako, da $D_5 \not\cong \mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_5$.

Opomba: V prejšnjem zgledu smo spoznali še eno pomembno družino grup – to so diederske grupe D_n , z $2n$ elementi in predstavitevjo

$$D_n = \langle x, y \mid x^n, y^2, xy = yx^{n-1} \rangle = \langle x, y \mid x^n, x^2, xy = yx^{-1} \rangle.$$

Grupa D_n je grupa *izometrij* pravilnega n -kotnika (tj. bijekcij, ki n -kotnik slikajo samega nase).

Poglavje 3

Linearne upodobitve končnih grup

Omejili se bomo na $\mathbb{F} = \mathbb{C}$, čeprav lahko vse izreke in trditve zlahka posplošimo na splošen \mathbb{F} .

Definicija:

Naj bo V vektorski prostor nad \mathbb{C} .

- Če je G grupa, je *linearna upodobitev* G na V (nad \mathbb{C}) homomorfizem

$$G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(V)$$

- $\dim_{\mathbb{C}} V = n \in \mathbb{N}$ imenujemo *stopnja upodobitve*.

Zgled:

Upodobitve stopnje 1 so homomorfizmi

$$G \rightarrow GL_1(\mathbb{C}) = \{[a] \mid \det[a] = a \neq 0\}, \quad GL_1(\mathbb{C}) = \mathbb{C} \setminus \{0\} = \mathbb{C}^*.$$

Če je G končna, je slika upodobitve G v \mathbb{C}^* tudi končna podgrupa, vsebovana v krožnici S^1 (ker imajo elementi v G končen red), vsak element je nek koren enote.

- G končna grupa – potem so vse (končno dimenzionalne) linearne upodobitve $G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(V)$, V končno dimenzionalen vektorski prostor nad \mathbb{C} .
- *Regularna upodobitev*, kjer za V vzamemo vektorski prostor z bazo G , delovanje G pa permutira bazne vektorje ($g \cdot v_h = v_{(gh)}$, kjer $g, h \in G$), na nek način vsebuje vse upodobitve.
- Glavna ideja je ta, da vsaki upodobitvi priredimo *karakter*, ki je funkcija $G \rightarrow \mathbb{C}$. Za začetek zelimo primerjati različne upodobitve.
- Naj bosta $G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(V)$ in $G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(W)$ dve linearni upodobitvi grupe G . *Homomorfizem upodobitev* (ekvivariantni homomorfizem) je linearna preslikava $T : V \rightarrow W$, ki komutira z delovanjem

$$v \in V, \quad g \in G \\ T(gv) = gT(v)$$

- Če je T linearni izomorfizem, ki je ekvivarianten, sta upodobitvi *izomorfni*. Takšne upodobitve enačimo.

- Če je V končno dimensionalen vektorski prostor nad \mathbb{C} , potem $\exists n \in \mathbb{N}$ in linearen izomorfizem $T : \mathbb{C}^n \rightarrow V$. Ta T lahko naredimo za izomorfizem upodobitev tako, da s pogojem ekvivariantnosti definiramo delovanje G na \mathbb{C}^n na osnovi delovanja na V : za $x \in \mathbb{C}^n$ in $g \in G$ mora veljati

$$T(gx) = g \cdot T(x),$$

T izomorfizem $\Rightarrow gx = T^{-1}(g \cdot T(x))$:

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{C}^n & \xrightarrow{T} & V \\ \text{(da diagram komutira)} \quad \downarrow & \cong & \downarrow \quad \text{(delovanje } G) \\ \mathbb{C}^n & \xrightarrow{T} & V \\ & \cong & \end{array}$$

g na \mathbb{C}^n je kompozitum izomorfizmov \Rightarrow je izomorfizem.

Zgled:

Vsaka upodobitev ranga 1 ($\dim_{\mathbb{C}} V = 1$) določa upodobitev abelacije grupe.

Rešitev: to je homomorfizem $\varphi : G \rightarrow GL_1(\mathbb{C}) = \mathbb{C}^*$. Grupa \mathbb{C}^* je abelova. Vsak homomorfizem iz G v abelovo grupo vsebuje v jedru komutatorsko podgrupo $K = [G, G]$ in φ inducira homomorfizem $\bar{\varphi}$:

$$\bar{\varphi} : G/K \rightarrow \mathbb{C}^*, \quad p : G \rightarrow G/K,$$

kjer je $G/K = G/[G, G] \stackrel{\text{def.}}{=} \text{abelacija}$, in velja $\varphi = \bar{\varphi} \circ p$.

Vsi homomorfizmi iz G pridejo iz $G/K \rightarrow \mathbb{C}^*$. ■

Zgled:

Poišči vse upodobitve ranga 1 za diederske grupe D_n .

Rešitev:

- Najprej se spomnimo predstavitve D_n :

$$D_n = \langle x, y \mid x^n, y^2, xy = yx^{-1} \rangle$$

- Iz tega hočemo abelacijo, tj. bomo vsilili še relacijo $xy = yx$. Isto predstavitev potem lahko zapišemo aditivno (namesto multiplikativno) – tako je komutativnost že vsebovana:

$$\text{ab}(D_n) = \langle x, y \mid x^n, y^2, xy = yx^{-1}, xy = yx \rangle = [x, y \mid nx, 2y, x + y = y - x]$$

Zadnja relacija pomeni $2x = 0$, kar v kombinaciji z nx pomeni

$$\begin{aligned} n = \text{sod} = 2m &\Rightarrow 2mx = 0 = m \overbrace{(2x)}^{=0} \Rightarrow 2x = 0, \\ n = \text{lih} = 2m + 1 &\Rightarrow (2m + 1)x = 0 = m \overbrace{(2x)}^{=0} + x = 0 \Rightarrow x = 0. \end{aligned}$$

- Vidimo za $n = 2m$ dobimo relacijo, ki pomeni, da sta x in y dvoštevni osi:

$$\text{ab}(D_{2m}) = [x, y \mid 2x, 2y] \cong \mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2,$$

v primeru, ko je $n = \text{lih}$ pa dobimo, da je x enoštevna os, tj.

$$\text{ab}(D_{2m+1}) = [x, y \mid x, 2y] \cong \mathbb{Z}_1 \times \mathbb{Z}_2 \cong \mathbb{Z}_2.$$

- Po prejšnjem zgledu drži, da so vse upodobitve ranga 1 določene z abelacijo. Torej zadošča, da poiščemo upodobitve abelacije. Išcemo vse možne homomorfizme $\text{ab}(D_n) \rightarrow \mathbb{C}^*$:

– n je lih: $\text{ab}(D_n) \cong \mathbb{Z}_2 = \{\pm 1\}$. Imamo dva taka homomorfizma:

1. $\varphi(a) = 1$, trivialna upodobitev – vse slikamo v identiteto:

$$\varphi(1) = 1,$$

$$\varphi(-1) = 1.$$

2. $\varphi(a) = a$, identična upodobitev – nič ne spremenimo:

$$\varphi(1) = 1,$$

$$\varphi(-1) = -1.$$

– n je sod: $\text{ab}(D_n) \cong \mathbb{Z}_2 \times \mathbb{Z}_2 = \{(1, 1), (1, -1), (-1, 1), (-1, -1)\}$. Izberemo si dva generatorja: $x = (-1, 1)$ in $y = (1, -1)$, potem $xy = (-1, -1)$. Dovolj je povedati, kam se preslikata x in y . Sklepamo: x in y sta reda 2 $\Rightarrow \varphi(x) = \pm 1$ in $\varphi(y) = \pm 1$ ter bo $\varphi(xy) = \pm 1 \Rightarrow$ imamo 4 možnosti (vedno gresta dva elementa v '–1', dva pa v 1. Identiteta mora vedno ostati identiteta.

Definicija:

Naj bo $G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(V)$ upodobitev in $W \subseteq V$ vektorski prostor. W je G -invarianten, če je $g \cdot W = \{gw \mid w \in W\}$ vsebovan v $W \forall g \in G$. V tem primeru lahko zgornjo upodobitev zožimo na W in dobimo *podupodobitev* $G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(W)$.

Opomba: Premisliti moramo, da delovanje z porodi izomorfizem (avtomorfizem?) $W \rightarrow W$ (zahtevali smo le $gW \subseteq W$). Ker je $g : V \rightarrow V$ linearni izomorfizem, je injektiven, zato je tudi zožitev injektivna. Upoštevamo $\dim(\ker) + \dim(\text{im}) = \dim(\text{prostora})$ in delovanje je injektivno

$$\dim(\ker) = 0 \Rightarrow \dim(gW) = \dim W \Rightarrow gW = W.$$

Cilj: Razcepiti upodobitev na podupodobitve, dokler je to mogoče. Ker je $\dim_{\mathbb{C}}(V) < \infty$, se bo proces iskanja podupodobitev končal.

Definicija:

Upodobitev $G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(V)$ je *nerazcepna (ireducibilna)*, če sta edini podupodobitvi $\{0\}$ in V .

Lema:

Naj bo $G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(V)$ upodobitev končne grupe G . Potem ima V G -invarianten skalarni produkt, tj.

$$\langle \bullet, \bullet \rangle_G : V \times V \rightarrow \mathbb{C},$$

$$\langle gv, gw \rangle_G = \langle v, w \rangle_G.$$

Dokaz:

- Naj bo $\langle \bullet, \bullet \rangle : V \times V \rightarrow \mathbb{C}$ poljubni skalarni produkt. Za invarianten skalarni produkt zgornjega povprečimo po delovanju grupe:

$$\langle v, w \rangle_G = \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} \langle gv, gw \rangle.$$

- Tole je res skalarni produkt (*potrditev zgornjega izraza*):

$$\langle v, w \rangle_G = \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} \overbrace{\langle gv, gw \rangle}^{\geq 0},$$

- je res večje ali enako 0,
- je enako 0 samo, kadar je $v = 0$.
- linearnost in antisimetričnost sta enostavni.

- Preveriti moramo še, če je tak skalarni produkt (G -)invarianten: naj bo $h \in G, v, w \in V$.

$$\langle hv, hw \rangle_G = \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} \langle ghv, ghw \rangle.$$

Ko g preteče G , tudi gh preteče cel G – označimo $g' = gh$:

$$\langle hv, hw \rangle_G = \frac{1}{|G|} \sum_{g' \in G} \langle g'v, g'w \rangle = \langle v, w \rangle_G. \blacksquare$$

- Ta skalarni produkt res obstaja, sami smo ga definirali in našli.

■

Posledica:

Naj bo $G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(V)$ linearna upodobitev končne grupe. Izberimo nek G -invarianten skalarni produkt na V . Če elementu $g \in G$ pripadajoči linearni izomorfizem (avtomorfizem?) $g : V \rightarrow V$ predstavimo z matriko A glede na neko ortonormalno bazo (ONB) za V , potem je ta matrika *unitarna*, tj. $A^*A = I$ (oz. $A^* = A^{-1}$).

Opomba: V fiziki bi unitarnost označili kot $A^\dagger A = I$, vendar te notacije ne bomo uporabljali.

Dokaz: Element $g \in G$ je predstavljen z matriko A glede na neko ONB (v_1, \dots, v_n) za V . Pogoji invariantnosti skalarnega produkta da:

$$\langle A^*Av, w \rangle = \langle Av, Aw \rangle = \langle v, w \rangle, \quad \forall v, w \Rightarrow A^*A = I.$$

■

Trditev:

Vsak invarianten podprostor ($gW \subseteq W, \forall g$) ima invarianten komplement. Naj bo $G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(V)$ upodobitev in $W \subseteq V$ invarianten podprostor. Potem \exists komplementaren invarianten podprostor W' za W , tj. $V = W \oplus W'$. Za W' lahko vzamemo kar ortogonalni komplement W^\perp glede na nek invarianten skalarni produkt.

Dokaz: Naj bo $\langle \bullet, \bullet \rangle$ nek G -invarianten skalarni produkt na V in $W^\perp = \{v \in V \mid \langle v, w \rangle = 0, \forall w \in W\}$. Trdimo, da je W^\perp tudi G -invarianten:

- Naj bo $v \in W^\perp$, $g \in G$, potem za gv in $W \in W$ velja

$$\langle gv, w \rangle = \langle g^{-1}gv, g^{-1}w \rangle = \langle \overbrace{v}^{\in W^\perp}, \overbrace{g^{-1}w}^{\in W} \rangle = 0,$$

od koder sledi $gv \in W^\perp$.

- Pokazati moramo še, da $W \oplus W^\perp = V$, kar smo pokazali že pri drugih kurzih tekom našega šolanja (Matematika I, II).

■

Posledica:

[Komentar] Če to ponavljamo, bomo V razcepili na nerazcepne podprostore.

Trditev:

Naj bo $G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(V)$ upodobitev končne grupe G na končno dimenzionalnem vektorskem prostoru V . Potem lahko V zapišemo kot direktno vsoto nerazcepnih upodobitev.

3.1 Konstrukcije upodobitev

Gre za konstrukcije vektorskih prostorov, na katere lahko „razširimo“ še upodobitve.

3.1.1 Direktna vsota

Direktna vsota: $G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(V)$ in $G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(W)$ sta dve upodobitvi. Tedaj je $G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(V \oplus W)$, s predpisom $g(v, w) = (gv, gw)$, spet upodobitev, dobljena iz direktne vsote. Če izberemo bazi za V in W ter glede na ti bazi delovanje $g \in G$ predstavimo z matrikama A na V in B na W , je delovanje g na $V \oplus W$ dano z direktno vsoto:

$$A \oplus B = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & B \end{bmatrix}.$$

3.1.2 Tenzorski produkt

$G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(V)$ in $G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(W)$ upodobitvi. Tenzorski produkt $V \otimes W$ je kvocient vektorskega prostora z bazo $V \times W$ po najmanjši ekvivalenčni relaciji, ki zadošča:

$$\left. \begin{aligned} (v_1 + v_2, w) &\sim (v_1, w) + (v_2, w) \\ (v, w_1 + w_2) &\sim (v, w_1) + (v, w_2) \end{aligned} \right\} \text{aditivnost,}$$

$$(\lambda v, w) \sim \lambda(v, w) \sim (v, \lambda w) \text{ homogenost,}$$

$\forall v_i \in V, \forall w_i \in W$ in $\lambda \in \mathbb{C}$.

- To pomeni: vektorski prostor $V \times W$ je množica vseh končnih linearnih kombinacij $\sum_{i=1}^n \lambda_i(v_i, w_i)$, ekvivalenčna relacija pa dovoli, da operacije iz V in W prenesemo na $V \otimes W$.

- Element v $V \otimes W$, ki pripada paru (v, w) označimo $v \otimes w$ in imenujemo *elementarni tenzor*.
- Poljuben element v $V \otimes W$ je torej oblike

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i v_i \otimes w_i$$

in pri tem velja

$$\lambda(v \otimes w) = (\lambda v \otimes w) = (v \otimes \lambda w) = \lambda v \otimes w.$$

Trditev:

Če je v_1, \dots, v_k baza za V in w_1, \dots, w_ℓ baza za W , je $\{v_i \otimes w_j \mid i=1, \dots, k, j=1, \dots, \ell\}$ baza za $V \otimes W$.

Dokaz:

- Za poljuben element v $V \otimes W$ imamo

$$\begin{aligned} & \underbrace{\sum_m \lambda_m x_m \otimes y_m, \quad \begin{matrix} x_m = \sum_i a_{mi} v_i, \\ y_m = \sum_j b_{mj} w_j \end{matrix}} \\ &= \sum_m \lambda_m \left(\sum_i a_{mi} v_i \right) \otimes \left(\sum_j b_{mj} w_j \right) \\ &= \sum_{m,i,j} \lambda_m a_{mi} b_{mj} (v_i \otimes w_j). \end{aligned}$$

- Še linearna neodvisnost: recimo

$$\begin{aligned} & \sum_{i,j} \lambda_{ij} v_i \otimes w_j = 0 \\ & \sum_j \left(\sum_i \lambda_{ij} v_i \right) \otimes w_j = 0 \\ &= \left(\sum_i \lambda_{i1} v_i, w_1 \right) + \dots + \left(\sum_i \lambda_{i\ell} v_i, w_\ell \right) = (0, 0). \end{aligned}$$

(v prostoru z bazo $V \times W$) lahko seštevamo in množimo s skalarjem, osredotočimo se na drugo komponento. Ker so w_j baza, se to ne da, razen če so vsi koeficienti enaki 0. Ker so tudi v_i baza, morajo biti $\lambda_{ij} = 0$.

■

Primer: Poišči izražavo $\overbrace{L(V, W)}^{L(V, W)}$ linearnih preslikav iz $V \cup W$ s tenzorskim produktom.

Rešitev: Poljuben $T \in L(V, W)$ vsakemu $v \in V$ priredi $T(v) \in W$, to lahko gledamo kot na takle elementi tenzorskega produkta:

$$T \in V^* \otimes W,$$

kjer je $V^* = \{L(V, \mathbb{C})\}$ dualni prostor linearnih funkcionalov na V . Predpis pa deluje takole:

$$w \in W, \quad f \otimes w \in V^* \otimes W,$$

na poljuben $v \in V$ deluje s predpisom

$$(f \otimes w)(v) \equiv f(v)w \in W.$$

Da poljubno linearno preslikavo T zapišemo kot vsoto elementarnih tenzorjev, si pomagamo z bazami: (v_1, \dots, v_n) baza za V , tej priredimo dualno bazo (f_1, \dots, f_n) baza za V^* s predpisom $f_i(v_j) = \delta_{ij}$. Baza (w_1, \dots, w_m) za W da matriko $A = [a_{ij}]$ za T

$$T = \sum_{ij} a_{ji} f_i \otimes w_j. \blacksquare$$

Tvorimo lahko večkratne tenzorske produkte. Posebej zanimivi so tenzorji oblike

$$\underbrace{V \otimes V \otimes \dots \otimes V}_{r\text{-krat (kovariantni del)}} \otimes \underbrace{V^* \otimes V^* \otimes \dots \otimes V^*}_{s\text{-krat (kontravariantni del)}} = V^{r,s}.$$

Definicija:

Tenzorska algebra, prirejena prostoru V nad \mathbb{C} je

$$T(V) = \bigoplus_{i=0}^{\infty} \underbrace{V^{\otimes i}}_{V^{\otimes i}} = \underbrace{(\mathbb{C})}_{V^{\otimes 0}} \oplus \underbrace{(V)}_{V^{\otimes 1}} \oplus \underbrace{(V \otimes V)}_{V^{\otimes 2}} \oplus \underbrace{(V \otimes V \otimes V)}_{V^{\otimes 3}} \oplus \dots$$

To je vektorski prostor, ki ga lahko opremimo še z množenjem vektorjev, analogno konstrukciji proste grupe oz. prostega produkta:

$$V^i \times V^j \rightarrow V^{i+j}$$

$$(v_1 \otimes \dots \otimes v_i, w_1 \otimes \dots \otimes w_j) \mapsto v_1 \otimes \dots \otimes v_i \otimes w_1 \otimes \dots \otimes w_j$$

3.1.3 Simetrični in alternirajoči produkt

Definicija:

Simetrični produkt dobimo iz tenzorskega tako, da zahtevamo komutativnost faktorjev:

$$v_1 \otimes v_2 \neq v_2 \otimes v_1, \text{ v splošnem.}$$

Na $V \otimes V$ vpeljemo najmanjšo ekvivalenčno relacijo, pri kateri velja

$$v_1 \otimes v_2 = v_2 \otimes v_1, \quad \forall v_1, v_2 \in V.$$

Kvocientu rečemo *simetrični produkt* in označimo s $S^2(V)$ (druga simetrična potenca).

Elemente pišemo kar z množenjem:

$$v_1 \otimes v_2 \in V \otimes V \rightsquigarrow v_1 v_2 \in S^2(V).$$

Podobno v višjih potencah. $S^n(V)$ je kvocient V^n , kjer zahtevamo, da faktorji komutirajo. Vsota vseh simetričnih potenc tvori *simetrično algebro*:

$$S(V) = \bigoplus_{i=0}^{\infty} S^i(V).$$

To lahko enačimo s polinomi v k spremenljivkah, kjer je $k = \dim_{\mathbb{C}} V$. Vsak simetrični tenzor reda n lahko zapišemo kot vsoto baznih $v_{i_1} v_{i_2} \dots v_{i_n}$, kjer so v_{i_j} iz neke baze V . Če bazni element v_i enačimo s spremenljivko x_i , so zgornje monomi.

Definicija:

V *alternirajoči potenci* vektorskega prostora V zahtevamo, da je produkt tenzorjev antikomutativen, tj. dodamo relacijo

$$v_1 \otimes v_2 = -v_2 \otimes v_1.$$

Kvocijent $V \otimes V$ pri tem poimenujemo druga *vnanja* (*exterior*) ali *alternirajoča* potenca V . Oznaka je $\Lambda^2(V)$, element pa je $v_1 \wedge v_2$.

Spet definiramo višje potence in algebro. *Vnanja algebra* nad V je

$$\Lambda(V) = \bigoplus_{i=0}^{\infty} \Lambda^i(V) = \bigoplus_{i=0}^n \Lambda^i(V),$$

kjer je $n = \dim_{\mathbb{C}} V$. Še več, $\dim_{\mathbb{C}} \Lambda(V) = 2^n$. To se zgodi, ker $v_1 \wedge v_1 = 0$, zato se bazni vektorji ne morejo ponavljati \Rightarrow

$$\dim_{\mathbb{C}} \Lambda^i(V) = \binom{n}{i}.$$

V vektorski prostor. Tenzorska algebra $T(V) = \bigoplus_i V^{\otimes i} = \bigoplus_i V^i$. Če je $\{v_1, \dots, v_n\}$ baza za V , je $\{v_{j_1} \otimes \dots \otimes v_{j_n}\}$; $1 \leq j_i \leq n$ baza za $V^{\otimes k}$. Tenzorski produkt je linearen v vsakem faktorju. Dve kvocijentni konstrukciji:

- Simetrična algebra, kjer vsilimo komutativnost vektorskega prostora.
- Vnanja algebra, kjer vsilimo antikomutativnost, baza za $\Lambda^k(V)$ je $\{v_{j_1} \wedge \dots \wedge v_{j_k}\}$, kjer je $1 \leq j_1 \leq j_2 \leq \dots \leq j_k \leq n$.

Simetrično algebro in vnanjo algebro lahko gledamo tudi kot podmnožici v tenzorski algebri. Pomagamo si s projekcijama, ki vsakemu tenzorju priredita simetrični oz. alternirajoči tenzor.

- V $T^2(V) = V \otimes V$ imamo elementarne tenzorje $v \otimes w$ in takemu lahko priredimo simetrizirani tenzor

$$v \cdot w = \frac{1}{2}(v \otimes w + w \otimes v),$$

izraz na desni je simetričen na zamenjavo v in w . Podobno lahko dobimo anti-simetrični tenzor

$$v \wedge w = \frac{1}{2}(v \otimes w - w \otimes v).$$

- V splošnem definiramo projekciji
 - Simetrična projekcija, S^k :

$$S^k : T^k(V) \rightarrow S^k(V),$$

$$v_1 \otimes v_2 \otimes \dots \otimes v_k \mapsto \frac{1}{k!} \sum_{\sigma \in S_k} v_{\sigma(1)} \otimes \dots \otimes v_{\sigma(k)},$$

- Alternirajoča projekcija, A^k :

$$A^k : T^k(V) \rightarrow \Lambda^k(V),$$

$$v_1 \otimes v_2 \otimes \dots \otimes v_k \mapsto \frac{1}{k!} \sum_{\sigma \in S_k} \text{sign}(\sigma) v_{\sigma(1)} \otimes \dots \otimes v_{\sigma(k)}.$$

Če je $G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(V)$ linearna upodobitev grupe G , jo lahko razširimo do upodobitve po tenzorskih potencah z delovanjem po faktorjih

$$G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(V^{\otimes k})$$

$$g(v_1 \otimes \dots \otimes v_k) = gv_1 \otimes \dots \otimes gv_k.$$

To inducira delovanje na simetrične in anti-simetrične potence.

Zgled:

Pokaži, da je $T^2(V)$ direktna vsota $S^2(V) \oplus \Lambda^2(V)$.

Rešitev:

- Hitro vidimo $v \otimes w = v \cdot w + v \wedge w$, torej je res vsota.
- Pokazati moramo še, da je $S^2(V) \cap \Lambda^2(V) = \{0\}$: če je $x \in S^2(V) \cap \Lambda^2(V)$, mora biti $x = 0$.
Pa naj bo $x \in V \otimes V$, $\{v_1, \dots, v_n\}$ baza za V , $\{v_i \otimes v_j\}$ baza za $V \otimes V$. Potem

$$x = \sum_{i,j=1}^n \lambda_{ij} v_i \otimes v_j \quad \left. \begin{array}{l} \stackrel{\text{sim.}}{=} \sum_{i,j=1}^n \lambda_{ij} v_j \otimes v_i \Rightarrow \lambda_{ij} = \lambda_{ji} \\ \stackrel{\text{asim.}}{=} - \sum_{i,j=1}^n \lambda_{ij} v_j \otimes v_i \Rightarrow \lambda_{ij} = -\lambda_{ji} \end{array} \right\} \Rightarrow \lambda_{ij} = -\lambda_{ij} \Rightarrow \lambda_{ij} \equiv 0 \quad \forall i, j.$$

■

3.2 Karakterji upodobitev

Definicija:

Naj bo $\varphi : G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(V)$ linearna upodobitev grue G . Potem je *karakter* te upodobitve funkcija

$$\begin{aligned} \chi : G &\rightarrow \mathbb{C} \\ g &\mapsto \text{tr}(g : V \rightarrow V) \\ \chi(g) &= \text{tr}(\varphi(g)). \end{aligned}$$

Primer: Če je $\varphi : G \rightarrow GL_n(\mathbb{C}^*)$ upodobitev stopnje 1, potem je njen karakter kar φ .

Pomen: Pomagajo pri razumevanju nekomutativnih grup, ki imajo upodobitve višjih stopenj.

Trditev:

Naj bo G končna grupa in $\varphi : G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(V)$ upodobitev stopnje n ($n = \dim_{\mathbb{C}} V$). Potem velja

- (1) $\chi(e) = n$,
- (2) $\chi(g^{-1}) = \overline{\chi(g)} \quad \forall g \in G$.
- (3) $\chi(hgh^{-1}) = \chi(g) \quad \forall g, h \in G$.

Dokaz:

(1) $\varphi(e) = \text{tr}(I_{n \times n}) = n$, I je matrika identitete. ■

(3) Uporabimo cikličnost sledi:

$$\chi(hgh^{-1}) = \text{tr}(hgh^{-1} : V \rightarrow V) = \text{tr}(gh^{-1}h) = \text{tr}(g : V \rightarrow V) = \chi(g). \quad \blacksquare$$

- (2) Naj bo $D : \chi(g^{-1}) = \overline{\chi(g)}$. Če V opremimo z G -invariantnim skalarnim produktom, vsakemu $g \in G$ pri upodobitvi glede na ONB pripada unitarna matrika A . To pomeni, da je $A^{-1} = A^* = \bar{A}^T$. Potem $\text{tr}(A^{-1}) = \overline{\text{tr}(A)}$. ■

Opomba:

- Lastnost (3) pomeni, da so karakterji kot funkcije $G \rightarrow \mathbb{C}$ konstantni na konjugiranostnih razredih elementov v G .
- Na G imamo avtomorfizem konjugiranja: $\forall h \in G$ imamo avtomorfizem $G \rightarrow G, g \rightarrow hgh^{-1}$.
- Množico $C_g = \{hgh^{-1} \mid h \in G\}$ imenujemo (*konjugiranostni*) *razred* elementa g , in ti razredi sestavljajo kompozicijo G (G je disjunktna unija različnih C_g , dva razreda C_{g_1} in C_{g_2} sta bodisi enaka, bodisi bodisi disjunktna).

Trditev:

Naj bosta $\varphi : G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(V)$ in $\psi : G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(W)$ upodobitvi, naj bosta χ_{φ} in χ_{ψ} njuna karakterja. Potem velja:

1. $\chi_{\varphi \oplus \psi} = \chi_{\varphi} + \chi_{\psi}$,
2. $\chi_{\varphi \otimes \psi} = \chi_{\varphi} \cdot \chi_{\psi}$.

Dokaz:

1. Če je $\varphi = A(g) : V \rightarrow V$ in $\psi(g) = B(g) : W \rightarrow W$, potem je $(\varphi \oplus \psi)(g) = A(g) \oplus B(g) : V \oplus W \rightarrow V \oplus W$ in ima sled

$$\text{tr}(A \oplus B) = \text{tr} \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & B \end{bmatrix} = \text{tr}(A) + \text{tr}(B). \blacksquare$$

2. Naj bo $\{v_1, \dots, v_n\}$ baza za V , $\{w_1, \dots, w_m\}$ baza za W . Potem je baza $V \otimes W$ seveda

$$\{v_i \otimes w_j \mid i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m\}$$

kjer smo implicirali $\dim_{\mathbb{C}} V = n$ in $\dim_{\mathbb{C}} W = m$. Če element $A(g) : V \rightarrow V$ predstavlja matrično obliko za delovanje $\varphi(g)$, potem je $\text{tr}(A(g)) = \sum_{i=1}^n A(g)_{ii}$ in podobno velja za $B(g)$. Po definiciji delovanja $g \in G$ na $V \otimes W$ je

$$\begin{aligned} g(v_i \otimes w_j) &= (A(g)v_i) \otimes (B(g)w_j) = \left(\sum_k (A(g))_{ki} v_k \right) \otimes \left(\sum_{\ell} (B(g))_{\ell j} w_{\ell} \right) \\ &= \sum_{k, \ell} (A(g))_{ki} (B(g))_{\ell j} v_k \otimes w_{\ell} \end{aligned}$$

Kako $g : V \otimes W \rightarrow V \otimes W$ priredimo matriko? Izračunamo g na baznih vektorjih $v_i \otimes w_j$ in te slike razvijemo po isti bazi. Diagonalni elementi ustrezajo komponentam $v_i \otimes w_j$ pri razvoju $g(v_i \otimes w_j)$ po bazi. Ta koeficient je $(A(g))_{ii} (B(g))_{jj}$,

$$\text{tr}(A(g) \otimes B(g)) = \sum_{i,j} A_{ii} B_{jj} = \left(\sum_i (A(g))_{ii} \right) \left(\sum_j (B(g))_{jj} \right) = \text{tr}(A) \cdot \text{tr}(B) = \chi_{\varphi}(g) \cdot \chi_{\psi}(g). \blacksquare$$

Zgled:

$G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(V)$ upodobitev s karakterjem χ . Izrazi karakterja upodobitev $S^2(V)$ in $\Lambda^2(V)$ s tem χ .

Rešitev: Vemo, da je $\chi_{T^2(V)} = \chi(g)^2$ in da je $T^2(V) = S^2(V) \oplus \Lambda^2(V)$. Potem

$$\chi_{T^2(V)} = \chi_{S^2(V)} + \chi_{\Lambda^2(V)} = \chi^2.$$

Za $S^2(V) \subseteq T^2(V)$ dobimo, da so baza $S^2(V)$ torej tenzorji oblike $(v_i \otimes v_j + v_j \otimes v_i)$. Za vsak $g \in G$ računamo sled matrike, s katero g deluje na $S^2(V)$. Na V deluje g za matriko A :

$$Av_i = \sum_k a_{ki} v_k; \quad 1 \leq i \leq j \leq n.$$

$$\begin{aligned} g(v_i \otimes v_j + v_j \otimes v_i) &= Av_i \otimes Av_j + Av_j \otimes Av_i \\ &= \left(\sum_k a_{ki} v_k \right) \otimes \left(\sum_\ell a_{\ell j} v_\ell \right) + \left(\sum_\ell a_{\ell j} v_\ell \right) \otimes \left(\sum_k a_{ki} v_k \right) \\ &= \sum_{k, \ell} a_{ki} a_{\ell j} (v_k \otimes v_\ell + v_\ell \otimes v_k) \\ &= \sum_{k \leq \ell} (v_k \otimes v_\ell + v_\ell \otimes v_k) \begin{cases} a_{ki} a_{\ell j} + a_{\ell i} a_{kj}; & k \neq \ell \\ a_{ki} a_{kj}; & k = \ell \end{cases} \end{aligned}$$

Prispevek k sledi je koeficient pri $v_i \otimes v_j + v_j \otimes v_i$ in je enak $(a_{ii} a_{jj} + a_{ji} a_{ij})$, če je $i \neq j$, če sta enaka, je pa $(a_{ii} a_{ii})$.

$$\begin{aligned} \text{tr}(A) &= \sum_{i=1}^n a_{ii}^2 + \sum_{1 \leq i \leq j \leq n} (a_{ii} a_{jj} + a_{ij} a_{ji}) \\ &= \frac{1}{2} \sum_i a_{ii}^2 + \frac{1}{2} \sum_i a_{ii}^2 + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} (a_{ii} a_{jj} + a_{ji} a_{ij}) \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i, j} (a_{ii} a_{jj} + a_{ij} a_{ji}) \\ &= \frac{1}{2} (\chi(g^2) + \chi(g)^2) \end{aligned}$$

Ugotovimo:

$$\begin{aligned} \chi_{S^2(V)} &= \frac{1}{2} (\chi(g)^2 + \chi(g^2)), \\ \chi_{\Lambda^2(V)} &= \frac{1}{2} (\chi(g)^2 - \chi(g^2)). \end{aligned}$$

Trditev:

Schurova lema: Naj bosta dani nerazcepni upodobitvi $\varphi : G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(V)$ in $\psi : G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(W)$ in naj bo $T : V \rightarrow W$ linearna G -ekvivariantna preslikava ($T(gv) = g(T(v)) = gT(v)$). Potem velja:

1. Če φ in ψ nista izomorfni, je $T = 0$.
2. Če je $\varphi = \psi$, potem je $T = \lambda I$, $\lambda \in \mathbb{C}$.

Dokaz: Nerazcepna upodobitev ima le dva invariantna podprostora: $\{0\}$ in cel prostor. Za G -ekvivariantno T , sta $\ker(T)$ in $\text{im}(T)$ invariantna podprostora

$$\left. \begin{aligned} \text{za } v \in \ker(T) : T(v) &= 0 \\ \text{poljuben } g \in G : T(gv) &= gT(v) = 0 \end{aligned} \right\} gv \in \ker T,$$

če je $w \in \text{im } T : w = T(v)$ za nek $v \in V$ za nek $v \in V$
za poljuben $g \in G : gw = gT(v) = T(gv) \in \text{im } T$

1. Če je $T = 0$ je v redu, sicer uporabimo zgornje: $\ker(T)$ je invarianten podprostor in $\ker(T) \neq 0$, to ni ves prostor $\Rightarrow \ker(T) = \{0\} \Rightarrow T$ injektivna. $T \neq 0 \Rightarrow \text{im}(T) \neq 0$, invarianten podprostor, ni $\{0\} \Rightarrow \text{im}(T) = W \Rightarrow T$ surjektivna in nijenktivna, tj. izomorfizem. T je linearen ekvivariantni izomorfizem \Rightarrow je izomorfizem upodobitev.
2. $T : V \rightarrow V$ je linearna preslikava med \mathbb{C} vektorskimi prostori. Potem ima neko lastno vrednost $\lambda \in \mathbb{C}$. Zato $\ker(T - \lambda I) \neq 0$, iz ekvivariantnosti T sledi tudi ekvivariantnost ' $T - \lambda I$ ', zato je $\ker(T - \lambda I) = V \Rightarrow T - \lambda I = 0$.

■

Opomba: Če je $T : V \rightarrow W$ poljubna preslikava, lahko T „povprečimo“ tako, da dobimo G -ekvivariantno preslikavo $\hat{T} : V \rightarrow W$,

$$\hat{T}(v) \equiv \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} g^{-1} T(gv).$$

Res:

$$\begin{aligned} \hat{T}(hv) &= \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} h h^{-1} g^{-1} T(ghv) \\ &= \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} h (gh^{-1}) T(ghv) = \frac{h}{|G|} \sum_{k \in G} k^{-1} T(kv) \\ &= h \cdot \hat{T}(v). \quad \blacksquare \end{aligned}$$

- Iz zgornje trditve sledi: če sta V in W neizomorfni upodobitvi, T poljuben, potem je $\hat{T} = 0$.
- Če je $T : V \rightarrow V$ poljuben, je $\hat{T} = \lambda I$ za nek $\lambda \in \mathbb{C}$.

Ali lahko iz tega določimo vrednost λ ?

$$\hat{T} = \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} g^{-1} T g.$$

Poskusimo sled:

$$\text{tr}(\hat{T}) = \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} \text{tr}(g^{-1} T g) = \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} \text{tr}(T) = \text{tr}(T)$$

$$\text{tr}(\hat{T}) = \text{tr}(\lambda I) = \lambda n; \quad n = \dim_{\mathbb{C}} V$$

$$\lambda = \frac{1}{n} \text{tr}(T), \quad \text{oz.} \quad \hat{T} = \frac{1}{n} \text{tr}(T) I$$

Posledica:

Ortogonalnost matričnih koeficientov: Naj bosta $\varphi : G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(V)$ in $\psi : G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(W)$ nerazcepni upodobitvi. Izberimo ONB $\{v_1, \dots, v_n\}$ in $\{w_1, \dots, w_m\}$ za vektorka prostora V in W . Poljubnemu elementu $g \in G$ glede na ti bazi pripadata matriki $A^g = A \in GL_n(\mathbb{C})$ in $B^g = B \in GL_m(\mathbb{C})$.

1. Če V in W nista izomorfni upodobitvi je

$$\sum_{g \in G} A_{k\ell}^g \overline{B^g_{ji}} = 0, \quad \forall i, j, k, \ell$$

2. Če $V = W$: (mislimo si lahko tudi $\varphi = \psi$)

$$\frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} A_{k\ell}^g \overline{A_{ji}^g} = \frac{1}{n} \delta_{i\ell} \delta_{jk}.$$

Dokaz:

1. Naj bo $T : V \rightarrow W$ linarna preslikava, da

$$\left. \begin{array}{l} T : v_k \mapsto w_j \\ T : v_i \mapsto 0, \forall i \neq k \end{array} \right| T = \begin{bmatrix} 0 & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & 0 & & & \\ & & & 1_{jk} & & \\ & & & & 0 & \\ & & & & & \ddots \\ & & & & & & 0 \end{bmatrix} = E_{jk}$$

Vemo: $\hat{T} = 0$ (po Schurovi lemi). Če \hat{T} napišemo v matriki C glede na izbrani bazi so vsi njeni elementi enaki 0:

$$\begin{aligned} 0 = C_{i\ell} &= \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} \left(B^{-1} E_{jk} A \right)_{i\ell} \\ &= \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} B_{ij}^{-1} A_{k\ell} = \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} \overline{B_{ji}} A_{k\ell} = 0. \blacksquare \end{aligned}$$

2. Tu bomo kar takoj pričeli z enačbo

$$\left. \begin{array}{l} T : V \rightarrow V \\ v_k \mapsto v_j \end{array} \right\} \hat{T} = \frac{1}{n} \operatorname{tr}(T) \cdot I = \frac{1}{n} \delta_{kj} \cdot I.$$

$$C_{i\ell} = \frac{1}{n} \delta_{i\ell} \delta_{jk}, \text{ napišemo kot prej}$$

$$C_{i\ell} = \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} \left(A^{-1} E_{jk} A \right)_{i\ell} = \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} \overline{A_{ji}} A_{k\ell}. \blacksquare$$

Opomba: Zgornji matrični koeficienti A_{ij}^g sestavljajo funkcije $G \rightarrow \mathbb{C}$ in formule v posledici motivirajo definicijo skalarnih produktov na takih funkcijah.

Definicija:

Naj bosta $\alpha, \beta : G \rightarrow \mathbb{C}$. Njun skalarni produkt je

$$\langle \alpha, \beta \rangle = \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} \alpha(g) \overline{\beta(g)}.$$

Trditev:

Naj bosta χ in χ' neizomorna karakterja nerazcepnih upodobitev. Potem

1. $\|\chi\|^2 = \langle \chi, \chi \rangle = 1 = \|\chi'\|^2$,
2. $\langle \chi, \chi' \rangle = 0$.

Dokaz:

2. Naj bosta $\varphi : G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(V)$ in $\psi : G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(W)$ neizomorfni upodobitvi, s karakterjema χ_{φ} in χ_{ψ} . Izberimo dve ONB. Potem sta $\varphi(g)$ in $\psi(g)$ predstavljena z matrikama A^g in B^g ,

$$\chi_{\varphi}(g) = \text{tr}(A^g) = \sum_i A_{ii}^g,$$

$$\chi_{\psi}(g) = \text{tr}(B^g) = \sum_j B_{jj}^g.$$

Njun skalarni produkt je

$$\begin{aligned} \langle \chi_{\varphi}, \chi_{\psi} \rangle &= \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} \chi_{\varphi}(g) \overline{\chi_{\psi}(g)} = \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} \sum_i A_{ii}^g \sum_j \overline{B_{jj}^g} \\ &= \frac{1}{|G|} \sum_{i,j} \underbrace{\left(\sum_{g \in G} A_{ii}^g \overline{B_{jj}^g} \right)}_{=0} = 0. \blacksquare \end{aligned}$$

1. Normo $\|\chi\|^2$ lahko zapišemo kot

$$\langle \chi_{\varphi}, \chi_{\varphi} \rangle = \sum_{i,j} \frac{1}{|G|} \underbrace{\sum_{g \in G} A_{ii}^g \overline{A_{jj}^g}}_{=\frac{1}{n} \delta_{ij} \delta_{ij}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1 = 1. \blacksquare$$

Povzetek: Karakterji nerazcepnih upodobitev tvorijo ortonormiran sistem funkcij $G \rightarrow \mathbb{C}$.

Opomba: Te funkcije ne tvorijo baze vseh funkcij $G \rightarrow \mathbb{C}$ (je končno razsežen vektorski prostor za končno grupo G) za splošno grupo G , saj so konstantne na konjugiranih razredih.

Vemo: V poljubna upodobitev $\Rightarrow V$ zapišemo kot (direktno) vsoto nerazcepnih

$$V = W_1 \oplus W_2 \oplus \dots \oplus W_k,$$

kjer so W_i nerazcepne upodobitve (ne nujno neizomorfne).

Posledica:

Če je V poljubna upodobitev in W nerazcepna upodobitev, je

$$\langle \chi_V, \chi_W \rangle = \text{število } W_i \text{ v dekompoziciji } V \text{ na nerazcepne, ki so izomorfni } W$$

(tj. kolikokrat se W ponovi v V).

Dokaz: Če je $W_i \not\cong W$, je $\langle \chi_{W_i}, \chi_W \rangle = 0$, če $W_i \cong W$ je $\langle \chi_{W_i}, \chi_W \rangle = 1$. V je razcepna upodobitev, tj. $V = W_1 \oplus \dots \oplus W_k$, torej tudi $\chi_V = \chi_{W_1} + \dots + \chi_{W_k}$. Od tu takoj vidimo

$$\langle \chi_V, \chi_W \rangle = \sum_{i=1}^k \langle \chi_{W_i}, \chi_W \rangle = \underbrace{\sum_{i \in I} \langle \chi_{W_i}, \chi_W \rangle}_{\neq 0} + \underbrace{\sum_{j \in J} \langle \chi_{W_j}, \chi_W \rangle}_{=0} = \sum_{i \in I} 1 + 0 = 1 \cdot |I|,$$

kjer smo v indeksni množici vzeli tiste indekse, za katere je skalarni produkt neničeln. Po prvotni ugotovitvi, je teh ravno toliko, kolikor je $W_i \cong W$, tj. smo dokazali posledico. ■

Sklep: Karakter določa upodobitev do izomorfizma natančno. Vemo, da je karakterjev nerazcepnih upodobitev le končno mnogo (ker so ortogonalni v končno dimenzionalnem vektorskem prostoru), zato je tudi nerazcepnih neizomorfnih upodobitev le končno mnogo. Če so W_1, \dots, W_s vse neizomorfne nerazcepne upodobitve za G , je poljubna upodobitev V

$$V \cong \bigoplus_{i=1}^s m_i W_i,$$

kjer W_i nastopa m_i -krat, zato $m_i \geq 0$ in

$$m_i = \langle \chi_V, \chi_{W_i} \rangle.$$

To da kanonično dekompozicijo na sumande, posebej je

$$\chi_V = \sum_{i=1}^s m_i \chi_{W_i}$$

in

$$\langle \chi_V, \chi_V \rangle = \sum_{i=1}^s m_i^2.$$

Trditev:

Dekompozicija regularne upodobitve: Za končno G naj bo V_G vektorski prostor z bazo G , kjer bazne vektorje pišemo $\{V_g \mid g \in G\}$. Na V_G deluje G s permutacijami baznih vektorjev: $gv_h = v_{gh}$. Potem velja:

1. Če je χ_G karakter te upodobitve, je $\chi_G(e) = |G|$ in $\chi_G(g) = 0, \forall g \neq e$.
2. Če je W_i poljubna nerazcepna upodobitev s karakterjem χ_i , je $\langle \chi_G, \chi_i \rangle = n_i = \dim_{\mathbb{C}} W_i$.
3. Če so W_1, \dots, W_s vse nerazcepne upodobitve, je

$$\sum_{i=1}^s n_i^2 = |G|.$$

4. $\sum_{i=1}^n n_i \chi_i = 0, \forall g \neq e$.

Dokaz:

1. $\chi_G(e) = \dim V_G = |G|$ (očitno – ■). Ker je $gv_h = v_{gh} \neq v_h \forall h$, če $g \neq e$, ima matrika delovanja z g na diagonali same ničle (glede na bazo $\{v_g\}$) $\Rightarrow \chi(g) = \text{tr} = 0$. ■

2. Samo račun:

$$\langle \chi_G, \chi_i \rangle = \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} \chi_G(g) \overline{\chi_i(g)},$$

kar je enako nič $\forall g \neq e$, tj. vsota odpade in dobimo

$$\langle \chi_G, \chi_i \rangle = \frac{1}{|G|} \cdot |G| \underbrace{\overline{\chi_i(e)}}_{\dim W_i} = n_i.$$

3. Iz druge točke vemo, da je

$$V_G = \bigoplus_{i=1}^s n_i W_i$$

in zato je

$$\chi_G = \sum_{i=1}^s n_i \chi_i.$$

Za $g = e$ dobimo $\chi_G(e) = |G| = \sum_i n_i \chi_i(e) = \sum_i n_i^2$, saj $\chi_i(e) = n_i$.

4. $g \neq e$ naredimo analogno in dobimo $\chi_G(g) = 0 = \sum_i n_i \chi_i(g)$.

■

Zgled:

Poišči vse nerazcepne upodobitve grupe $C_2 = \{1, -1\}$.

Rešitev: Poznamo že dve 1D upodobitvi $C_2 \rightarrow \mathbb{C}^*$:

$$\begin{array}{ll} \varphi_1 : 1 & \mapsto 1 \\ \varphi_1 : -1 & \mapsto 1 \\ \text{(trivialna)} & \end{array} \quad \begin{array}{ll} \varphi_2 : 1 & \mapsto 1 \\ \varphi_2 : -1 & \mapsto -1 \\ \text{(identična)} & \end{array}$$

Po tretji izjavi o dekompoziciji regularne upodobitve je $|C_2| = 2 = \sum_i n_i^2 \Rightarrow$ to sta edini nerazcepni upodobitvi. Poljubna upodobitev v $GL_{\mathbb{C}}(V)$, $\dim_{\mathbb{C}} V = n$, obstaja dekompozicija V na 1-D podprostore, na katere C_2 deluje s φ_1 ali φ_2 . Obstaja taka baza z V , v kateri je matrika, ki pripada $\varphi(-1)$ enaka (je direktna vsota \pm 1-D matrik)

$$\begin{bmatrix} \pm 1 & & & \\ & \pm 1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \pm 1 \end{bmatrix}$$

Zgled:

Poišči vse nerazcepne upodobitve za C_n !

Rešitev: Možne 1-D: $\varphi : C_n \rightarrow \mathbb{C}^* = GL_1(\mathbb{C})$. Dovolj je povedati, kam gre $\exp(2i\pi/n)$ (recimo, da ga izberemo za generator):

$$\varphi_\ell : e^{2i\pi/n} \mapsto e^{pi\ell/n}, \quad \ell = 0, 1, \dots, n-1$$

Ali so vse te upodobitve neizomorfne? Dve upodobitvi sta izomorfni, če obstaja ekvivariantni izomorfizem vektorskih prostorov, na katere delujeta. V tem primeru, bi bila to preslikava

$$T : \underset{\varphi_\ell}{\mathbb{C}} \rightarrow \underset{\varphi_m}{\mathbb{C}},$$

za katero bi veljalo $T \circ \varphi_\ell = \varphi_m \circ T$. Ampak v \mathbb{C}^* je T lahko le množenje s skalarjem, tj.

$$\lambda \varphi_\ell = \varphi_m \lambda \Rightarrow \varphi_\ell = \varphi_m,$$

kar pomeni, da so izomorfne lahko le enake upodobitve. Kot prej lahko tudi sedaj preštejemo in ugotovimo, da so to res vse:

$$|C_n| = n = \sum_{\ell=0}^{n-1} 1^2 = n.$$

Nadalje želimo iz strukture grupe G določiti število *neizomorfni nerazcepnih upodobitev* (NNU) grupe. Pomagamo si z lastnostmi karakterjev kot funkcije $G \rightarrow \mathbb{C}$. Vemo že, da so elementi karakterji konstantni na konjugiranostnih razredih elementov grupe G , saj $\chi(hgh^{-1}) = \chi(g), \forall g, h \in G$.

Definicija:

Naj bo $\mathcal{H}_G \equiv \{f : G \rightarrow \mathbb{C} \mid f(hgh^{-1}) = f(g) \forall g, h \in G\}$ prostor funkcij na G , ki so konstantne na konjugiranostnih razredih. Elemente \mathcal{H}_G imenujemo *razredne funkcije*.

Vemo: Karakterji nerazcepnih upodobitev grupe G tvorijo ortonormiran sistem v \mathcal{H}_G .

Trditev:

Karakterji nerazcepnih upodobitev grupe G tvorijo ortonormirano bazo v \mathcal{H}_G . Posebej je število nerazcepnih upodobitev za G enako številu konjugiranostnih razredov v G .

Dokaz: Dovolj je pokazati, da je razredna funkcija, ki je ortogonalna na vse karakterje NNU ničelna.

Ideja: Uporabimo regularno upodobitev (ki vsebuje vse nerazcepne) in na tej konstruiramo linearno preslikavo, ki je ekvivariantna in določena z izbrano razredno funkcijo. Za to preslikavo uporabimo Schurovo lemo (to je vse kar imamo).

Naj bo f razredna funkcija, $\langle f, \chi_i \rangle = 0$ za vsako NNU W_i , s karakterjem χ_i . Naj bo V_G regularna upodobitev, tj. baza za $V_G = \{v_g \mid g \in G\}$ in delovanje je $hv_g = v_{hg}$. Definirajmo

$$F : V_G \rightarrow V_G; F = \sum_{g \in G} \overline{f(g)} g,$$

kjer smo povprečili po g , da dobimo ekvivariantnost. Res:

$$\begin{aligned} \forall h \in G : F \circ h &= h \circ F \\ F \circ h &= \sum_{g \in G} \overline{f(g)} gh = \sum_{g' \in G} \overline{f(g'h^{-1})} (hh^{-1}) g' \\ &= h \sum_{g' \in G} \overline{f(g'h^{-1})} h^{-1} g' = h \sum_{g'' \in G} \overline{f(hg''h^{-1})} g'' \\ &= h \sum_{g \in G} \overline{f(g)} g = h \circ F. \end{aligned}$$

$F : V_G \rightarrow V_G$ je invariantna linearna preslikava. Po Schurovi lemi je $F = \lambda I$, $\lambda \in \mathbb{C}$. Potem je

$$\text{tr}(F) = \lambda|G|,$$

kjer pa sedaj upoštevamo linearnost sledi

$$\lambda|G| = \sum_{g \in G} \overline{f(g)} \text{tr}(g),$$

sled pa lahko zapišemo kot $\chi_G(g) = \sum_{i=1}^n n_i \chi_i(g)$, kar je karakter regularne upodobitve. Ta je skalar, kar pomeni

$$\text{tr}(F) = \sum_{i=1}^n n_i \overbrace{\sum_{g \in G} \overline{f(g)} \chi_i(g)}^{|G| \langle \chi \rangle = 0},$$

to pa pomeni, da je $\lambda = 0$ in s tem tudi $F = 0$. Zato je za v_e , $e \in G$ identiteta:

$$0 = F(e) = \sum_{g \in G} \overline{f(g)} g v_e = \sum_{g \in G} \overline{f(g)} v_g,$$

kjer v_g po definiciji sestavljajo bazo \Rightarrow so linearno neodvisni, vsota pa je $0 \Rightarrow f(g) = 0 \forall g$.

■

Zgled:

Poišči vse nerazcepne upodobitve S_3 .

Rešitev: Moč grupe je $|S_3| = 3! = 6$, tj. ima največ 6 NNU. Elementi so (izkaže se sicer $S_3 \cong D_3$, vendar samo za diedersko grupo reda 3, za druge to ne velja)

$$S_3 = \{e, (12), (13), (23), (123), (132)\} = \langle x, y \mid x^3, y^2, xy = yx^2 \rangle = \{e, x, x^2, y, yx, yx^2\}.$$

Imamo največ 6 NNU, ki so 1-D. Dve že poznamo, kot upodobitve abelacije:

$$\text{ab}(S_3) = \text{ab}(D_3) = [x, y \mid x = 0, 2y = 0] = [y \mid 2y = 0] \cong C_2,$$

torej sta to identična in trivialna upodobitev, kot pri C_2 . Dimenzije preostalih lahko napovemo:

$$6 = 1 + 1 + \sum_{i=3}^m n_i^2 \Rightarrow \begin{cases} 4 \times 1\text{-D upodobitve} \\ 1 \times 2\text{-D upodobitev} \end{cases}$$

Sicer smo v resnici z abelacjo zajeli vse 1-D upodobitve, vendar lahko to preverimo še na en način: iz števila konjugiranostnih razredov lahko preberemo število NNU. Razredi so: $\{e\}$, $\{x, x^2\}$, $\{y, yx, yx^2\}$. Zaradi posledice ortogonalnosti v Schurovi lemi, je število konjugiranostnih razredov enako številu NNU. Torej imamo največ 3 NNU. Preostane nam torej še ena 2-D,

$$\varphi_3 : S_3 \mapsto GL_2(\mathbb{C}), \quad \dim_{\mathbb{C}} \mathbb{C}^2 = n_3 = 2.$$

Lahko izračunamo njen karakter (glej tabelo karakterjev 3.2)

Tabela 3.1: Tabela karakterjev grupe S_3 . χ_3 je neznan, zato manjka. Števila v oklepaju so moči elementov v posameznem razredu, saj daje iste karakterje.

	$e(1)$	$x(2)$	$y(3)$	n_i
χ_1	1	1	1	1
χ_2	1	1	-1	1
χ_3	2	*	*	2
χ_{S_3}	6	0	0	6

Iz dimenzij NNU in po definiciji regularne upodobitve vemo $V_{S_3} = V_1 \oplus V_2 \oplus 2V_3$, tj $\chi_{S_3} = \chi_1 + \chi_2 + 2\chi_3$, od koder lahko izračunamo

$$\chi_3 = \frac{1}{2}(\chi_{S_3} - \chi_1 - \chi_2),$$

s čimer dopolnimo tabelo do

	$e(1)$	$x(2)$	$y(3)$	n_i
χ_3	2	-1	0	2

Poskusimo uganiti upodobitev φ_3 , $\varphi_3 : S_3 \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(\mathbb{C}^2) \subseteq \mathbb{C}^{2 \times 2}$. Ker je φ_3 homomorfizem grup, ga je dovolj opisati na generatorjih, pri tem morajo biti za slike izpolnjene relacije v grupi

$$x^3 = e, \quad y^2 = e, \quad yx = x^2y,$$

iz karakterja poznamo še sledi teh matrik:

$$\begin{aligned} x : \chi_3(x) &= -1 = \text{tr}(\varphi_3(x)), \\ y : \chi_3(y) &= 0 = \text{tr}(\varphi_3(y)). \end{aligned}$$

Uganemo:

$$\varphi_3(x) = \begin{bmatrix} e^{2i\pi/3} & 0 \\ 0 & e^{-2i\pi/3} \end{bmatrix}, \quad \varphi_3(y) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Kontrola: $\text{tr}(\varphi(x)) = 2 \cos(2i\pi/3) = -1$. Preveriti moramo še tretjo relacijo:

$$\begin{aligned} \varphi_3(yx) &= \varphi_3(y)\varphi_3(x) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{2i\pi/3} & 0 \\ 0 & e^{-2i\pi/3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & e^{-2i\pi/3} \\ e^{2i\pi/3} & 0 \end{bmatrix} \\ \varphi_3(x^2y) &= \varphi(x^2)\varphi(y) = \begin{bmatrix} e^{-2i\pi/3} & 0 \\ 0 & e^{2i\pi/3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & e^{-2i\pi/3} \\ e^{2i\pi/3} & 0 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

torej je res $yx = x^2y$.

Zgled:

Naj bo V_G regularna upodobitev grupe G . Poišči bazo za trivialno podupodobitev. [*Trivialna upodobitev je tista, kjer g deluje kot identiteta: $\varphi_1 : G \rightarrow \mathbb{C}^*$, $g \mapsto 1$.*]

Rešitev: Ker je ta dimenzije 1, je njena večkratnost 1. Baza za $V_G = \{v_g \mid g \in G\}$. Poiskati moramo tak $0 \neq w = \sum_{g \in G} \lambda_g v_g$, da je $hw = w, \forall h \in G$. Vzamemo lahko

$$w = \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} g,$$

ta zadošča in je do skalarne večkratnika edina možnost (ker je to 1-D podprostor).

3.3 Lastnosti upodobitev

Trditev:

Grupa G je abelova \iff vse nerazcepne upodobitve so 1-D.

Dokaz: Naj bo m število nerazcepnih upodobitev za G ,

$$|G| = \sum_{i=1}^m n_i^2; \quad n_i = \dim W_i,$$

kjer je W_i i -ta NNU.

(\Rightarrow) Če je $|G|$ abelova, je vsak element svoj konjugiranostni razred: $C_g = \{ghg^{-1}\} = \{ghh^{-1}\} = \{g\}$
 \Rightarrow število nerazcepnih upodobitev = število elementov (število konj. razredov) = $|G|$. Od tod sledi

$$|G| = \sum_{i=1}^{|G|} n_i^2 \Rightarrow n_1 = 1 \quad \forall i.$$

(\Leftarrow) Če je $n_i = 1 \quad \forall i$, je $m = |G|$ in $m =$ št. konj. razr. elementov v G , torej j $C_g = g \quad \forall g \in G$, kar pomeni, da je $ghg^{-1} = g \quad \forall g, h \in G$. Potem velja $hg = gh \quad \forall g, h \in G \Rightarrow$ je abelova.

■

Posledica:

Naj bo $A \leq G$ abelova podgrupa. Potem je dimenzija vsake nerazcepne upodobitve grupe

$$G \leq [G : A] = \frac{|G|}{|A|}.$$

Dokaz: Naj bo V nerazcepna upodobitev za G , torej je dan $\varphi : G \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(V)$. Če φ zožimo na A dobimo upodobitev $\varphi_A : A \rightarrow GL_{\mathbb{C}}(V)$. Sedaj je φ_A upodobitev abelove grupe, zato V razpade na nerazcepne 1-D upodobitve grupe A .

Naj bo $W \leq V$ nerazcepna podupodobitev za A , $\dim_{\mathbb{C}} W = 1$.

- Oglejmo si vektorski prostor $V' \leq V$, ki ga razpenjajo vektorji v, $GW = \{gw \mid g \in G, w \in W\}$. V' je torej množica vseh linearnih kombinacij

$$\sum_{g \in G} \lambda_g gw_0,$$

kjer je $w_0 \in W$ baza, $\lambda_g \in \mathbb{C}$. V' je G -invarianten podprostor, saj $\forall h \in G$ velja:

$$h \sum_{g \in G} \lambda_g gw_0 = \sum_{g \in G} \lambda_g hgw_0 = \dots \sum_{g' \in G} \lambda_{h^{-1}g'} g'w_0 \in V.$$

Ker je V nerazcepna za G , je $V' = V$, saj ne more biti manjši.

- Preštejmo linearno neodvisne vektorje v $V' = V$: ker je $A \leq G$ indeksa $k = [G : A]$, je $G = g_1A \cup g_2A \cup \dots \cup g_kA$ za neke $g_1, g_2, \dots, g_k \in G$. Poljuben $g \in G$ je oblike $g = g_ia$, za nek i in nek $a \in A$. Ker je W 1-D upodobitev za A , je $aw_0 = \mu_a w_0 \forall a \in A$. Zato je $gw_0 = g_iaw_0 = \mu_a g_i w_0$, torej iz vektorjev gw_0 dobimo kot različne kvečjemu vektorje $g_1w_0, g_2w_0, \dots, g_kw_0$: število linearnih neodvisnih vektorjev je torej največ $k = [G : A] \Rightarrow \dim V \leq k = [G : A]$.

■

Zgled:

Določi možne dimenzije upodobitev diederske grupe D_n .

Rešitev: $|D_n| = 2n$, $D_n = \langle x, y \mid x^n, y^2, yx = x^{n-1}y \rangle$.

- Ni abelova \Rightarrow vsaj ena nerazcepna upodobitev dimenzije > 1 .
- Po posledici je zgornja meja za dimenzijo NNU indeks abelove podgrupe v D_n . V D_n imamo ciklično podgrupo C_n moči n , njen indeks je očitno 2 ($[D_n : C_n] = 2n/n = 2$). Potem je največja dimenzija nerazcepne upodobitve 2.

Vaja: [Domača naloga] Napišimo vse te upodobitve.

Trditev:

Naj bosta $\varphi : G \rightarrow GL(V)$ in $\psi : H \rightarrow GL(W)$ upodobitvi za njun tenzorski produkt, definiran kot

$$\begin{aligned} \varphi \otimes \psi : G \times H &\rightarrow GL(V \otimes W), \\ (\varphi \otimes \psi)(g, h)(v \otimes w) &\mapsto \varphi(g)v \otimes \psi(h)w, \end{aligned}$$

velja:

1. Če sta φ in ψ nerazcepni, je tudi $\varphi \otimes \psi$ nerazcepna upodobitev $G \times H$.
2. Vsaka NNU za $G \times H$ je zgornje oblike.

Dokaz:

1. Karakter upodobitve ima normo 1 \iff upodobitev je nerazcepna (drugače je $\chi = \sum_{i=1}^n m_i \chi_i$; $\|\chi\|^2 = \sum_{i=1}^n m_i^2 \geq 1$).

$$\begin{aligned} \chi_\varphi : G &\rightarrow \mathbb{C}, \\ g &\mapsto \text{tr}(g : V \rightarrow V), \end{aligned}$$

za χ_ψ velja podobno. Za njun tenzorski produkt pa lahko zapišemo

$$\begin{aligned} \chi_{\varphi \otimes \psi} : G \times H &\rightarrow \mathbb{C}, \\ g, h &\mapsto \text{tr}(g \otimes h : V \otimes W \rightarrow V \otimes W), \end{aligned}$$

Če je $\{v_i\}$ baza za V in $\{w_j\}$ baza za W , je $\{v_i \otimes w_j\}$ baza za $V \otimes W$. Zanima nas koeficient pri $\{v_i \otimes w_j\}$ v $gv_i \otimes hw_j$, ta pa je produkt diagonalnih elementov $g_{ii}h_{jj}$,

$$\chi(g, h) = \sum_{i,j} g_{ii}h_{jj} = \sum_i g_{ii} \sum_j h_{jj} = \chi_\varphi(g) \cdot \chi_\psi(h),$$

$$\begin{aligned}
\|\chi\|^2 &= \frac{1}{|G \times H|} \sum_{g,h} |\chi(g,h)|^2 \\
&= \frac{1}{|G||H|} \sum_{g,h} |\chi_\varphi(g)|^2 \cdot |\chi_\psi(h)|^2 \\
&= \left(\frac{1}{|G|} \sum_g |\chi_\varphi(g)|^2 \right) \left(\frac{1}{|H|} \sum_h |\chi_\psi(h)|^2 \right) = \|\chi_\varphi\|^2 \cdot \|\chi_\psi\|^2 = 1.
\end{aligned}$$

Norma karakterja te upodobitve je 1, torej je ta upodobitev nerazcepna.

2. Vemo:

$$\begin{aligned}
|G| &= \sum_{i=1}^k n_i^2, \quad n_i = \dim V_i, \quad i = 1, \dots, k, \{V_i\} \text{ vse NNU za } G, \\
|H| &= \sum_{j=1}^\ell m_j^2, \quad \text{analogno temu zgoraj.}
\end{aligned}$$

$V_i \otimes W_j$ so nerazcepne za $G \times H$ dimenzije $n_i \times m_j$,

$$\sum_{i,j} (n_i m_j)^2 = \sum_i n_i^2 \sum_j m_j^2 = |G| \cdot |H| = |G \times H|.$$

\Rightarrow to so vse nerazcepne upodobitve.

■

Zgled:

Tenzorski produkt nerazcepnih upodobitev grupe G ni nujno nerazcepna upodobitev grupe G (nujno je nerazcepna za $G \times G$). $G \equiv G \times \{e\}$.

Rešitev: $G = S_3$, $V_3 = 2$ -D nerazcepna upodobitev za S_3 . $W = V_3 \otimes V_3$, ki je upodobitev za diagonalno delovanje g , $g(v \otimes w) = gv \otimes gw$, $\dim W = 2 \cdot 2 = 4$, edine nerazcepne upodobitve za S_3 pa so dimenzij 1 in 2. Glej tab. 3.2.

Tabela 3.2: Tabela karakterjev s χ_W vred, kjer $\chi_W = V_3 \otimes V_3$, tj. $\chi_W = \chi_3^2$. Števila v oklepaju so moči posameznih konj. razr.

	e (1)	x (2)	y (3)
χ_1	1	1	1
χ_2	1	1	-1
χ_3	2	-1	0
χ_W	4	1	0

Dekompozicijo W na nerazcepne dobimo z $\langle \chi_W, \chi \rangle$ za $i = 1, 2, 3$.

$$\langle \chi_W, \chi_1 \rangle = \frac{1}{6} (1 \cdot 4 + 2 \cdot 1 + 3 \cdot 0) = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = 1.$$

To je navaden skalarni produkt, normiran s številom elementov grupe, matrika vmes je pa matrika

uteži, ki so enake moči posameznih konj. razredov, saj se vsak karakter tolikokrat ponovi.

$$\langle \chi_W, \chi_2 \rangle = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 2 & \\ & & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} = 1,$$

$$\langle \chi_W, \chi_3 \rangle = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & & \\ & 2 & \\ & & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} = 1.$$

Vidimo $W = V_3 \otimes V_3 = V_1 \oplus V_2 \oplus V_3$.

Zgled:

Naj bo G abelova grupa in naj bo \hat{G} množica karakterjev NNU za G . Pokaži, da je \hat{G} grupa za množenje funkcij po točkah in določi $|\hat{G}|$ (komentar: $\hat{\hat{G}}$ je dualna grupa).

Rešitev:

- G ima $|G|$ 1-D upodobitev,
- produkt karakterjev je karakter tenzorskega produkta,
- tenzorski produkt 1-D prostorov je spet 1-D prostor.
- $\chi_1, \chi_2 \in \hat{G} \Rightarrow \chi_1 \chi_2 \in \hat{G}$. Vemo: $\chi_1 \cdot \chi_2$ je karakter tenzorskega produkta upodobitev V_1 in V_2 . Ker sta V_1 in V_2 nerazcepni z dimenzijo 1, je tudi $V_1 \otimes V_2$ 1-D vektorski prostor in zato je upodobitev nerazcepna.
- Identiteta: $\chi = 1$ je karakter trivialne upodobitve.
- Inverz: za dani $\chi \in \hat{G}$ ke inverz z operacijo množenja po točkah funkcija

$$\psi : \chi(g)\psi(g) = 1 \quad \forall g \in G$$

$$\psi(g) = \frac{1}{\chi(g)} \quad \forall g \in G.$$

Ali je to dobro definirano? Da, $\chi(g) = \text{tr}(\lambda \in GL(\mathbb{C}) = \mathbb{C}^*) \neq 0$. Je ψ res karakter upodobitve? Velja še več, slika φ oz. χ leži na enotski krožnici

$$\frac{1}{\chi(g)} \text{ spet na enotski krožnici,}$$

$1/\chi(g) = \overline{\chi(g)} = \psi(g)$. Za upodobitev vzamemo $\overline{\varphi}$ Če je $\varphi : G \rightarrow \mathbb{C}^*$ homomorfizem, je tudi $\overline{\varphi} : G \rightarrow \mathbb{C}^*$, ker je

$$\overline{\varphi(gh)} = \overline{\varphi(g)\varphi(h)} = \overline{\varphi(g)} \cdot \overline{\varphi(h)}.$$

Moč $|\hat{G}| = |G|$, ker je ravno toliko 1-D NNU.

Zgled:

Pokaži $\hat{\hat{G}} \cong G$ (to je res samo za končne grupe).

Del II

Gladke mnogoterosti

Poglavje 4

Osnovni pojmi

Ideja: Mnogoterost je metrični prostor, ki lokalno (v okolici vsake točke) izgleda kot nek evklidski prostor \mathbb{R}^n , n imenujemo dimenzija mnogoterosti. Mnogoterost je metrični prostor, ki lokalno (v okolici vsake točke) izgleda kot nek evklidski prostor \mathbb{R}^n , n imenujemo dimenzija mnogoterosti.

Primeri:

- Mnogoterost (mnt) 1-D:
 - S^1 (odprt interval, krožnica),
 - poljubna enostavna sklenjena krivulja,
 - poljubna odprta krivulja (krajšči se ne stikata).
- 2-D mnt:
 - 2-sfera (S^2): okolica točke je odprt disk, ki je v bistvu \mathbb{R}^2 ,
 - odprt, ali neskončen valj,
 - torus, tudi taki z več luknjami.

Definicija:

- $\mathbb{R}_+^n = \{x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n \mid x_n \geq 0\}$ je *zgornji polprostor*.
- *Ekvivalenca* metričnih prostorov in njihovih podmnožic je zvezna bijekcija, ki ima zvezen inverz.

Definicija:

X, Y metrična prostora. $f : X \rightarrow Y$ je *homeomorfizem*, če je f zvezna in bijektivna in je tudi njen inverz, f^{-1} zvezna.

Primer: $f : [0, 2\pi) \rightarrow S^1$, $t \mapsto e^{it} = \cos t + i \sin t$ je zvezna in bijektivna, vendar pa f^{-1} ni zvezna v točki 1: točki e^{it} , $t > 0$ se slikajo blizu 0, ki je $f^{-1}(1)$, točke e^{it} , $t < 0$ pa blizu 2π , ki NI $f^{-1}(1)$.

Definicija:

n -mnt (n -mnogoterost) je metrični prostor M , v katerem $\forall x \in M$ obstaja odprta okolica V za x in homeomorfizem $\varphi : V \rightarrow V'$, kjer je V' odprta v \mathbb{R}_+^n .

Terminologija:

- V metričnem prostoru X je množica V odprta, če je unija odprtih krogel.
- Metrika je $d : X \times X \rightarrow \mathbb{R}$ in je nenegativna.
- Odprta krogla v metriki d okoli točke x s polmerom r je $K_d(x, r) = \{y \in X \mid d(x, y) < r\}$. Posebej v evklidski metriki, je odprta krogla res odprta krogla (dejansko tako izgleda).
- Odprte krogle v \mathbb{R}_+^n z evklidsko metriko so odprte krogle v \mathbb{R}^n , presekane z \mathbb{R}_+^n (tj. so odprte vsepovsod, vendar imajo lahko zravnani spodnji rob, ker je $x_n = 0$ v \mathbb{R}^n , se pravi, če so preblizu roba \mathbb{R}_+^n).
- Odprta okolica za x je odprta množica (unija odprtih krogel), ki vsebuje x .

Definicija:

M mnogoterost, $x \in M$ točka in V odprta okolica točke x .

- Homeomorfizem $\varphi : V \rightarrow V'$, $V' \stackrel{\text{odp}}{\subseteq} \mathbb{R}_+^n$ imenujemo karta na M v x (iz krivega prostora M slikamo v evklidski (raven) prostor \mathbb{R}_+^n).
- Označimo s pr_i projekcijo na i -to koordinatno os. Karta porodi koordinatne funkcije na M v okolici x :

$$\text{pr}_i \circ \varphi : V \rightarrow V' \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}.$$

Ker je φ homeomorfizem, je njegov inverz zvezen in tega imenujemo lokalna parametrizacija M v okolici x .

- Točke, ki so slike točk z roba \mathbb{R}_+^n , tj. $\mathbb{R}^{n-1} \times \{0\}$ imenujemo robne točke mnogoterosti M , ostale pa notranje.

Primer: Zaprta krivulja brez presečišč, ki je slika nekega kompaktnega intervala je 1-mnt, katere rob sta končni točki, ostale so notranje.

Naš cilj so gladke mnogoterosti, razreda C^k , $k \in \mathbb{N}$. Naj bo $V \stackrel{\text{odp}}{\subseteq} \mathbb{R}^n$ in $f : V \rightarrow \mathbb{R}^m$.

$$f = (f_1, \dots, f_m); \quad f_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R},$$

se pravi

$$(x_1, \dots, x_n) \mapsto (f_1, \dots, f_m).$$

- f je razreda C^k , če je k -krat zvezno odveljiva na V , tj. če obstajajo vsi parcialni odvodi reda $\leq k$, vseh komponent f_i in so zvezni.

$$\frac{\partial^\ell f_i}{\partial x_{i_1} \partial x_{i_2} \dots \partial x_{i_\ell}}$$

je parcialni odvod reda ℓ , po spremenljivkah $x_{i_1} \dots x_{i_\ell}$.

- Pogoj zvezne parcialne odvedljivosti zagotavlja, da vrstni red odvajanja ni pomemben.

- Na parcialne odvode gledamo kot na operatorje

$$\frac{\partial}{\partial x_j} : C^k \rightarrow C^{k-1}$$

$$f \mapsto \frac{\partial f}{\partial x_j},$$

po zgornji opombi ti operatorji komutirajo.

Pojem ekvivalence, kot ga glede na zveznost določa homeomorfizem, razširimo v gladko kategorijo. Še vedno zahtevamo bijektivno preslikavo, ki je razreda C^k in tudi inverz je tak.

Definicija:

Naj bosta $U, V \stackrel{\text{odp}}{\subseteq} \mathbb{R}^n$. Potem je $f : U \rightarrow V$ *difeomorfizem* razreda C^k , če je bijektiven in $f, f^{-1} \in C^k$ ($k \in \mathbb{N}$).

Opomba: Difeomorfizem razreda C^k je torej homeomorfizem, ki je v obe smeri še k -krat odvedljiv.

Pogoj za C^k -difeomorfizem je težko preveriti, saj običajno ne znamo izračunati f^{-1} . Zato težko direktno preverjamo $f^{-1} \in C^k$. Pri tem nam pomaga izrek o inverzni preslikavi.

Naj bo $f : U \rightarrow V$ razreda C^k , $U \stackrel{\text{odp}}{\subseteq} \mathbb{R}^n$, $V \stackrel{\text{odp}}{\subseteq} \mathbb{R}^m$. Odvod preslikave f je dan z Jacobijevo matriko prvih parcialnih odvodov,

$$Jf(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \frac{\partial f_m}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

(slikamo iz $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, dimenzija matrike je $m \times n$, odvodi so izračunani v točki x). Matrika $Jf(x)$ predstavlja linearno preslikavo iz $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, ki jo imenujemo odvod preslikave f in označimo

$$Df(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$$

(to je tenzorsko polje: za vsak x imamo linearno preslikavo iz $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$). Skupaj to predstavlja

$$Df : U \rightarrow L(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m)$$

$$x \mapsto Df(x)$$

Trditev:

Izrek o inverzni preslikavi: [Brez dokaza.] Naj bo $U \stackrel{\text{odp}}{\subseteq} \mathbb{R}^n$ in $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$ razreda C^k , $a \in U$. Če je $Df(a)$ *linearni izomorfizem* (tj. $|Jf(a)| \neq 0$), potem je f lokalni difeomorfizem iz C^k v okolici točke a .

Z drugimi besedami \exists odprta okolica $V \subset U$ za a , da je

$$f|_V : V \rightarrow f(V)$$

difeomorfizem razreda C^k .

Posebej je odvod inverzne preslikave enak

$$D(f^{-1}) = \left(Df(f^{-1}(y)) \right)^{-1},$$

kjer

$$\begin{aligned} f(a) &= y \in f(U) \\ D(f^{-1})(f(a)) &= \left(Df(a) \right)^{-1}. \end{aligned}$$

Opomba: Iz formule za odvod sledi, da je $f^{-1} \in C^k$: Jakobijeva matrika za f vsebuje prve parcialne odvode f , ki so v C^{k-1} , zato je tudi $(Jf)^{-1}$ razreda C^{k-1} , če je le definiran; gotovo pa je definiran v neki okolici točke a saj je zaradi zveznosti determinante in Jf , $\det(Jf(x))$ zvezna in zato $\neq 0$ blizu $a \Rightarrow$ blizu a ima inverz.

Posledica:

Če je $f : U \rightarrow V$ homeomorfizem razreda C^k , potem je f C^k difeomorfizem \iff odvod $Df(x)$ je linearen izomorfizem $\forall x \in U$. (pogoj o linearnem izomorfizmu nam zagotovi obrnljivost matrike na celotnem definicijskem območju).

Cilj: Definirati pojem abstraktne gladke mnogoterosti (gld mnt) razreda C^k .

Definicija:

C^k podmnogoterost (podmnt) dimenzije n v \mathbb{R}^n je podmnožica $M \subseteq \mathbb{R}^m$, za katero velja $\forall x \in M \exists$ odp. okolica W za $x \in \mathbb{R}^m$ in C^k -difeomorfizem $h : W \rightarrow W'$, $W' \stackrel{\text{odp}}{\subseteq} \mathbb{R}^m$, da velja

$$h(W \cap M) \subseteq \mathbb{R}^n \times \{0^{m-n}\} \subseteq \mathbb{R}^m.$$

(slike ni).

Opomba:

- C^k -podmnt dimenzije n je očitno n -mnt,
- je metrični prostor z metriko v \mathbb{R}^m
- karte so zožitve $h|_{W \cap M} : W \cap M \rightarrow W' \cap (\mathbb{R}^n \times \{0^{m-n}\}) \subseteq \mathbb{R}^n$.

Primeri: C^k podmnt dobima na dva standardna načina:

1. Graf C^k preslikave: $V \stackrel{\text{odp}}{\subseteq} \mathbb{R}^n$ in $f : V \rightarrow \mathbb{R}^\ell$ razreda C^k .

$$\Gamma f = \{(x, f(x)) \mid x \in V\} \subseteq V \times \mathbb{R}^\ell \subseteq \mathbb{R}^{n+\ell},$$

(graf preslikave f) je C^k -podmnt v $\mathbb{R}^{n+\ell}$ dimenzije n . Preslikava $f \in C^k$, zato je tudi $h \in C^k$. Vzamemo $W = V \times \mathbb{R}^\ell = W'$

$$\left. \begin{aligned} h : W &\rightarrow W' \\ (x, y) &\mapsto (x, y - f(x)) \end{aligned} \right\} \text{ graf preslika na } V \times \{0^\ell\}.$$

Napisati znamo tudi inverz:

$$h^{-1} : W' \rightarrow W,$$

$$(x, y) \mapsto (x, y + f(x)),$$

h je torej C^k -difeo, ki Γf zravna na $W' \cap \mathbb{R}^n = V$ (ničle pozabimo). Projekcija $(x, y) \mapsto x$ je globalna karta za n -mnt, njen inverz pa je globalna parametrizacija $x \mapsto (x, f(x))$.

2. Nivojska množica gladke preslikave: Naj bo $g : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^\ell$ razreda C^k . Izberimo $a \in \mathbb{R}^\ell$; zanima nas, pod kakšnimi pogoji je $g^{-1}(a) = \{x \in \mathbb{R}^m \mid g(x) = a\}$ C^k -podmnt v \mathbb{R}^m in kolikšna je dimenzija te podmnt. Odgovor da izrek o implicitni preslikavi.

Trditev:

Izrek o implicitni preslikavi: [Brez dokaza.] Naj bo

$$g : \underbrace{\mathbb{R}^{n+\ell}}_{\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^\ell} \rightarrow \mathbb{R}^\ell$$

razreda C^k , $k \in \mathbb{N}$, naj bo $a \in \mathbb{R}^\ell$ in in $(b, c) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^\ell$, $g(b, c) = a$, tj. $(b, c) \in g^{-1}(a)$. Če označimo koordinate v $\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^\ell$ kot $(x, y) = (x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_\ell)$ in velja

$$J_y g(b, c) = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial y_1}(b, c) & \frac{\partial g_1}{\partial y_2}(b, c) & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial y_\ell}(b, c) \\ \frac{\partial g_2}{\partial y_1}(b, c) & \frac{\partial g_2}{\partial y_2}(b, c) & \dots & \frac{\partial g_2}{\partial y_\ell}(b, c) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial g_\ell}{\partial y_1}(b, c) & \frac{\partial g_\ell}{\partial y_2}(b, c) & \dots & \frac{\partial g_\ell}{\partial y_\ell}(b, c) \end{bmatrix}$$

ni singularna ($\det J_y g(b, c) \neq 0$), potem obstajata odprti okolici V za b v \mathbb{R}^n in W za c v \mathbb{R}^ℓ ter preslikava $h : V \rightarrow W$ razreda C^k , za katero velja:

- $h(b) = c$,
- za $(x, y) \in V \times W$ velja $g(x, y) = a \iff y = h(x)$.

Opomba: Zgornje pomeni, da je v okolici točke (b, c) nivojska množica $g^{-1}(a)$ enaka grafu preslikave h .

Posledica:

Naj bo $g : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^\ell$ C^k preslikava ($m = n + \ell > \ell$), $a \in \mathbb{R}^\ell$. Če je v vsaki točki $x \in g^{-1}(a)$ Jacobijeva matrika $Jg(x)$ ranga ℓ , potem je nivojska množica $g^{-1}(a)$ C^k -podmnt v \mathbb{R}^m dimenzije $m - \ell$ (ker je v vsaki točki gra neke C^k preslikave; spremenimo koordinatni sistem).

Dokaz: Izberimo točko $d \in g^{-1}(a)$. Po predpostavki je $Jg(a)$ matrika ranga ℓ . Velikost matrike je

$$\dim Jg(a) = \dim \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_m} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_\ell}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_\ell}{\partial x_m} \end{bmatrix} = \ell \times m.$$

Rang ℓ pomeni, da matrika vsebuje ℓ linerno neodvisnih stolpcev, tiste stolpce lahko zberemo na koncu (na zadnjih ℓ mestih), tako da preimenujemo koordinate. Sedaj $\ell \times \ell$ podmatrika (iz zadnjih ℓ stolpcev)

v $Jg(a)$ izpolnjuje pogoje izreka \Rightarrow v okolici točke d je $g^{-1}(a)$ graf neke preslikave $\mathbb{R}^{m-\ell} \rightarrow \mathbb{R}^\ell$, torej C^k -podmnt dimenzije $m - \ell$ v \mathbb{R}^m . ■

Definicija:

- $g : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^\ell$ razreda C^k ; točka $x \in \mathbb{R}^m$ je *regularna*, če je $Dg(x)$ surjektivna preslikava ($m > \ell$, preslikava je surjektivna \iff rang maskimalen) tj. $\text{rang } Jg(x) = \ell$.
- Točka $a \in \mathbb{R}^\ell$ je *regularna vrednost* za g , če je vsak $x \in g^{-1}(a)$ regularna točka.

Opomba: prasluka regularne vrednosti je x ; $x \in g^{-1}(a)$. V tem jeziku prejšnja posledica pravi, da je prasluka (tj. vsi x) regularne vrednosti (to je a) C^k preslikave $g : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^\ell$ C^k -podmnt v \mathbb{R}^m dimenzije $m - \ell$ (če je neprazna).

Sedaj želimo definirati abstraktno gladko mnogoterost, ki ni vložena v evklidski prostor. Če je M mnt dim. n , ima vsak $x \in M$ odprto okolico, ki je homeomorfna odprti množici \mathbb{R}^n .

Ideja: Radi bi, da bi bila karta C^k preslikava. Ampak na M nimamo koordinat, niti ne znamo odvajati. TO torej ne gre, lahko pa primerjamo različne karte: Imamo npr. točko $x \in M$ z odprto okolico V in točko $y \in M$ ($x \neq y$) z okolico W , tako da $V \cap W \neq \{\}$. Ti okolici opremimo s kartama

$$\begin{aligned}\varphi : V &\rightarrow V', \\ \psi : W &\rightarrow W',\end{aligned}$$

preseka $V \cap W$ se vidi v V' kot $\varphi(V \cap W)$ in v W' kot $\psi(V \cap W)$. Med tema dvema imamo neko preslikavo. Pravimo, da karti φ in ψ določata prehodno preslikavo

$$\psi \circ \varphi^{-1}|_{\varphi(V \cap W)} : \underbrace{\varphi(V \cap W)}_{\subseteq \mathbb{R}^n} \rightarrow \underbrace{\psi(V \cap W)}_{\subseteq \mathbb{R}^n}.$$

Pogoj odvedljivosti na mnt „zakodiramo“ v odvedljivost prehodne preslikave.

Definicija:

Gladka struktura na mnogoterosti:

- Naj bo M neka n -mnt, $k \in \mathbb{N}$, Λ je množica indeskov. *Atlas* razreda C^k na M je družina kart na M , $\{(v_\lambda, \varphi_\lambda) \mid \lambda \in \Lambda\}$, kjer so $V_\lambda \overset{\text{odp}}{\subseteq} M$,

$$\bigcup_{\lambda \in \Lambda} V_\lambda = M,$$

in $\varphi_\lambda : \overset{\text{homeo}}{\longrightarrow} V'_\lambda \subseteq \mathbb{R}^n$ je karta na M , poleg tega pa za poljubna $\lambda, \mu \in \Lambda$ velja: če je $V_\lambda \cap V_\mu \neq \{\}$, potem je prehodna preslikava

$$\varphi_\mu \circ \varphi_\lambda^{-1} : \varphi_\lambda(V_\lambda \cap V_\mu) \rightarrow \varphi_\mu(V_\lambda \cap V_\mu)$$

C^k -difeo. To označimo tudi kot

$$\left. \begin{aligned} V_\lambda \cap V_\mu &= V_{\lambda\mu} \\ \varphi_\mu \circ \varphi_\lambda^{-1} &= \varphi_{\mu\lambda} \end{aligned} \right\} \varphi_{\mu\lambda} : \varphi_\lambda(V_{\lambda\mu}) \rightarrow \varphi_\mu(V_{\lambda\mu}).$$

- Dva C^k -atlasa sta (imate različne karte na mnogoterosti) kompatibilna ali ekvivalentna, če je tudi njuna unija C^k -atlas.
- C^k -struktura na M je ekvivalenčni razred C^k -atlasov na M (je maksimalen C^k atlas, torej unija vseh kompatibilnih C^k atlasov na M).

Opomba: C^k -struktura (ali gladka struktura) je določena s poljubnim atlasom iz ekvivalenčnega razreda in običajno navedemo atlas s čim manj kartami. Tega pa lahko vedno dopolnimo do maksimalnega.

Zgled:

$M = \mathbb{R}^n$ (je n -mnt). Najmanjši možen atlas ima eno karto, ki je $h : M \rightarrow \mathbb{R}^n$, h homeomorfizem.

- Množica $\{h : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n\}$ je C^k -atlas:
 - \mathbb{R}^n pokriva $M = \mathbb{R}^n$,
 - kompatibilni pogo je izpolnjen, saj ni drugih kart.
- standardna C^k -struktura na \mathbb{R}^n je dana s karto $\{\text{id} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n\}$.
- Vzemimo $n = 1$: na \mathbb{R} obstajajo nekompatibilni (neekvivalentni) C^k -atlas zgornje oblike:
 - standardni: $\{\text{id} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}\}$
 - $h_0 : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$,

$$h_0(x) = \begin{cases} x, & x < 0 \\ 2x, & x \geq 0 \end{cases}$$

ni kompatibilen z identiteto, ker h_0 ni odvedljiv v točki 0. Prehodna preslikava je

$$h_0 \circ \text{id}^{-1} = h_0 \notin C^k$$

- $h_p : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, $h_p(x) = x^{2p+1}$, $p \in \mathbb{N}$. V tem primeru je h_p odvedljiv, inverz pa ne: $h_{p_1} \circ h_{p_2}$ ni razreda C^k . Tudi ti atlas dajo same paroma nekompatibilne C^k strukture (ker je $h'_p(0) = 0 \Rightarrow h_p^{-1}$ ni odvedljiv) \Rightarrow ni kompatibilen s standardno strukturo. Podobno sklepamo za ostale.

Zgled:

Vsaka odprta podmnožica gladke mnogoterosti je gladka mnogoterost (gladka mnogoterost v tem primeru pomeni, da zanjo obstaja atlas). Karte lahko presekamo/zožimo s to podmnožico, kar ne vpliva na gladkost prehodnih preslikav.

Npr. $GL_n(\mathbb{R})$ – obrnljive matrike dimenzije $n \times n$ so gladka mnogoterost dimenzije n^2 . $GL_n(\mathbb{R})$ je odprta podmnožica v $\mathbb{R}^{n \times n} = \mathbb{R}^{n^2}$, $GL_n(\mathbb{R})$ je tudi grupa in grupni operaciji (množenje in invertiranje) sta gladki preslikavi: to je primer *Liejeve grupe*.

Zgled:

Sfere $S^n = \{x \in \mathbb{R}^{n+1} \mid \|x\| = 1\}$ so gladke mnt, $\dim S^n = n$.

- $S^n \subset \mathbb{R}^{n+1}$ je gladka podmnt, $f : \mathbb{R}^{n+1} \rightarrow \mathbb{R}$, $f(x) = \|x\|^2$, tedaj $S^n = f^{-1}(1)$. Preveriti moramo, da je Jf ranga 1 v vsaki točki $Jf(x) = \nabla f(x) = 2x$ ima rang 1, ko $x \neq 0$. Amapak na sferi je to vedno res. Dimenzija je $n + 1 - 1 = n$.
- En atlas na S^n dobimo tako, da projekcije zožimo na hemisfere. Domene kart bodo odprte hemisfere $S^n_{i,\pm} = \{x = (x_1, \dots, x_{n+1}) \in S^n \mid x_i \gtrless 0\}$. Karta

$$\varphi_{i,\pm} : S^n_{i,\pm} \rightarrow \overset{\circ}{B}^n = \left\{x = (x_1, \dots, x_n), \sum_{j=1}^n x_j^2 < 1\right\},$$

slika v $\overset{\circ}{B}^n$, ki je odprta krogla okrog izhodišča v \mathbb{R}^n .

$$\varphi_{i,\pm}(x_1, \dots, x_{n+1}) = (x_1, \dots, x_{i-1}, x_i, x_{i+1}, \dots, x_{n+1}).$$

Ker je $\sum_j x_j^2 = 1$, je $\sum_{j \neq i} x_j^2 < 1 \Rightarrow$ to je v $\overset{\circ}{B}^n$. Da preverimo gladko kompatibilnost tega atlasa, moramo izračunati prehodne preslikave.

– inverzi kart:

$$\begin{aligned} \varphi_{i,\pm}^{-1} : \overset{\circ}{B}^n &\rightarrow S^n_{i,\pm} \\ (x_1, \dots, x_n) &\mapsto \left(x_1, \dots, x_{i-1}, \pm \sqrt{1 - \sum_{j=1}^n x_j^2}, x_i, \dots, x_n\right) \end{aligned}$$

– prehodne preslikave: $[\epsilon, \delta = \pm]$, $j < i$. Karta

$$\varphi_{j,\delta} \circ \varphi_{i,\epsilon}^{-1}(x_1, \dots, x_n) = \left(x_1, \dots, x_{i-1}, \epsilon \sqrt{1 - \sum_{k=1}^n x_k^2}, x_i, \dots, x_{j-1}, x_{j+1}, \dots, x_n\right)$$

je gladka v C^∞ (še več, realno analitična je – enaka Taylorjevi vrsti).

– Za \mathbb{R} funkcije (tj. funkcije realne spremenljivke) C^∞ ne implicira analitičnosti. Kot primer vzemimo

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ e^{-1/x}, & x > 0 \end{cases} \Rightarrow \text{vsi odvodi v } 0 \text{ so } 0,$$

torej je Taylorjeva vrsta v 0 ničelna (ker $f^{(n)}(0) = \forall n$), kljub temu, da f ni povsod 0.

- Zgornji atlas za S^n ima $2(n+1)$ kart. Še lepše je, če najdemo manjši atlas. Šamo dve karti potrebujemo, če uporabimo stereografsko projekcijo. Za karto z domeno $S^n \setminus \{N\}$, $N = (0, 0, \dots, 0, 1)$ (severni pol) je preslikava dana s pravilom, ki točki $p \in S^n \setminus \{N\}$ priredi presečišče premice skozi p in N z ekvatorialno ravnino $\mathbb{R}^n \times \{0\} \subseteq \mathbb{R}^{n+1}$. Točko $x \in \mathbb{R}^{n+1}$ lahko pišemo $x = (y, t)$, $y \in \mathbb{R}^n$, $t \in \mathbb{R}$. Iščemo formalno formulo za $\varphi(y, t) \in \mathbb{R}^n$. Smerni vektor premice je $p - N$, njena enačba je

$$N + s(p - N), \quad s \in \mathbb{R},$$

$$(0, 1) + s((y, t) - (0, 1)) = (sy, 1 + s(t - 1)).$$

Presečišče z „ravnino“ $\mathbb{R}^n \times \{0\}$ ustreza ničelni zadnji koordinati,

$$1 + s(t - 1) = 0, \quad s = \frac{1}{1 - t}, \quad \Rightarrow \varphi(y, t) = \frac{1}{1 - t} \cdot y.$$

Podobno za južni pol, le da je tam '1 + t'.

- Za prehodno preslikavo potrebujemo inverz (λz zaradi podobnih trikotnikov obdrži smer v dimenziji \mathbb{R}^n):

$$\begin{aligned}\varphi^{-1} : \mathbb{R}^n &\rightarrow S^n \setminus \{\mathbb{N}\} \\ \varphi^{-1}(z) &= (\lambda z, t), \quad \lambda \in \mathbb{R}\end{aligned}$$

– Mora biti na sferi: $t^2 + \lambda^2 \|z\|^2 = 1$.

– Mora biti na premici:

$$\begin{aligned}(\lambda z, t) &= (0, 1) + s((z, 0) - (0, 1)) \\ &= \underbrace{(sz, 1 - s)}_{\lambda=s, \quad t=1-\lambda} = (\lambda z, t)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}1 - 2\lambda + \lambda^2 + \lambda^2 \|z\|^2 &= 1 \quad / : \lambda \\ \lambda &= \frac{2}{1 + \|z\|^2}; \quad t = \frac{\|z\|^2 - 1}{\|z\|^2 + 1},\end{aligned}$$

kar pa nam na koncu vrne inverzno preslikavo

$$\varphi^{-1}(z) = \left(\frac{2z}{1 + \|z\|^2}, \frac{\|z\|^2 - 1}{\|z\|^2 + 1} \right)$$

- Dobljene karte in njihovi inverzi imajo za komponente realno-analitične funkcije, zato enako velja tudi za njihove kompozitume \Rightarrow prehodne preslikave so realno-analitične in zato $\in C^\infty$. Še več, atlasa določena s projekcijami na hemisferah in s stereografskima projekcijama sta tudi realno-analitična, kompatibilna, torej določata isto gladko strukturo na sferi S^n , to je standardna gladka struktura na S^n .

Definicija:

Naj bo M n -mnt razreda C^k in $f : M \rightarrow \mathbb{R}$. Rečemo, da je f C^k -funkcija, če je za vsako karto iz nekega atlasa M preslikava $f \circ \varphi^{-1} : V' \rightarrow \mathbb{R}$ razreda C^k (tj. ker smo na abstraktni mnogoterosti moramo začeti s karto).

Definicija:

Naj bosta M in N C^k -mnt dimenzije m oz. n . Preslikava $f : M \rightarrow N$ je razreda C^k , če je \forall karto $(\psi : W \rightarrow W')$ iz maksimalnega atlasa za N in $\forall (\varphi : V \rightarrow V')$ iz maks. atlasa za M za katero velja $f(V) \subseteq W$ preslikava

$$\psi \circ f \circ \varphi^{-1} : V' \rightarrow W'$$

razreda C^k med evklidskima prostoroma \mathbb{R}^n in \mathbb{R}^m (to mora veljati $\forall V \subseteq M$ in $\forall W \subseteq N$).

Definicija:

Homeomorfizem $f : M \rightarrow N$ je C^k -difeomorfizem, če sta f in f^{-1} razreda C^k .

Opomba: Pogoji za gladkost funkcije smo napisali glede na nek atlas (ne nujno maksimalni), saj za poljubni C^k kompatibilni karti $\varphi : V \rightarrow V'$ in $\psi : W \rightarrow W'$ na M velja:

$$\begin{aligned} f \circ \psi^{-1} &= (f \circ \psi^{-1}) \circ (\varphi \circ \psi^{-1}) \\ f \circ \varphi^{-1} &= (f \circ \psi^{-1}) \circ (\psi \circ \varphi^{-1}) \\ \text{je } \in C^k &\iff \text{je } \in C^k \end{aligned}$$

Opomba: C^k -odvedljivost je dobro definirana na odprtih podmnožicah v \mathbb{R}^n . Če gledamo orp. podmnožice v polprostoru \mathbb{R}_+^n ali bolj splošno množice, ki vsebujejo robne točke, pa odvedljivost v mejnih točkah definiramo tako, da zahtevamo, da je preslikavo mogoče razširiti do C^k -preslikave na okolici takšne točke.

Zgled:

Pokaži, da so vse gladke strukture (tj. vsi različni C^k -kompatibilni atlasi) v \mathbb{R}^n določene z eno karto $\{h : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n\}$, h homeomorfizem, med sabo difeomorfne (med njimi obstajajo C^k -difeomorfizmi) $\iff \exists$ difeomorfizem med standardno strukturo na \mathbb{R}^n in zgornjo.

Rešitev: Slike ni, zato bom opisal: imamo dve mnogoterosti: $M, N = \mathbb{R}^n$. M ima karto h na \mathbb{R}^n , N pa id. Katera preslikava slika Med M in N ? Ker sta oba \mathbb{R}^n lahko uporabimo spet kar h . Prehodna preslikava med slikami kart pa je potem $\text{id} \circ h \circ h^{-1} = \text{id}$. $\text{id} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ je homeomorfizem (njegov inverz prav tako), to je tisto. ■

Opomba:

- Na \mathbb{R}^n obstajata do difeomorfizma natančno ena gladka struktura za $n \neq 4$ (lahko z več kartami zgoraj z 1 karto)
- Na \mathbb{R}^4 obstajata neštevno nedifeomorfnih gladkih struktur. Dokaz se uporablja v Yang-Millsovi teoriji polja (kvantna teorija polja – masivna vektorska polja, kot npr QCD).
- Na S^n je največ končno mnogo gladkih struktur, ki niso difeomorfne standardni. Na S^4 ni znano koliko jih je (domneva se, da je 1). Prva sfera z znanimi večimi nedifeomorfnimi gladkimi strukturami je S^7 , ki jih ima 28.
- Za $n \geq 4$ na mnt dimenzije n ne obstaja nujno gladka struktura!

Poglavje 5

Tangentni sveženj mnogoterosti

Definicija:

Tangentni prostor na \mathbb{R}^n : za vsako točko $p \in \mathbb{R}^n$ je tangentni prostor na \mathbb{R}^n v p

$$T_p \mathbb{R}^n \equiv \mathbb{R}^n.$$

$T_p \mathbb{R}^n$ je prostor vseh hitrosnih (tangentnih) vektorjev poti v p .

$$\gamma : J \rightarrow \mathbb{R}^n, \quad \gamma \in C^1,$$

J je interval, $0 \in J$, γ pa je pot. Točka v kateri gledamo je $\gamma(0) = p$, tangentni vektor pa je potem $\dot{\gamma}(0) = v$.

Kak pomen še lahko damo tangentnemu vektorju? Naj bo $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ funkcija na \mathbb{R}^n , definirana v okolici U točke p .a Kompozitum $f \circ \gamma : J \rightarrow \mathbb{R}$ ima odvod

$$(f \circ \gamma)'(0) = \left. \frac{d}{dt} \right|_{t=0} (f \circ \gamma) \in \mathbb{R}.$$

Kaj je pomen tega števila?

$$\left. \frac{d}{dt} (f \circ \gamma) \right|_{t=0} = \nabla f(\gamma(t)) \cdot \dot{\gamma}(t) \Big|_{t=0} = \nabla f(p) \cdot \dot{\gamma}(0) = \nabla f(p) \cdot v,$$

kar pa je smerni odvod f v p v smeri tangentnega vektorja v . Posebej za $\gamma_i(t) = (0, \dots, 0, t, 0, \dots, 0)$ dobimo $\dot{\gamma}_i(t) = e_i$ in

$$\left. \frac{d}{dt} (f \circ \gamma)(t) \right|_{t=0} = \frac{\partial f}{\partial x_i}(p) = \left. \frac{\partial}{\partial x_i} \right|_{x=p} f.$$

Tangentni vektor e_i enačimo z operatorjem odvajanja $\left. \frac{\partial}{\partial x_i} \right|_p = \partial_i|_p$. Baza za $T_p \mathbb{R}^n = \{\partial_1|_p, \dots, \partial_n|_p\}$ in poljuben tangentni vektor

$$v = \sum_{i=1}^n v_i \partial_i|_p \equiv (v_1, \dots, v_n)$$

predstavlja smerni odvod vzdolž (v_1, \dots, v_n) . Pišemo

$$v(f) = \sum_{i=1}^n v_i \partial_i f(p).$$

Tako dobimo za $T_p \mathbb{R}^n$ množico diferencialnih operatorjev prvega reda, ki so linearni in zadoščajo Leibnizovemu pravilu za odvod produkta

$$v(f \cdot g) = v(f) \cdot g(p) + f(p) \cdot v(g).$$

To je očitno res, saj je v (linearni) operator odvajanja (po definiciji).

Definicija:

Operator $A : C^1(U) \rightarrow \mathbb{R}$, ki je linearen in zadošča Leibnizovi formuli, imenujemo *derivacija* pri $p \in U$, $U \stackrel{\text{odp}}{\subseteq} \mathbb{R}^n$.

Trditev:

Derivacije iz $C^\infty(U) \rightarrow \mathbb{R}$ pri $p \in U$ so v bijektivni korespondenci s tangentnimi vektorji pri p na \mathbb{R}^n .

Dokaz: [Ideja:] Videli smo, da vsak tangentni vektor določa derivacijo, to je smerni odvod. Pokazati moramo, da vsaka derivacija enolično določa tangentni vektor in je enaka smernemu odvodu vzdolž tega vektorja.

Naj bo $A : C^\infty(U) \rightarrow \mathbb{R}$ derivacija pri p . Vzemimo $f_i(x) = x_i$ (projekcija na i -to koordinato) in označimo $v_i = A(f_i)$. Trdimo, da A ustreza smerni odvod vzdolž $v = \sum_i v_i \partial_i|_p$. Pokazati moramo, da za poljubno funkcijo f velja $A(f) = v(f) \forall f, f \in C^\infty$.

Pišemo $f(x) = f(p) + g(x)$, $g(p) = 0$. Funkcijo g lahko zapišemo kot vsoto funkcij, kjer je vsaka pomnožena z $(x_i - p_i)$ za nek i .

$$\begin{aligned} g(x) &= g(x) - g(p) = g(p + t(x - p)) \Big|_{t=0}^{t=1} = \int_0^1 \frac{d}{dt} (g(p + t(x - p))) dt \\ &= \int_0^1 \sum_{i=1}^n \frac{\partial g}{\partial x_i} (p + t(x - p)) \cdot (x_i - p_i) dt = \\ &= \sum_{i=1}^n (x_i - p_i) \underbrace{\int_0^1 \frac{\partial g}{\partial x_i} (p + t(x - p)) dt}_{g_i(x) \in C^\infty(U)} = \sum_{i=1}^n (x_i - p_i) g_i(x) \\ &\Rightarrow f(x) = f(p) + \sum_{i=1}^n (x_i - p_i) g_i(x). \end{aligned}$$

- Preverimo, da je $A(\text{konst}) = 0$, tj. da je derivacija konstantne funkcije enaka 0. A je linearen \Rightarrow dovolj je gledati preveriti trditev $A(1) = 0$:

$$\begin{aligned} A(1) &= A(1 \cdot 1) = A(1) \cdot 1 + 1 \cdot A(1) = 2A(1) \quad / - A(1) \\ A(1) &= 0. \end{aligned}$$

- v_i smo definirali tako, da $A(x_i) = v_i$. Kaj je potem $A(f(x))$ v splošnem?

$$\begin{aligned} A(f(x)) &= \overbrace{A(f(p))}^{=0} + \sum_{i=1}^n A(x_i - p_i) g_i(p) + \overbrace{(x_i - p_i) \Big|_{x=p}}^{=0} \cdot A(g_i) \\ &= \sum_{i=1}^n \underbrace{\left(\overbrace{A(x_i)}^{=v_i} - \overbrace{A(p_i)}^{=0} \right)}_{\text{linearnost}} g_i(p) \\ &= \sum_{i=1}^n v_i g_i(p). \end{aligned}$$

Po definiciji je $g_i(p)$ enak

$$g_i(p) = \int_0^1 \frac{\partial g}{\partial x_i}(p) dt = \frac{\partial g}{\partial x_i}(p),$$

s čimer potem identificiramo izraz $A(f(x))$ kot

$$A(f(x)) = \sum_{i=1}^n v_i \frac{\partial g}{\partial x_i}(p) = v(g) = v(f).$$

■

Opomba: Izbrani tangentni vektor $V = (v_1, \dots, v_n) \in \mathbb{R}^n$ je tangentni vektor za veliko poti γ , zato označimo $v = [\gamma]$, s pogojem da $\gamma(0) = p$ in $\dot{\gamma}(0) = v$. Potem

$$v(f) = [\gamma]f = \left. \frac{d}{dt} \right|_{t=0} (f \circ \gamma)(t)$$

Definicija:

Tangentni prostor gladke mnogoterosti: M naj bo mnogoterost in $p \in M$ točka na njej. Naj bo $\varphi : V \rightarrow V'$ karta pri p . Karta φ je idejno difeomorfizem med V in $V' \stackrel{\text{odp}}{\subseteq} \mathbb{R}^n$, zato je $\varphi(p) \in \mathbb{R}^n$ in v tej točki imamo tangentni prostor $T_{\varphi(p)}\mathbb{R}^n$. Reči želimo, da φ indentificira $T_p M$ s $T_{\varphi(p)}\mathbb{R}^n$. Ampak φ ni zares odvedljiva kot $\varphi : V \rightarrow V'$ (na mnt ne znamo odvajati).

Rečemo: Tangentni prostor $T_p M$ je glede na karto φ predstavljen s $T_{\varphi(p)}\mathbb{R}^n$.

Kaj pa, če izberemo drugo karto pri p ? Kot smo vajeni, vzemimo še karto $\psi : W \rightarrow W'$, tako da $V \cap W \neq \{\}$. Prehodna preslikava je difeomorfizem neke okolice točke $\varphi(p)$ na neko okolico za $\psi(p)$. Posebej $\varphi(p) \mapsto \psi(p)$, njen odvod $D_{\varphi(p)}(\psi \circ \varphi^{-1}) : T_{\varphi(p)}\mathbb{R}^n \rightarrow T_{\psi(p)}\mathbb{R}^n$ je linearni izomorfizem. Na nek način lahko vse tangentne prostore izenačimo, da $v \in T_{\varphi(p)}\mathbb{R}^n$ enačimo z $w \in T_{\psi(p)}\mathbb{R}^n$ natanko tedaj, ko $w = D_{\varphi(p)}(\psi \circ \varphi^{-1})(v)$.

Formalno: Za $T_p M$ proglasimo *amalgamacijo* (disjunktno unijo) vseh tangentnih prostorov, določenih s kartami

$$T_p M \equiv \coprod_{\varphi \text{ karta}} T_{\varphi(p)}\mathbb{R}^n / \sim$$

Ekvivalenčna relacija nanaša na difeomorfno prehodnih preslikav. Ta rezultat je odvisen le od M in ne od izbire karte.

Opomba:

- Naj bo $f : U \rightarrow W$ difeomorfizem odprtih podmnožic v \mathbb{R}^n , $p \in U$, $f(p) \in W$. Tangentni vektorji so podani s potmi $\gamma : J \rightarrow \mathbb{R}^n$, $\gamma(0) = p$, $\dot{\gamma}(0) = v$. Če pot γ preslikamo s f , dobimo novo pot $f \circ \gamma : J \rightarrow \mathbb{R}^n$. (sledi slika ki je nimam, predstavlja kako se interval J preslika z γ na neko novo pot v $U \stackrel{\text{odp}}{\subseteq} \mathbb{R}^n$, nato pa se ta pot s $f \circ \gamma$ preslika na neko novo pot v $W \stackrel{\text{odp}}{\subseteq} \mathbb{R}^n$). Pot $f \circ \gamma$ predstavlja tangentni vektor pri $f(p)$

$$\left. \frac{d}{dt} \right|_{t=0} (f \circ \gamma)(t) = D_p f \left(\underbrace{\dot{\gamma}(0)}_v \right) = w$$

- Analogno lahko na M dvignemo tudi druga dva opisa tangentnih prostorov (s potmi in z derivacijami): dve poti sta ekvivalentni, če imata enak tangentni vektor, ko ju preslikamo z neko karto – rečemo, da se taki poti *dotikata*.

Trditev:

$T_p M$ lahko enačimo s prostorom poti $P(M, p)/\sim$ (tu $P(M, p)$ pomeni vse poti na M skozi p , ' \sim ' pa je ekvivalenčna relacija dotikanja).

Dokaz: Enačimo jih s slikami teh poti glede na karto $\varphi : V \rightarrow V'$. Prednost tega opisa je, da so poti objekti na M , torej je ta opis intrinzičen na M . ■

5.1 Tangentni prostor in preslikave

Naj bo $f : M \rightarrow N$ gladka preslikav med gld mnt, $p \in M$, $f(p) \in N$. Velja (slike ni, zato opis):

$$\begin{aligned} f : M &\rightarrow N \\ D_p f : T_p M &\rightarrow T_{f(p)} N, \end{aligned}$$

kjer $D_p f = T_p f$. Torej, če f slika med gld mnt, potem $T_p f = D_p f$ slika med tangentnimi prostori le-teh.

Če $v = [\gamma] \in T_p M$, je $D_p f(v) = D_p f([\gamma]) \equiv [f \circ \gamma]$, $f \circ \gamma$ je pot v N . Glede na karti $\varphi : V \rightarrow V'$ na M in $\psi : W \rightarrow W'$ je $D_p f$ dana s preslikavo

$$\begin{aligned} D_{\varphi(p)}(\psi \circ f \circ \varphi^{-1}) : T_{\varphi(p)} \mathbb{R}^m &\rightarrow T_{\psi(f(p))} \mathbb{R}^n \\ [\gamma] &\mapsto [(\psi \circ f \circ \varphi^{-1})(\gamma)] \end{aligned}$$

5.2 Tangentni sveženj

Definicija:

- Na $U \stackrel{\text{odp}}{\subseteq} \mathbb{R}^n \forall x \in U$ imamo tangentni prostor $T_x U \equiv \mathbb{R}^n$. *Tangentni sveženj* je disjunktna unija vseh tangentnih prostorov:

$$\coprod_{x \in U} T_x U \equiv \coprod_{x \in U} \{x\} \times \mathbb{R}^n = U \times \mathbb{R}^n.$$

- Ker je $U \times \mathbb{R}^n \stackrel{\text{odp}}{\subseteq} \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n$, jo (id) lahko vzamemo za karto. Definiramo gladko strukturo na $U \times \mathbb{R}^n$ za

$$\text{id} : U \times \mathbb{R}^n \rightarrow U \times \mathbb{R}^n \subseteq \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n.$$

- Tako dobljeno gladko mnogoterost označimo s TU in imenujemo *tangentni sveženj* mnt U . Mnogoterost TU je naravno opremljena z gladko preslikavo

$$\begin{aligned} \pi : TU &\rightarrow U \\ \pi(x, v) &= x \end{aligned}$$

Preslikava π je *sveženjska projekcija*. TU je *totalni prostor* svežnja, U je *baza*.

- Vlakno svežnja* nad točko $x \in U$ je $\pi^{-1} = T_x U$. Ker je totalni prostor produkt, imenujemo TU produktni sveženj.

- Preslikavo $s : U \rightarrow TU$ imenujemo prerez svežnja, če velja $\pi \circ s = \text{id}$ (to je: $s(x) \in T_x U$).

V primeru produktnega prostora je $TU = U \times \mathbb{R}^n$, torej mora biti $s(x) = (x, v(x))$, $v(x) \in \mathbb{R}^n$ poljuben ($v(x) = s_2(x)$). Tukaj $s_2(x)$ vsaki točki priredi tangentni vektor \Rightarrow je vektorsko polje. Tudi prerez takega svežnja imenujemo vektorsko polje.

Kot vsako vektorsko polje določa diferencialno enačbo, $\dot{x} = s(x)$, katere rešitvene krivulje so $\gamma : I \rightarrow U$, $\dot{\gamma}(t) = s(\gamma(t))$. Na vektorsko polje lahko gledamo kot na derivacijo: če je $s : U \rightarrow TU$ gladko vektorsko polje in je $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ gladka, je $s(f) = df(s)$ gladka funkcija na U , ki je smerni odvod f vzdolž polja s .

Opomba: To smo storili za neko mnogoterost U , ki je vložena v \mathbb{R}^n . Isto bomo poskusili storiti za abstraktno mnogoterost, katere opis poznamo le prek kart.

Definicija:

Tangentni sveženj (abstraktne) gladke mnogoterosti: Imejmo (abstraktno) gld mnt M . $\forall x \in M$ imamo $T_x M$, tangentni sveženj je disjunktna unija vseh teh $T_x M$:

$$TM \equiv \coprod_{x \in M} T_x M.$$

Ta je opremljen s projekcijo

$$\begin{aligned} \pi : TM &\rightarrow M \\ T_x M \ni v &\mapsto x \end{aligned}$$

Težava je v tem, ker TM ne pride opremljen s strukturo gld mnt. TM pa lahko opremimo z atlasom, ki ga določa atlas na M .

Naj bo $\{\varphi_\lambda : U_\lambda \rightarrow U'_\lambda \subseteq \mathbb{R}^n \mid \lambda \in \Lambda\}$ nek atlas na M . $T_x M$ je definiran s pomočjo karte pri x . Če je $x \in U_\lambda$, $T_x M$ enačimo s $T_{\varphi_\lambda(x)} \mathbb{R}^n \equiv \mathbb{R}^n$. Če je $x \in U_\mu$, potem $T_x M$ enačimo s $T_{\varphi_\mu(x)} \mathbb{R}^n \equiv \mathbb{R}^n$, saj sta ta povezana z linearnim izomorfizmom.

To konstrukcijo lahko uporabimo na celotni karti, $\varphi : U_\lambda \rightarrow U'_\lambda$ določa bijekcijo med $\coprod_{x \in U_\lambda} T_x M$ in $\coprod_{y \in U'_\lambda} T_y U'_\lambda$, tako da $T_x M$ identificira s $T_{\varphi_\lambda(x)} U'_\lambda$. To bijekcijo označimo $\hat{\varphi}_\lambda$ in jo proglasimo za *karto* na TM . Preveriti moramo le gladkost prehodnih preslikav. To so $TU'_\lambda \rightarrow TU'_\mu$, $\hat{\varphi}_\mu \circ \hat{\varphi}_\lambda$, definirana na preseku.

$$\begin{aligned} \hat{\varphi}_\mu \circ \hat{\varphi}_\lambda^{-1} : \varphi_\lambda(U_\lambda \cap U_\mu) \times \mathbb{R}^n &\rightarrow \varphi_\mu(U_\lambda \cap U_\mu) \times \mathbb{R}^n \\ (y, v) &\rightarrow \left((\varphi_\mu \circ \varphi_\lambda^{-1})(y), D_y(\varphi_\mu \circ \varphi_\lambda^{-1})(v) \right) \end{aligned}$$

Če je atlas na M razreda C^k , je dobljeni atlas na TM razreda C^{k-1} (ker noter nastopa odvod), zato je najbolj ugodna situacija, ko je M C^∞ -mnt.

5.3 Tangentni sveženj gladke podmnogoterosti M v \mathbb{R}^m

Definirajmo njen geometričen tangentni sveženj tako, da zložimo tangentne prostore na M kot podprostore v \mathbb{R}^m . Velja $\forall x \in M$ je $T_x M$ vektorski prostor vseh hitrostnih vektorjev poti na M skozi x . $T_x M$ je vektorski podprostor v \mathbb{R}^m dimenzije $n = \dim M$. Ta $T_x M$ je očitno isti tangentni prostor, kot prej.

$$TM = \{(x, v) \mid x \in M, v \in T_x M\} \subseteq M \times \mathbb{R}^n.$$

Lahko je videti, da je ta reč podmnt $\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^n$, difeomorfna abstraktnemu tangentnemu svežnju za M .

Lema:

Če je $M = f^{-1}(a)$, a je regularna vrednost, tj. vse točke $x \in M = f^{-1}(a)$ so regularne (in M je nivojska množica), potem je $T_x M = \ker D_x f$ in $TM = \ker Df$, kjer

$$Df : \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^\ell$$

$$(x, v) \rightarrow D_x f(v)$$

in

$$\frac{d}{dt}(f \circ g) = \underbrace{\frac{d}{dg}(f)(g(t))}_{\text{matrika}} \cdot \underbrace{\frac{d}{dt}g(t)}_{\dot{\gamma}(0)}.$$

Dokaz: Izberimo $x \in M$ in $v \in T_x M$, predstavljen s potjo $\gamma : (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow M$, $\gamma(0) = x$, $\dot{\gamma}(0) = v$. Ker je $\gamma(-\varepsilon, \varepsilon) \subseteq M$, je $f \circ \gamma$ konstantna preslikava z vrednostjo a , njen odvod je 0:

$$\left. \frac{d}{dt} \right|_{t=0} (f \circ \gamma)(t) = D_{\gamma(0)} f(\dot{\gamma}(0)) = D_x f(v) = 0 \quad \forall \gamma \quad \Rightarrow T_x M \subseteq \ker D_x f.$$

Ker je a regularna vrednost, je odvod $D_x f$ surjektiven in

$$\underbrace{\dim \ker D_x f}_{m-\ell=\dim T_x M} + \underbrace{\dim \operatorname{im} D_x f}_{\ell \text{ (surj.)}} = m.$$

Potem $\ker D_x f$ vsebuje $T_x M$, enake dimenzije, kar pa pomeni $T_x M = \ker D_x f$.

■

Zgled:

Liejeva grupa je grupa G , ki je hkrati gladka mnogoterost in v kateri sta grupni operaciji množenja in invertiranja gladki preslikavi.

$$[(\mathbb{R}, +), (\mathbb{C}^*, \cdot), (S^1, \cdot), (GL_n(\mathbb{R}), \cdot), (GL_n(\mathbb{C}), \cdot), \dots].$$

Trditev:

Če je G Liejeva grupa, je TG izomorfen produktu $G \times T_e G$, tj. \exists difeomorfizem med $G \times T_e G$ in TG , ki je na vsakemu vlaknu linearen izomorfizem.

Dokaz: Iskani izomorfizem je

$$G \times T_e G \rightarrow TG$$

$$(g, v) \mapsto D_e g(v) \quad (\text{delovanje})$$

Element g določa gladko preslikavo $G \rightarrow G$, ki je levo množenje z G , $h \mapsto gh$. Posebej $e \mapsto g$. \forall gladko preslikavo med gld mnt $f : M \rightarrow N$ določa gladko preslikavo $Df : TM \rightarrow TN$, $v \in T_x M \Rightarrow Df(v) \in T_{f(x)} N$ določen takole: če pot $\gamma : (-\varepsilon, \varepsilon) \rightarrow M$ predstavlja v , potem pot $f \circ \gamma$ predstavlja $D_x f(v)$.

Na ta način odvod translacije g določa linearno preslikavo $D_e g : T_e G \rightarrow T_g G$, ki je izomorfizem (njen inverz je $D_g g^{-1}$).

■

5.4 Tenzorski svežnji in tenzorska polja

Ideja: Konstrukcije linearne algebre, ki jih lahko naredimo na vlaknih svežnja, globaliziramo na celoten sveženj.

Primeri konstrukcij:

1. Dualni vektorski prostor:

$$V^* = L(V, \mathbb{R}) = \text{lin. preslikave iz } V \rightarrow \mathbb{R}.$$

Tangentni prostor $T_x M \rightarrow T_x^* M = (T_x M)^*$ in iz teh sestavimo nov sveženj $T^* M$.

2. Tenzorski produkt: V vektorski prostor, V^* dualni prostor. Tenzorji tipa (r, s) so elementi tenzorskega produkta

$$\overbrace{V \otimes V \otimes \dots \otimes V}^{r\text{-krat}} \otimes \overbrace{V^* \otimes V^* \otimes \dots \otimes V^*}^{s\text{-krat}} = V^{r,s}.$$

Če to uporabimo na vlaknih $T_x M$, dobimo sveženj tenzorjev $T^{r,s} M$ z vlakni $T_x^{r,s} M$. Prerezi tega svežnja so (r, s) -tenzorska polja.