UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO

Matematika – 1. stopnja

Luka Horjak

HOLOMORFNI AVTOMORFIZMI

Delo diplomskega seminarja

Mentor: prof. dr. Miran Černe

Ljubljana, 2023

Kazalo

Holomorfni avtomorfizmi

Povzetek

...

Holomorphic automorphisms

Abstract

...

Math. Subj. Class. (2020): 30F10, 30C20
Ključne besede: ..., ...
Keywords: ..., ...

1 Holomorfni avtomorfizmi v kompleksni ravnini

1.1 Enostavno povezana območja

Da lahko govorimo o holomorfnih funkcijah, se bomo omejili na odprte podmnožice kompleksne ravnine.

Definicija 1.1. *Holomorfen avtomorfizem* odprte množice $\Omega \subseteq \mathbb{C}$ je bijektivna holomorfna preslikava $f\colon \Omega \to \Omega$ s holomorfnim inverzom.

Opazimo, da je zadosten pogoj že to, da je f bijektivna in holomorfna. Opazimo še, da množica avtomorfizmov nekega območja tvori grupo z operacijo kompozitum. To grupo označimo z $\mathrm{Aut}(\Omega)$.

Prepričamo se lahko, da lahko avtomorfizme nepovezanih množic opišemo z avtomorfizmi, ki komponente med seboj permutirajo. V nadaljevanju se bomo tako omejili na povezane množice.

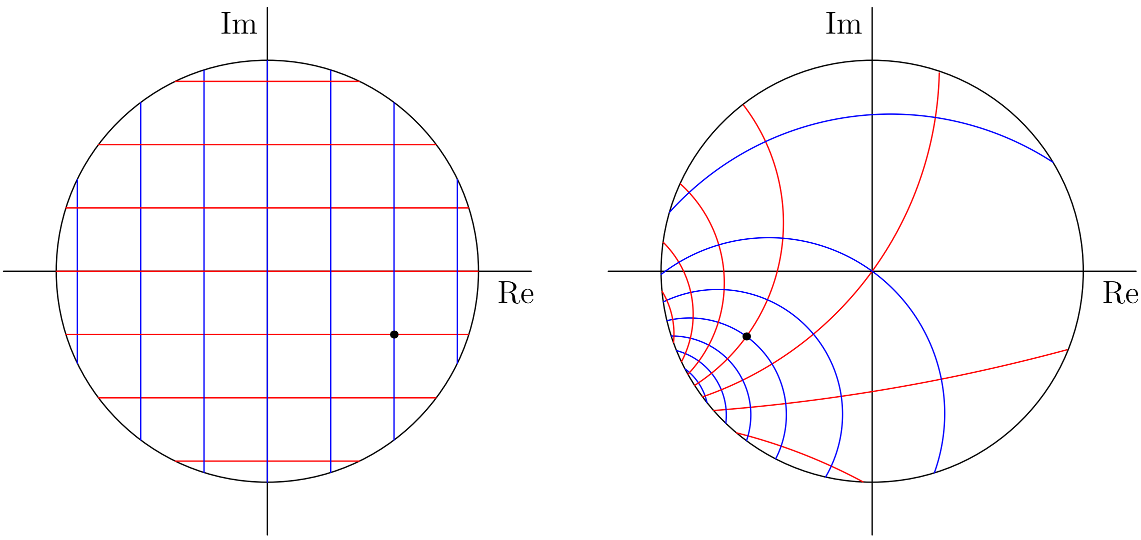
Definicija 1.2. *Območje* v kompleksni ravnini $\mathbb{C}$ je vsaka odprta povezana množica.

Primer 1.3. Kompleksna ravnina je območje v $\mathbb{C}$. Njena grupa avtomorfizmov je enaka

$$\mathrm{Aut}(\mathbb{C}) = \{z \mapsto az + b \mid a \neq 0\}\,. \qquad \diamondsuit$$

Primer 1.4. Naj bo $\mathbb{\Delta}$ odprt enotski disk v $\mathbb{C}$. Tedaj je

$$\mathrm{Aut}(\mathbb{\Delta}) = \left\{ z \mapsto e^{i\theta} \cdot \frac{z-a}{1-\bar{a}z} \;\middle|\; a \in \mathbb{\Delta} \wedge \theta \in [0, 2\pi) \right\}. \qquad \diamondsuit$$



Slika 1: Primer avtomorfizma diska z označenima točkama $f^{-1}(0)$ in $f(0)$

Izkaže se, da smo s tem do izomorfizma natančno opisali grupe avtomorfizmov vseh povezanih in enostavno povezanih množic v $\mathbb{C}$. Velja namreč naslednja lema:

Lema 1.5. *Naj bosta Ω_1 in Ω_2 biholomorfno ekvivalentni območji v $\mathbb{C}$. Tedaj je $\mathrm{Aut}(\Omega_1) \cong \mathrm{Aut}(\Omega_2)$.*

Dokaz. Naj bo $f\colon \Omega_1 \to \Omega_2$ biholomorfna preslikava. Sedaj definiramo preslikavo $\Phi\colon \operatorname{Aut}(\Omega_1) \to \operatorname{Aut}(\Omega_2)$ s predpisom

$$\Phi(\phi) = f^{-1} \circ \phi \circ f.$$

Ker je s predpisom

$$\Phi^{-1}(\psi) = f \circ \psi \circ f^{-1}$$

očitno podan predpis inverza preslikave Φ, je ta bijektivna. Velja pa

$$\Phi(\phi \circ \psi) = f^{-1} \circ \phi \circ \psi \circ f = \left(f^{-1} \circ \phi \circ f\right) \circ \left(f^{-1} \circ \psi \circ f\right) = \Phi(\phi) \circ \Phi(\psi),$$

zato je Φ homomorfizem. $\square$

Spomnimo se na Riemannov upodobitveni izrek, ki pravi, da je vsako povezano in enostavno povezano območje v kompleksni ravnini ali biholomorfno ekvivalentno $\mathbb{\Delta}$ ali pa kar enako $\mathbb{C}$. Grupe avtomorfizmov povezanih in enostavno povezanih območij so do izomorfizma natančno tako le $\operatorname{Aut}(\mathbb{\Delta})$ in $\operatorname{Aut}(\mathbb{C})$.

Omenimo še, da lahko kompleksno ravnino dopolnimo do Riemannove sfere $\widehat{\mathbb{C}}$. Njeni avtomorfizmi so Möbiusove transformacije, torej

$$\operatorname{Aut}\left(\widehat{\mathbb{C}}\right) = \left\{ z \mapsto \frac{az+b}{cz+d} \;\middle|\; ad - bc = 1 \right\}.$$

1.2 Punktirani diski in kolobarji

Po obravnavi enostavno povezanih območij so naslednji korak območja z »luknjami«. Eden izmed osnovnejših primerov takih območij je punktiran disk $\mathbb{\Delta}_\alpha = \mathbb{\Delta} \setminus \{\alpha\}$.

Disk $\mathbb{\Delta}^* = \mathbb{\Delta} \setminus \{0\}$ je biholomorfno ekvivalenten vsakemu punktiranemu disku, saj je preslikava $f\colon \mathbb{\Delta}_\alpha \to \mathbb{\Delta}^*$ s predpisom

$$f(z) = \frac{z - \alpha}{1 - \overline{\alpha} z}$$

biholomorfna. Sledi, da je $\operatorname{Aut}(\mathbb{\Delta}_\alpha) \cong \operatorname{Aut}(\mathbb{\Delta}^*)$.

Trditev 1.6. *Za punktiran disk velja*

$$\operatorname{Aut}(\mathbb{\Delta}^*) = \left\{ z \mapsto e^{i\pi\theta} z \;\middle|\; \theta \in [0, 2\pi) \right\}.$$

Dokaz. Naj bo $f\colon \mathbb{\Delta}^* \to \mathbb{\Delta}^*$ poljuben avtomorfizem. Tedaj je točka 0 izolirana singularnost funkcije f. Ker je f omejena, je to odpravljiva singularnost.

Naj bo $\widetilde{f}\colon \mathbb{\Delta} \to \mathbb{C}$ funkcija, ki jo dobimo tako, da f razširimo na celoten disk. Predpostavimo, da velja $\widetilde{f}(0) \neq 0$. Ker je $\widetilde{f}$ holomorfna, je odprta, zato sledi $\left|\widetilde{f}(0)\right| < 1$. Oglejmo si točko $\alpha \neq 0$, za katero je $f(\alpha) = \widetilde{f}(0)$. Izberemo si lahko disjunktni okolici U in V točk 0 in α. Ker je $\widetilde{f}$ odprta, je odprta tudi množica $W = \widetilde{f}(U) \cap \widetilde{f}(V)$. Hitro opazimo, da velja $\widetilde{f}(0) \in W$, zato je ta množica neprazna. Sledi, da je W neskončna, kar je protislovje, saj velja $f(U \setminus \{0\}) \cap f(V) = \emptyset$.

Sledi, da je $\widetilde{f}(0) = 0$, zato je $\widetilde{f}$ avtomorfizem diska. Tako dobimo inkluzijo

$$\operatorname{Aut}(\mathbb{\Delta}^*) \subseteq \{ f \in \operatorname{Aut}(\mathbb{\Delta}) \mid f(0) = 0 \}.$$

Ni težko preveriti, da velja tudi obratna inkluzija, oziroma

$$\operatorname{Aut}(\mathbb{\Delta}^*) = \left\{ z \mapsto e^{i\pi\theta} z \;\middle|\; \theta \in [0, 2\pi) \right\}. \qquad \square$$

Kaj pa se zgodi, če število lukenj povečamo? Naj bo $\mathbb{A}_2 = \mathbb{A} \setminus \{0, \alpha\}$.[1] Po enakem razmisleku kot prej ugotovimo, da za vsak avtomorfizem $f \in \mathrm{Aut}(\mathbb{A}_2)$ velja $f(0) \in \mathbb{A}$ in hkrati $f(0) \notin \mathbb{A}_2$. Enako velja za točko α. Sedaj ni težko videti, da velja

$$\mathrm{Aut}(\mathbb{A}_2) = \left\langle z \mapsto \frac{\alpha - z}{1 - \overline{\alpha} z} \right\rangle \cong \mathbb{Z}_2,$$

saj je avtomorfizem diska natančno določen z dvema točkama.

Sedaj si oglejmo še kolobar $R = \mathbb{A} \setminus \mathbb{A}(r)$. Naj bo $f\colon R \to R$ avtomorfizem. Izkaže se, da se f zvezno razširi na ∂R. Ker lahko f komponiramo s preslikavo $\varphi\colon z \mapsto \frac{\rho}{z}$, lahko predpostavimo, da je $f(\partial \mathbb{A}) = \partial \mathbb{A}$.

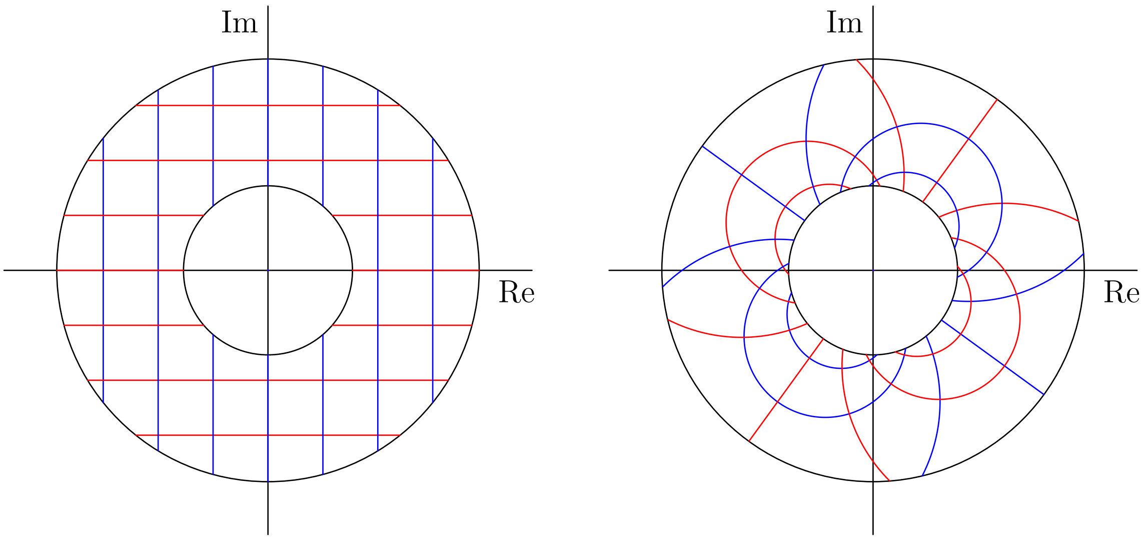
Naj bo

$$u(z) = \log|f(z)| - \log|z|\,.$$

Ker je logaritem harmonična funkcija, je $\triangle u = 0$. Ker je $u|_{\partial R} = 0$, je po principu maksima $u = 0$. Tako sledi $|f(z)| = |z|$ in

$$\left| \frac{f(z)}{z} \right| = 1.$$

Ker je $\frac{f(z)}{z}$ holomorfna in so nekonstantne holomorfne preslikave odprte, sledi, da je $\frac{f(z)}{z}$ konstantna. Tako so vsi avtomorfizmi kolobarja kar $z \mapsto e^{i\theta} z$ in $z \mapsto e^{i\theta} \frac{r}{z}$.



Slika 2: Primer avtomorfizma kolobarja

1.3 Avtomorfizmi p-povezanih območij

Oglejmo si avtomorfizme območja $\Omega = \widehat{\mathbb{C}} \setminus \{x_i \mid 1 \le i \le p\}$, pri čemer brez škode za splošnost vzamemo $x_p = \infty$. Za $p = 1$ dobimo kar kompleksno ravnino, katere avtomorfizme že poznamo. Pri $p = 2$ lahko brez škode za splošnost vzamemo $x_1 = 0$. Ni težko videti, da so vsi avtomorfizmi oblike $z \mapsto e^{i\theta} \cdot z^{\pm 1}$.

[1] Podobno kot prej lahko privzamemo, da je ena izmed lukenj enaka 0.

Sedaj si oglejmo še primer $p > 2$. Preverimo lahko, da se vsak avtomorfizem Ω razširi do avtomorfizma Riemannove ploskve, ki permutira točke x_i. Ker je vsaka Möbiusova transformacija enolično določena s tremi točkami, je moč grupe $\mathrm{Aut}(\Omega)$ tako omejena s $p(p-1)(p-2)$. Izkaže se, da lahko to mejo še bistveno izboljšamo.

Trditev 1.7. *Naj bo $p > 2$ naravno število in $\Omega = \widehat{\mathbb{C}} \setminus \{x_i \mid 1 \leq i \leq p\}$. Tedaj velja $|G| \leq 2p$ ali pa $|G| \in \{12, 24, 60\}$.<*

Dokaz. Predpostavimo, da je $|G| \geq 2$. Označimo $G = \mathrm{Aut}\,\Omega$ in za vsako točko $z \in \Omega$ njen stabilizator označimo z $G_z = \{g \in G \mid g(z) = z\}$. Vzemimo neko maksimalno množico $\{z_j \mid 1 \leq j \leq r\}$ točk, ki imajo netrivialen stabilizator in paroma disjunktne orbite. Naj bo še $v_j = \left|G_{z_j}\right|$ za vse $j \leq r$. Sedaj na dva načina preštejmo fiksne točke netrivialnih avtomorfizmov (z večkratnostmi). Ker ima vsak avtomorfizem natanko 2 fiksni točki, je teh skupaj enako kar $2 \cdot (|G| - 1)$. Zlahka preverimo, da so fiksne točke ravno elementi orbit točk z_j. Vsaka točka orbite točke z_j je fiksna točka natanko $v_j - 1$ netrivialnih avtomorfizmov, takih točk pa je seveda $\frac{|G|}{v_j}$. Tako dobimo enakost

$$2 \cdot (|G| - 1) = \sum_{j=1}^{r} \frac{|G|}{v_j} \cdot (v_j - 1)\,.$$

Z malo spretnosti lahko to enakost preoblikujemo v

$$2 - \frac{2}{|G|} = \sum_{j=1}^{r} \left(1 - \frac{1}{v_j}\right).$$

Sedaj ločimo naslednje primere:

i) Velja $r = 1$. Velja

$$1 - \frac{1}{v_1} < 1 \leq 2 - \frac{2}{|G|},$$

kar je seveda protislovje.

ii) Velja $r = 2$. Enakost lahko v tem primeru prepišemo v obliko

$$\frac{2}{|G|} = \frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_2}.$$

Ker velja $v_1, v_2 \leq |G|$, je lahko zgornja enakost izpolnjena le v primeru $v_1 = v_2 = |G|$. To pomeni, da imamo natanko dve fiksni točki, ki sta fiksni točki vsakega avtomorfizma. Ker je vsak avtomorfizem Riemannove sfere natanko določen s tremi točkami, je tako dovolj določiti, kam se slika ena izmed p točk, za to pa imamo kvečjemu p možnosti. V tem primeru tako velja $|\mathrm{Aut}(\Omega)| \leq p$.[2]

iii) Velja $r = 3$. V tem primeru lahko zgornjo enakost prepišemo v

$$\frac{2}{|G|} = \frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_2} + \frac{1}{v_3} - 1.$$

[2]Dokazati se da celo, da velja $\mathrm{Aut}(\Omega) \cong \mathbb{Z}_k$ za nek $k \leq p$.

Brez škode za splošnost naj velja $v_1 \leq v_2 \leq v_3$. Če za vse j velja $v_j \geq 3$, je desna stran enačbe nepozitivna. Tako sledi $v_1 = 2$. Če velja tudi $v_2 = 2$, lahko izrazimo $v_3 = \frac{|G|}{2}$. Orbita točke z_3 je tako enaka kar $\{z_3, z_3'\}$. Sledi, da stabilizatorji točke z_3 fiksirajo ta dva elementa, kar po istem argumentu kot zgoraj implicira, da je $v_3 \leq p$ in zato $|G| \leq 2p$.[3]

Ostane še primer, ko je $v_1 = 2$ in $v_2, v_3 \geq 3$. Če velja $v_3 \geq 6$, dobimo

$$\frac{1}{v_1} + \frac{1}{v_2} + \frac{1}{v_3} - 1 \leq \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{6} - 1 = 0,$$

kar je seveda protislovje. Podobno pridemo do protislovja, če velja $v_2, v_3 \geq 4$. Tako nam preostanejo le še primeri

$$(v_1, v_2, v_3) \in \{(2,3,3), (2,3,4), (2,3,5)\}.$$

Ni težko izračunati, da velja $|G| \in \{12, 24, 60\}$.

iv) Velja $r \geq 4$. Ker je $v_j \geq 2$, sledi

$$\sum_{j=1}^{r} \left(1 - \frac{1}{v_j}\right) \geq \frac{r}{2} \geq 2 > 2 - \frac{2}{|G|},$$

kar je seveda protislovje. □

Za katera števila p pa lahko velja $|G| > 2p$? Če imamo v točki x_j luknjo območja Ω, jo moramo imeti tudi v vsakem elementu njene orbite. Oglejmo si vsak primer posebej:

1. Velja $|G| = 12$. V tem primeru imamo dve orbiti velikosti 4 in eno orbito velikosti 6, vse ostale pa so velikosti 12. Tako sledi

$$p = 4a + 6b + 12c,$$

pri čemer veljajo omejitve $a \leq 2$ in $b \leq 1$. Ker želimo še $p < 6$, je edina možnost kar $p = 4$.

2. Velja $|G| = 24$. V tem primeru imamo po eno orbito velikosti 6, 8 in 12, zato velja

$$p = 6a + 8b + 12c + d$$

z omejitvami $a, b, c \leq 1$. Ob pogoju $p < 12$ tako sledi $p \in \{6, 8\}$.

3. Velja $|G| = 60$. V tem primeru imamo po eno orbito velikosti 12, 20 in 30, od koder sledi

$$p = 12a + 20b + 30c + 60d$$

z omejitvami $a, b, c \leq 1$. Z dodatnim pogojem $p < 30$ sta tako edini možnosti $p \in \{12, 20\}$.

[3] V tem primeru je $\mathrm{Aut}(\Omega)$ izomorfna neki diedrski grupi.

Zgornje primere si lahko predstavljamo tudi geometrijsko. Grupe redov 12, 24 in 60 ustrezajo ravno grupam rotacij tetraedra, oktaedra in ikozaedra. Orbite netrivialnih velikosti v teh primerih predstavljajo kar oglišča, razpolovišča robov in pa središča mejnih ploskev. Če za p točk izberemo eno izmed teh orbit, bodo vse rotacije še vedno avtomorfizmi območja.

Oglejmo si še primer, ko robne komponente niso nujno točke.

Izrek 1.8. *Naj bo Ω območje na Riemannovi sferi, katerega robne komponente sestavlja p točk ali Jordanovih krivulj. Tedaj za moč grupe $\mathrm{Aut}(\Omega)$ veljajo enake ocene kot zgoraj.*

Dokaz. Po posplošitvi Riemannovega upodobitvenega izreka lahko predpostavimo, da je Ω kar enotski disk, ki mu odstranimo nekaj točk in diskov. Po Carathéodoryjevem izreku [4, izrek 5.1.1 in opomba 5.1.2] sledi, da avtomorfizem permutira robne komponente območja Ω. Tako obstaja homomorfizem $\lambda\colon \mathrm{Aut}(\Omega) \to S_{\partial\Omega}$, kjer je $S_{\partial\Omega}$ permutacijska grupa. Jedro homomorfizma so natanko tisti avtomorfizmi, ki fiksirajo vsako robno komponento posebej. Pokažimo, da je jedro trivialno.

Naj bo $T \in \ker\lambda$ poljuben avtomorfizem. Najprej se lahko znebimo točkastih robnih komponent, saj se te preslikajo same vase. Z uporabo Schwarzovega zrcaljenja lahko T razširimo preko vseh ostalih robnih komponent. Enostavno je preveriti, da se pri tem ohrani injektivnost preslikave. V limiti nam v vsaki komponenti Ω^{c} ostane samo ena točka. V vseh omejenih komponentah je to odpravljiva singularnost, v neomejeni pa ali odpravljiva singularnost ali pol prve stopnje. V obeh primerih se T razširi do avtomorfizma Riemannove sfere. Zanimajo nas torej avtomorfizmi Riemannove sfere, ki fiksirajo vse robne komponente Ω. V nadaljevanju na točkaste robne komponente glejmo kot na diske z radijem 0.

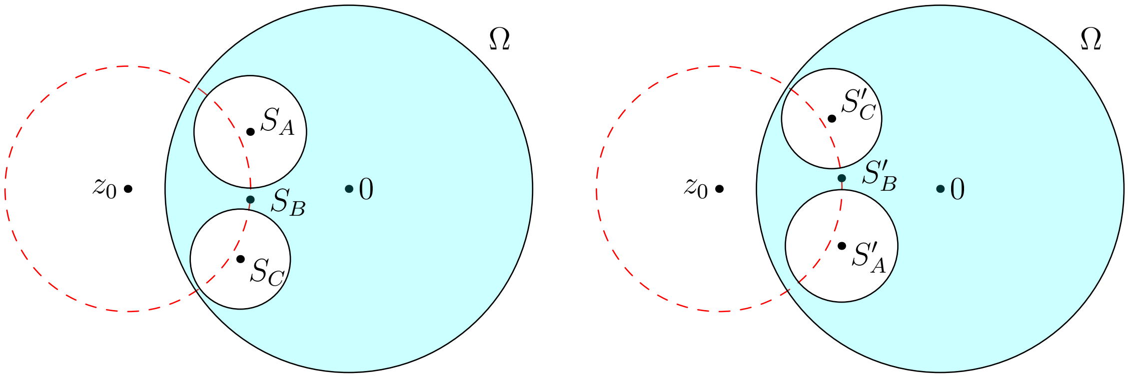
Naj bo $T = \frac{az+b}{cz+d}$. Sedaj obravnavajmo dva primera.

i) Velja $c = 0$. V tem primeru je T afina transformacija. To implicira, da T poleg robnih komponent fiksira tudi njihova središča. Ker sta to vsaj dve različni točki, ima T dve fiksni točki, zato velja kar $T = \mathrm{id}$.

ii) Velja $c \neq 0$. Tedaj je T kompozitum inverzije v točki $z_0 = -\frac{d}{c}$, rotacije in translacije. Ker mora inverzija ohranjati radije robnih komponent (preostali preslikavi sta namreč izometriji), morajo vse biti ortogonalne na neko krožnico s središčem v z_0.[4] Sedaj opazimo, da smo prišli do protislovja, saj je inverzija obrnila orientacijo središč robnih komponent, česar pa ne moremo popraviti z rotacijo in translacijo.

Sedaj si izberimo poljubno točko $z \notin \Omega$ in si oglejmo njeno orbito, torej množico $A = \{T(z) \mid T \in \mathrm{Aut}(\Omega)\}$. Po enakem razmisleku kot zgoraj se namreč vsak avtomorfizem Ω razširi do avtomorfizma kompleksne ravnine. V vsaki komponenti Ω^{c} imamo kvečjemu en element množice A. Sedaj si izberimo poljubno točko v eni izmed komponent, ki je množica A ne obišče, in postopek ponovimo. Tako na koncu dobimo množico $S = \{z_i \mid 1 \leq i \leq p\}$, pri čemer je v vsaki komponenti Ω^{c} natanko ena točka. Poljuben avtomorfizem $T \in \mathrm{Aut}(\Omega)$ se torej razširi do avtomorfizma območja $\Omega \setminus S$, s tem pa je izrek dokazan. □

[4]Ne morejo imeti središča v z_0, saj bi tedaj T območje Ω slikal v notranjost te krožnice.



Slika 3: Inverzija prezrcali robne komponente

2 Riemannove ploskve

2.1 Gladke in kompleksne mnogoterosti

V tem poglavju bomo rezultate iz območij na Riemannovi sferi posplošili na bolj splošne množice. Seveda hočemo še naprej govoriti o holomorfnih preslikavah, zato potrebujejo te množice neko strukturo, v kateri znamo odvajati. Naravna izbira so tako mnogoterosti.

Definicija 2.1. *Topološka mnogoterost* dimenzije n je Hausdorffov, 2-števen topološki prostor M, v katerem ima vsaka točka $p \in M$ okolico, homeomorfno odprti podmnožici $\mathbb{R}^n$. Paru okolice in homeomorfizma pravimo *lokalna karta*.

Zdi se, da lahko za vsako primerno preslikavo $f\colon M \to N$ med mnogoterostima M in N preverimo, ali je diferenciabilna – za vsako točko $P \in M$ poiščemo evklidski okolici s homeomorfizmoma (U, φ) in (V, ψ) točk P in $f(P)$ in preverimo, ali je preslikava $\tilde{f} = \psi \circ f \circ \varphi^{-1}$ diferenciabilna. To seveda lahko naredimo, a pridemo do težave – diferenciabilnost je v tem primeru odvisna od lokalne karte.

V nadaljevanju se omejimo na dvodimenzionalne mnogoterosti (ploskve), saj so lokalno homeomorfne podmnožici kompleksne ravnine, kar nam bo olajšalo definicijo holomorfnosti.

Definicija 2.2. *Atlas* ploskve M je množica lokalnih kart $\mathcal{U} = \{(U_i, \varphi_i) \mid i \in I\}$, za katero velja

$$M = \bigcup_{i \in I} U_i.$$

Če velja $U_i \cap U_j \neq \emptyset$, definiramo *prehodno preslikavo* $\varphi_{i,j}\colon \varphi_i(U_i \cap U_j) \to \varphi_j(U_i \cap U_j)$ s predpisom $\varphi_{i,j} = \varphi_j \circ \varphi_i^{-1}$. Atlas je *kompleksen*, če so vse prehodne preslikave holomorfne.

S to definicijo smo se znebili zgornje težave. Če namreč vzamemo lokalne karte iz istega kompleksnega atlasa, je holomorfnost preslikave neodvisna od izbire lokalne karte – če so (U, φ_i) in (V, ψ_i) lokalne karte točk P in $f(P)$, za $f_i = \psi_i \circ f \circ \varphi_i^{-1}$ velja

$$f_2 = \left(\psi_2 \circ \psi_1^{-1}\right) \circ f_1 \circ \left(\varphi_1 \circ \varphi_2^{-1}\right).$$

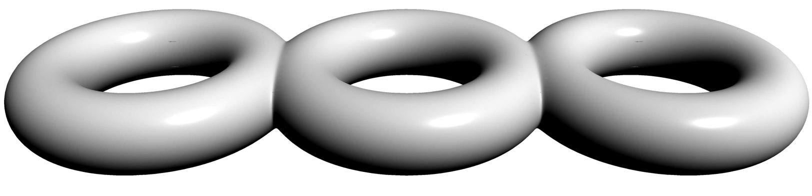
Če je funkcija f_1 holomorfna, je zaradi holomorfnosti prehodnih preslikav holomorfna tudi f_2.

$$\begin{tikzcd}
U_1 \subseteq \mathbb{C} \arrow[r, dashed, "f_1"] & V_1 \subseteq \mathbb{C} \\
U \arrow[u, "\varphi_1"] \arrow[r, "f"] \arrow[d, "\varphi_2"'] & V \arrow[u, "\psi_1"'] \arrow[d, "\psi_2"] \\
U_2 \subseteq \mathbb{C} \arrow[r, dashed, "f_2"'] & V_2 \subseteq \mathbb{C}
\end{tikzcd}$$

Pravimo, da sta kompleksna atlasa $\mathcal{U}$ in $\mathcal{V}$ *kompatibilna*, če je tudi $\mathcal{U} \cup \mathcal{V}$ kompleksen atlas. Lahko se prepričamo, da je kompatibilnost ekvivalenčna relacija. Ko izbiramo atlas za mnogoterost je tako pomembno le, v katerem ekvivalenčnem razredu je ta atlas.

Definicija 2.3. *Riemannova ploskev* je povezana mnogoterost dimenzije 2 (kompleksne dimenzije 1) skupaj z izborom ekvivalenčnega razreda kompleksnih atlasov.

V nadaljevanju se bomo omejili na kompaktne Riemannove ploskve. Izkaže se, da so vse Riemannove ploskve orientabilne [3, razdelek 1.2.6]. Z geometrijsko topologijo lahko te klasificiramo kot g-toruse – za $g = 0$ to pomeni sfero, za $g = 1$ torus, za $g \geq 2$ pa g torusov, ki so zlepljeni skupaj. Številu g pravimo *rod* ploskve.



Slika 4: Ploskev roda $g = 3$

Definicija 2.4. *Meromorfen q-diferencial ω* Riemannove ploskve je dodelitev meromorfne funkcije f vsaki lokalni koordinati, pri čemer je $f(z)\,dz^q$ neodvisna od lokalne koordinate. Meromorfnim 1-diferencialom pravimo kar *meromorfni diferenciali.*

Naj bosta (U, φ) in (V, ψ) lokalni karti, za kateri velja $U \cap V \neq \emptyset$. Če jima meromorfen q-diferencial ω priredi funkciji f_U in f_V, mora tako veljati

$$f_U = f_V \cdot \left(\left(\psi \circ \varphi^{-1}\right)'\right)^q.$$

Opazimo, da je q-ta potenca meromorfnega diferenciala meromorfen q-diferencial.

Trditev 2.5. *Naj bosta α in β meromorfna q-diferenciala. Tedaj je $\frac{\alpha}{\beta}$ meromorfna funkcija.*

Dokaz. Z zgornjimi oznakami velja

$$\frac{\alpha_U}{\beta_U} = \frac{\alpha_V \cdot \left(\left(\psi \circ \varphi^{-1}\right)'\right)^q}{\beta_V \cdot \left(\left(\psi \circ \varphi^{-1}\right)'\right)^q} = \frac{\alpha_V}{\beta_V}.$$

Kvocient $\frac{\alpha}{\beta}$ tako ni odvisen od lokalnih koordinat. $\square$

Očitno velja tudi obratno – če je α meromorfen q-diferencial in f meromorfna funkcija, je tudi $f\alpha$ meromorfen q-diferencial.

Trditev 2.6. *Naj bo $f\colon M \to N$ nekonstantna holomorfna preslikava med kompaktnima Riemannovima ploskvama. Tedaj obstaja naravno število m, za katero f doseže vsako točko $Q \in N$ natanko m-krat.*[5]

Dokaz. Iz kompleksne analize vemo, da za vsako točko $P \in M$ obstajajo take lokalne koordinate $\tilde{z}$, da je $f(\tilde{z}) = f(P) + \tilde{z}^n$. Število $n-1$ označimo z $b(P)$ in mu pravimo BRANCHING NUMBER. To je seveda dobro definirano.

Za vsako naravno število m naj bo

$$\Sigma_m = \left\{ X \in N \;\middle|\; \sum_{f(P)=X} (b(P)+1) \geq m \right\}.$$

Označimo še

$$\varphi(X) = \sum_{f(P)=X} (b(P)+1).$$

Vse množice Σ_m so odprte – če je $b(P) = n-1$, lahko v lokalnih koordinatah zapišemo $f(\tilde{z}) = \tilde{z}^n$. Enačba $f(\tilde{z}) = \varepsilon$ ima tako natanko n rešitev, zato za okolico U točke P velja

$$b(P) + 1 = \sum_{Q \in U \cap f^{-1}(P')} (b(Q)+1),$$

kjer je $P' \in f(U)$. Če to enakost seštejemo po okolicah vseh točk $P \in f^{-1}(X)$, dobimo

$$m \leq \varphi(X) \leq \varphi(P').$$

Pokažimo še, da so te množice zaprte v $\widehat{\mathbb{C}}$. Naj bo Q limita zaporedja točk $Q_k \in \Sigma_m$, pri čemer je brez škode za splošnost $b(P) = 0$ za vsak $P \in f^{-1}(Q_k)$. Ker imajo vse množice $f^{-1}(Q_k)$ vsaj m elementov, lahko najdemo tako podzaporedje zaporedja $(Q_k)_{n=1}^{\infty}$, da lahko iz njihovih praslik tvorimo m konvergentnih zaporedij. Tako sledi

$$\sum_{P \in f^{-1}(Q)} (b(P)+1) \geq m.$$

Sledi, da so vse množice Σ_m odprte in zaprte v $\widehat{\mathbb{C}}$. Čim je ena izmed množic Σ_m neprazna, je tako enaka celotni Riemannovi sferi, saj je ta povezana. □

Številu m pravimo *stopnja* preslikave f in označimo $m = \deg f$.

Posledica 2.7. *Naj bo M kompaktna Riemannova ploskev. Če je $f\colon M \to \mathbb{C}$ holomorfna preslikava, je konstantna.*

Dokaz. Preslikavo f lahko opazujemo kot preslikavo med Riemannovo ploskvijo M in Riemannovo sfero $\widehat{\mathbb{C}}$. Če f ni konstantna, ima pozitivno stopnjo, kar pa ni mogoče, saj je $f^{-1}(\infty) = 0$. □

[5] Šteto z večkratnostmi.

To posledico lahko pravzaprav dokažemo z uporabo lastnosti holomorfnih preslikav. Ker je M kompaktna namreč sledi, da je taka tudi $f(M)$. Ker pa so nekonstantne holomorfne preslikave odprte, pa sledi, da je $f(M)$ tudi odprta. To seveda pomeni, da je $f(M) = \mathbb{C}$, kar je v protislovju s kompaktnostjo.

Definicija 2.8. Za kompaktni Riemannovo ploskvi M in N ter nekonstantno preslikavo $f\colon M \to N$ definiramo *TOTAL BRANCH NUMBER* kot

$$B = \sum_{P \in M} b_f(P).$$

Število je dobro definirano, saj je množica $\{P \in M \mid b_f(P)\}$ diskretna in tako zaradi kompaktnosti končna.

Izrek 2.9 (Riemann-Hurwitz)**.** *Naj bosta M in N kompaktni Riemannovi ploskvi rodov g in γ, $f\colon M \to N$ pa nekonstantna preslikava stopnje n. Tedaj za TOTAL BRANCHING NUMBER B velja*

$$g = n(\gamma - 1) + 1 + \frac{B}{2}.$$

Dokaz. Ker je množica $\{P \in M \mid b_f(P) > 0\}$ končna, jo lahko uporabimo za triangulacijo ploskve N. Denimo, da ima triangulacija F lic, E povezav in V vozlišč. To triangulacijo lahko z f^{-1} preslikamo na M. Tako dobimo triangulacijo ploskve M z nF lici, nE povezavami in $nV - B$ vozlišči. Sledi, da je

$$F - E + V = 2 - 2\gamma,$$
$$nF - nE + nV - B = 2 - 2g.$$

Iz teh enačb očitno sledi

$$g = n(\gamma - 1) + 1 + \frac{B}{2}.$$

□

Trditev 2.10. *Naj bo $H \subseteq \operatorname{Aut} M$ končna podgrupa grupe avtomorfizmov Riemannove ploskve M. Tedaj je podgrupa $H_P = \{h \in H \mid h(P) = P\}$ ciklična.*

Dokaz. Dokazali bomo, da obstaja enostavno povezana množica D, ki je invariantna za H_P – za vsak $h \in H_P$ torej velja $h(D) = D$. Po Riemannovem upodobitvenem izreku namreč tedaj obstaja biholomorfna preslikava $f\colon D \to \mathbb{A}$, za katero velja $f(P) = 0$. Avtomorfizmi diska $f \circ h \circ f^{-1}$ so torej rotacije, vsaka končna grupa rotacij pa je ciklična.

Opazujmo avtomorfizme v lokalni koordinati točke P. Pokažimo, da vsak element $h \in H_P$ slika dovolj majhne diske v konveksne množice. Dovolj je pokazati, da dovolj majhne krožnice slika v konveksne krivulje, oziroma da je argument smeri tangentnega vektorja na sliko krožnice monotona.

Tangentni vektor v točki z na sliko krožnice z radijem $r = |z|$ dobimo kot

$$h'(z) \cdot \frac{z}{|z|} \cdot i,$$

kar pomeni, da je njegov argument enak

$$\arg h'(z) + \arg(z) + \frac{\pi}{2}.$$

Dokazujemo torej, da je

$$\arg\left(h'\left(r\cdot e^{i\varphi}\right)\right)+\varphi$$

naraščajoča funkcija v φ za vse dovolj majhne r, ker pa lahko lokalno definiramo[6]

$$\arg(z)=\operatorname{Im}(\log(z)),$$

je dovolj pokazati, da je

$$\varphi+\operatorname{Im}\left(\log\left(h'\left(r\cdot e^{i\varphi}\right)\right)\right)$$

naraščajoča. Njen odvod je enak kar

$$1+\operatorname{Im}\left(\frac{h''\left(r\cdot e^{i\varphi}\right)}{h'\left(r\cdot e^{i\varphi}\right)}\cdot r\cdot i\cdot e^{i\varphi}\right)=1+\operatorname{Re}\left(\frac{z\cdot h''(z)}{h'(z)}\right),$$

kar je za dovolj majhne z zaradi zveznosti seveda pozitivno.

Sedaj naj bo $r>0$ tako realno število, da je $h(\mathbb{\Delta}(r))$ konveksna za vse $h\in H_P$. Tedaj je

$$D=\bigcup_{h\in H_P}h(\mathbb{\Delta}(r))$$

konveksna množica, zato je enostavno povezana. □

Definicija 2.11. Naj bo $H\subseteq\operatorname{Aut}M$ končna podgrupa grupe avtomorfizmov Riemannove ploskve M. Na množici ${M}/{H}$ uvedemo kompleksno strukturo na naslednji način:

i) Če je grupa $H_P=\{h\in H\mid h(P)=P\}$ trivialna, lokalna karta na dovolj majhni okolici P inducira lokalno karto pri $\pi(P)$.

ii) Če je v lokalni koordinati H_P generirana s preslikavo $z\mapsto e^{\frac{2\pi i}{k}}z$, za lokalno karto točke P vzamemo z^k.

Prepričamo se lahko, da so te lokalne karte med seboj kompatibilne. Na kvocientu ${M}/{H}$ smo torej dobili kompleksno strukturo, zato je to Riemannova ploskev. Opazimo še, da je kvocientna projekcija $\pi\colon M\to{M}/{H}$ holomorfna.

2.2 Riemann-Rochov izrek

Definicija 2.12. *Divizor* na Riemannovi ploskvi M je formalni simbol

$$\mathfrak{A}=\prod_{P\in M}P^{\alpha(P)},$$

kjer za vsak P velja $\alpha(P)\in\mathbb{Z}$ in je $\alpha(P)\neq 0$ za kvečjemu končno mnogo točk $P\in M$. *Stopnja* divizorja $\mathfrak{A}$ je definirana kot

$$\deg\mathfrak{A}=\sum_{P\in M}\alpha(P).$$

[6] Ker je h avtomorfizem, velja $h'(z)\neq 0$.

Divizorji na M tvorijo grupo za naravno definirano množenje – to grupo označimo z $\mathrm{Div}(M)$. Tako je $\deg\colon \mathrm{Div}(M) \to \mathbb{Z}$ homomorfizem grup.

Za vsako neničelno meromorfno funkcijo $f \in \mathscr{K}(M)$ definiramo njen *glavni divizor* kot[7]

$$(f) = \prod_{P \in M} P^{\operatorname{ord}_P f}.$$

Definiramo lahko še *divizor polov*

$$f^{-1}(\infty) = \prod_{P \in M} P^{\max(-\operatorname{ord}_P f, 0)}$$

in *divizor ničel*

$$f^{-1}(0) = \prod_{P \in M} P^{\max(\operatorname{ord}_P f, 0)}.$$

Opazimo, da velja

$$(f) = \frac{f^{-1}(0)}{f^{-1}(\infty)}.$$

Na divizorjih uvedemo ekvivalenčno relacijo $\sim$ na naslednji način:

$$\mathfrak{A} \sim \mathfrak{B} \iff \mathfrak{A}\mathfrak{B}^{-1} = (f).$$

Lema 2.13. *Naj bo M kompaktna Riemannova ploskev. Za vsako neničelno funkcijo $f \in \mathscr{K}(M)$ velja* $\deg f^{-1}(0) = \deg f^{-1}(\infty)$. *Ekvivalentno je* $\deg(f) = 0$.

Dokaz. Stopnja divizorja polov funkcije f je natanko število njenih polov, štetih z večkratnostmi, stopnja divizorja ničel pa število njenih ničel. Ti števili sta enaki po trditvi 2.6. □

Posebej velja opomniti, da to pomeni, da imajo funkcije na kompaktnih Riemannovih ploskvah enako število ničel in polov (štetih z večkratnostmi).

Na divizorjih lahko uvedemo relacijo delne urejenosti kot

$$\prod_{P \in M} P^{\alpha(P)} \geq \prod_{P \in M} P^{\beta(P)} \iff \forall P \in M\colon \alpha(P) \geq \beta(P).$$

Pravimo, da je divizor $\mathfrak{A}$ *efektiven*, če velja $\mathfrak{A} \geq 1$. Ni težko videti, da je za vsak divizor $\mathfrak{A}$ na M množica

$$L(\mathfrak{A}) = \{f \in \mathscr{K}(M) \mid (f) \geq \mathfrak{A}\}$$

vektorski prostor – njegovo dimenzijo označimo z $r(\mathfrak{A})$.

Zgled 2.14. Velja $r(1) = 1$. Pogoj $(f) \geq 1$ je namreč ekvivalenten temu, da je f holomorfna. Ker so vse holomorfne funkcije na kompaktnih Riemannovih ploskvah konstantne, je zato $L(1) \cong \mathbb{C}$, kar je enodimenzionalen prostor. ♢

Zgled 2.15. Če je $\deg \mathfrak{A} > 0$, je $r(\mathfrak{A}) = 0$. Iz neenakosti $(f) \geq \mathfrak{A}$ za neničenlno funkcijo f namreč sledi $0 = \deg(f) \geq \deg \mathfrak{A} > 0$, kar je protislovje. ♢

[7]Glavne divizorje na enak način definiramo še za meromorfne diferenciale.

Podobno je tudi

$$\Omega(\mathfrak{A}) = \{\omega \mid \omega \text{ je meromorfen diferencial} \wedge (\omega) \geq \mathfrak{A}\}$$

vektorski prostor. Označimo $i(\mathfrak{A}) = \dim \Omega(\mathfrak{A})$.

Trditev 2.16. *Naj bo $\mathfrak{A}$ poljuben divizor in ω meromorfen diferencial. Tedaj je*

$$i(\mathfrak{A}) = r\left(\mathfrak{A}(\omega)^{-1}\right).$$

Dokaz. Naj bo $\varphi\colon \Omega(\mathfrak{A}) \to L\left(\mathfrak{A}(\omega)^{-1}\right)$ preslikava s predpisom $\varphi\colon \zeta \mapsto \frac{\zeta}{\omega}$. Seveda je predpis dobro definiran, ni pa težko videti, da je to izomorfizem vektorskih prostorov. Sledi, da imata enako dimenzijo. □

Izrek 2.17 (Riemann-Roch)**.** *Naj bo M kompaktna Riemannova ploskev roda g in $\mathfrak{A}$ divizor na M. Tedaj velja*

$$r\left(\mathfrak{A}^{-1}\right) = \deg \mathfrak{A} - g + 1 + i(\mathfrak{A}).$$

Dokaz izreka najdemo v [2, theorem III.4.11].

Zgled 2.18. Z uporabo zgornjega izreka lahko izračunamo $i(1)$. Velja namreč

$$i(1) = r(1) - \deg 1 + g - 1 = g.$$ ♢

Trditev 2.19. *Naj bo $\deg \mathfrak{A} > 2g - 2$. Tedaj je $i(\mathfrak{A}) = 0$.*

Dokaz. Naj bo $\omega \in i(1)$ neničelna holomorfen diferencial. Tedaj je

$$r\left((\omega)^{-1}\right) = \deg(\omega) - g + 1 + i\left((\omega)\right).$$

Po trditvi 2.16 je $r\left((\omega)^{-1}\right) = i(1) = g$ in $i\left((\omega)\right) = r(1) = 1$. Od tod sledi, da je $\deg(\omega) = 2g - 2$.

Sedaj dobimo

$$i(\mathfrak{A}) = r\left(\mathfrak{A}(\omega)^{-1}\right) = 0,$$

saj je $\deg\left(\mathfrak{A}(\omega)^{-1}\right) > 0$. □

2.3 Weierstrassove točke

Izrek 2.20 (Weierstrass)**.** *Naj bo M ploskev roda $g > 0$ in $P \in M$. Tedaj obstaja natanko g števil*

$$1 = n_1 < n_2 < \cdots < n_g < 2g,$$

za katera ne obstaja funkcija $f \in \mathscr{K}(M)$, ki je holomorfna na $M \setminus \{P\}$ in ima pol reda n_j v P. Tem številom pravimo GAP.

Dokaz. Najprej opazimo, da je število n GAP natanko tedaj, ko je $r(P^{-n}) = r(P^{1-n})$. Ker je $r(P^{-n}) \leq r(P^{1-n}) + 1$, število n ni GAP natanko tedaj, ko velja

$$r\left(P^{-n}\right) - r\left(P^{1-n}\right) = 1.$$

Po Riemann-Rochovem izreku velja

$$r\left(P^{-k}\right) = k - g + 1 + i\left(P^{k}\right),$$

zato sledi

$$\begin{aligned} r\left(P^{-n}\right) - r(1) &= \sum_{k=1}^{n}\left(r\left(P^{-k}\right) - r\left(P^{1-k}\right)\right) \\ &= \sum_{k=1}^{n}\left(1 + i\left(P^{k}\right) - i\left(P^{k-1}\right)\right) \\ &= n + i\left(P^{n}\right) - i(1). \end{aligned}$$

Ker je $i(1) = g$ in za vse $n > 2g - 2$ velja $i(P^n) = 0$, sledi

$$r\left(P^{-n}\right) - 1 = n - g.$$

Opazimo, da leva stran šteje ravno število NEGAPOV $\leq n$. Sledi, da je GAPOV natanko g in so vsi strogo manjši od $2g$. □

Izkaže se, da je lažje analizirati komplement tega zaporedja, torej števila

$$1 < \alpha_1 < \cdots < \alpha_g = 2g,$$

za katera obstaja funkcija s polom reda α_j v P. Če sta števili α_i in α_j NEGAPA, je tako tudi število $\alpha_i + \alpha_j$, saj lahko vzamemo kar produkt pripadajočih funkcij. Posebej je vsak večkratnik NEGAPA spet NEGAP. Če je $\alpha_1 = 2$, so tako vsa soda števila NEGAPI in GAPI natanko liha števila, manjša od $2g$.

Lema 2.21. *Za vsako naravno število $j < g$ velja*

$$\alpha_j + \alpha_{g-j} \geq 2g.$$

Dokaz. Denimo, da je $\alpha_j + \alpha_{g-j} < 2g$. Tedaj so vsa števila $\alpha_k + \alpha_{g-j}$ za $k \leq j$ NEGAPI, manjši od $2g$. Tako imamo skupaj vsaj $g - j + j + 1 = g + 1$ NEGAPOV, manjših od $2g$. To je seveda protislovje. □

Lema 2.22. *Velja neenakost*

$$\sum_{j=1}^{g} \alpha_j \geq g \cdot (g+1)$$

z enakostjo natanko tedaj, ko je $\alpha_1 = 2$.

Dokaz. Za dokaz neenakosti je dovolj uporabiti prejšnjo lemo. Zgornja izraza sta enaka natanko tedaj, ko za vsak $j < g$ velja

$$\alpha_j + \alpha_{g-j} = 2g.$$

Če je število α NEGAP, je tako torej tudi $2g - \alpha$. Opazimo, da je za NEGAPA $\alpha_i < \alpha_j$ tudi $\alpha_i + (2g - \alpha_j)$ NEGAP, zato je tak tudi

$$2g - (\alpha_i + (2g - \alpha_j)) = \alpha_j - \alpha_i.$$

Sledi, da je tudi vsaka razlika NEGAPOV NEGAP. Sledi, da so vsi NEGAPI večkratnik najmanjšega NEGAPA (osnovni izrek o deljenju), kar pa takoj implicira $\alpha_1 = 2$. □

Število n je GAP natanko tedaj, ko je $r\left(P^{-n}\right)=r\left(P^{1-n}\right)$. To je po Riemann-Rochovem izreku ekvivalentno $i\left(P^{n-1}\right)-i\left(P^{n}\right)=1$. Sledi, da imajo holomorfni diferenciali na M v točki P lahko red enak le enemu iz števil

$$n_1-1, n_2-1, \ldots, n_g-1.$$

Posebej, obstaja baza $\{\omega_i \mid 1 \leq i \leq g\}$ holomorfnih diferencialov, pri čemer velja $\operatorname{ord}_P \omega_i = n_i - 1$.

Definicija 2.23. TEŽA točke $P \in M$ je vsota

$$\tau(P)=\sum_{j=1}^{g}(n_j-j),$$

kjer so n_j GAPI za P.

Lema 2.24. *Naj bodo φ_1, φ_2, $\ldots$, φ_n meromorfne preslikave s paroma različnim redom v točki $P \in X$. Tedaj za determinanto*

$$\Phi(z)=\det\begin{bmatrix}\varphi_1(z) & \varphi_2(z) & \ldots & \varphi_n(z)\\ \varphi_1'(z) & \varphi_2'(z) & \ldots & \varphi_n'(z)\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ \varphi_1^{(n-1)}(z) & \varphi_2^{(n-1)} & \ldots & \varphi_n^{(n-1)}(z)\end{bmatrix}$$

velja

$$\operatorname{ord}_z \Phi=\sum_{i=1}^{n}\left(\operatorname{ord}_z \varphi_i - i + 1\right).$$

Dokaz. Za lažji zapis pišimo

$$\Phi(z)=\det\begin{bmatrix}\varphi_1(z) & \ldots & \varphi_n(z)\end{bmatrix}.$$

Trditev dokažemo z indukcijo – trditev očitno velja za $n=1$. Za indukcijski korak si bomo pomagali z dejstvom, da za vsako meromorfno funkcijo f velja

$$\Phi_f=\det\begin{bmatrix}f\cdot\varphi_1(z) & \ldots & f\cdot\varphi_n(z)\end{bmatrix}=f^n\cdot\det\begin{bmatrix}\varphi_1(z) & \ldots & \varphi_n(z)\end{bmatrix}.$$

Razpišemo lahko namreč

$$\Phi_f=\det\begin{bmatrix}f\varphi_1 & \ldots & f\varphi_n\\ f\varphi_1'+f'\varphi_1 & \ldots & f\varphi_n'+f'\varphi_n\\ \vdots & & \vdots\\ f\varphi_1^{(n-1)}+\cdots+f^{(n-1)}\varphi_1 & \ldots & f\varphi_n^{(n-1)}+\cdots+f^{(n-1)}\varphi_n\end{bmatrix}.$$

S preprostimi linearnimi kombinacijami lahko sedaj dobimo

$$\Phi_f=\det\begin{bmatrix}f\varphi_1 & \ldots & f\varphi_n\\ f\varphi_1' & \ldots & f\varphi_n'\\ \vdots & & \vdots\\ f\varphi_1^{(n-1)} & \ldots & f\varphi_n^{(n-1)}\end{bmatrix}=f^n\Phi.$$

Tako dobimo

$$\det\left[\varphi_1 \quad \ldots \varphi_n\right] = \varphi_1^n \cdot \det\left[1 \quad \tfrac{\varphi_2}{\varphi_1} \quad \ldots \quad \tfrac{\varphi_n}{\varphi_1}\right] = \varphi_1^n \cdot \det\left[\left(\tfrac{\varphi_2}{\varphi_1}\right)' \quad \ldots \quad \left(\tfrac{\varphi_n}{\varphi_1}\right)'\right].$$

Ker za vsak i velja $\operatorname{ord}_z \varphi_1 \neq \operatorname{ord}_z \varphi_i$, sledi

$$\operatorname{ord}_z \left(\frac{\varphi_i}{\varphi_1}\right)' = \operatorname{ord}_z \varphi_i - \operatorname{ord}_z \varphi_1 - 1.$$

To so paroma različna števila, zato lahko uporabimo indukcijsko predpostavko. Dobimo

$$\begin{aligned}
\operatorname{ord}_z \Phi &= n \cdot \operatorname{ord}_z \varphi_1 + \sum_{i=2}^{n} \left(\operatorname{ord}_z \varphi_i - \operatorname{ord}_z \varphi_1 - 1 - (i-2)\right) \\
&= \operatorname{ord}_z \varphi_1 + \sum_{i=2}^{n} \left(\operatorname{ord}_z \varphi_i - i + 1\right) \\
&= \sum_{i=1}^{n} \left(\operatorname{ord}_z \varphi_i - i + 1\right).
\end{aligned}$$

□

Posledično lahko zapišemo $\tau(P) = \operatorname{ord}_P \Phi$, pri čemer za φ_i vzamemo kar ω_i.

Trditev 2.25. *Naj bo M kompaktna Riemannova ploskev z rodom $g \geq 2$. Tedaj je*

$$\sum_{P \in M} \tau(P) = g^3 - g.$$

Dokaz. Pokažimo, da je zgoraj definiran Φ holomorfen m-diferencial za $m = \frac{g\cdot(g+1)}{2}$. Denimo, da ω_i priredi okolici U karto φ, okolici V pa karto ψ, f pa naj bo prehodna preslikava. Tako velja

$$\psi(f(z))f'(z) = \varphi(z),$$

dokazujemo pa

$$f'(z)^m \cdot \det\left[\psi_1 \quad \ldots \quad \psi_g\right] = \det\left[\varphi_1 \quad \ldots \quad \varphi_g\right].$$

Velja pa

$$\begin{aligned}
\det\left[\varphi_1 \quad \ldots \quad \varphi_g\right] &= \det\left[(\psi_1 \circ f)\cdot(f') \quad \ldots \quad (\psi_g \circ f)\cdot(f')\right] \\
&= (f')^g \cdot \det\left[\psi_1 \circ f \quad \ldots \quad \psi_g \circ f\right].
\end{aligned}$$

Po pravilu odvoda kompozituma lahko iz vrstice i izpostavimo še $(f')^{i-1}$. Tako dobimo

$$\det\left[\varphi_1 \quad \ldots \quad \varphi_g\right] = (f')^m \cdot \left(\det\left[\psi_1 \quad \ldots \quad \psi_g\right] \circ f\right).$$

Spomnimo se, da za meromorfen diferencial ω velja $\deg(\omega) = 2g-2$. Ker je $\frac{\omega^m}{\Phi}$ meromorfna funkcija, sledi

$$\deg(\Phi) = m \cdot \deg(\omega) = m \cdot (2g-2).$$

Tako je

$$\sum_{P\in M} \tau(P) = \sum_{P \in M} \operatorname{ord}_P \Phi = (g-1)\cdot g \cdot (g+1).$$

□

Definicija 2.26. Točka $P \in M$ je *Weierstrassova točka*, če na M obstaja neničelna holomorfen diferencial z ničlo reda vsaj g v P.[8]

Trditev 2.27. *Ekvivalentno, vsaj eno izmed števil* $2, \ldots, g$ *ni GAP.*

Dokaz. Obstoj diferencialne 1-forme z ničlo reda vsaj g v P je ekvivalentna pogoju $i(P^g) > 0$. Po Riemann-Rochovem izreku je ta neenakost ekvivalentna

$$r\left(P^{-g}\right) - 1 > 0,$$

oziroma $r\left(P^{-g}\right) \geq 2$. Ker je $r(1) = 1$, med $2, \ldots, g$ obstaja število, ki ni GAP. □

Trditev 2.28. *Naj bo* M *kompaktna Riemannova ploskev roda* $g \geq 2$. *Tedaj za število* w *Weierstrassovih točk veljata oceni*

$$2g + 2 \leq w \leq g^3 - g.$$

Dokaz. Ker je $\tau(P) \geq 1$ za vsako Weierstrassovo točko in velja

$$\sum_{P \in M} \tau(P) = g^3 - g,$$

takoj sledi $w \leq g^3 - g$. Velja pa

$$\begin{aligned}
\tau(P) &= \sum_{j=1}^{g} (n_j - j) \\
&= \sum_{j=1}^{2g} j - \sum_{j=1}^{g} \alpha_j - \sum_{j=1}^{g} j \\
&= g(2g+1) - \frac{g(g+1)}{2} - \sum_{j=1}^{g-1} \alpha_j \\
&\leq g(2g+1) - \frac{g(g+1)}{2} - g(g+1) \\
&= \frac{g(g-1)}{2}.
\end{aligned}$$

Posledično je res $w \geq 2g + 2$. □

2.4 Hipereliptične ploskve

Definicija 2.29. Kompaktna Riemannova ploskev M je *hipereliptična*, če obstaja nekonstantna meromorfna funkcija $f \colon M \to \widehat{\mathbb{C}}$ z natanko dvema poloma.[9]

Ekvivalentno to pomeni, da obstaja tak efektiven divizor $D \in \operatorname{Div} M$, da je $\deg D = 2$ in $r(D^{-1}) \geq 2$.

Trditev 2.30. *Weierstrassove ploskve imajo natanko* $2g + 2$ *BRANCH točk.*

[8] V splošnem definiramo q-Weierstrassove točke – obstaja q-diferencial z ničlo reda vsaj $\dim \mathscr{H}^q(M)$.

[9] Pri tem pole štejemo z večkratnostmi.

Dokaz. Po izreku 2.9 velja

$$g = 2 \cdot (0-1) + 1 + \frac{B}{2}. \qquad \square$$

Trditev 2.31. *BRANCH točke preslikave f so natanko Weierstrassove točke ploskve M.*

Dokaz. Naj bo $P \in M$ BRANCH točka. Če je P pol funkcije f, je njegova stopnja tako enaka 2. V nasprotnem primeru ima funkcija

$$g \equiv \frac{1}{f - f(P)}$$

pol stopnje 2 v P. V obeh primerih sledi, da 2 ni GAP za točko P, zato je ta Weierstrassova.

Vsaka BRANCH točka ima tako TEŽO

$$\sum_{k=1}^{g}(2k-1) - \sum_{k=1}^{g} k = \frac{1}{2}g(g-1),$$

zato je njihova skupna teža $g^3 - g$. Sledi, da so to vse Weierstrassove točke. $\square$

Lema 2.32. *Naj bo P Weierstrassova točka hipereliptične ploskve M in $f \in \mathscr{K}(M)$ funkcija stopnje 2. Tedaj velja $f^{-1}(\infty) \sim P^2$.*

Dokaz. Točka P je BRANCH točka funkcije f. Če je P pol te funkcije, je zato reda 2 in je $f^{-1}(\infty) = P^2$. V nasprotnem primeru definiramo funkcijo

$$g = \frac{1}{f - f(P)}.$$

Ni težko videti, da je $(g) = f^{-1}(\infty)P^{-2}$. $\square$

Trditev 2.33. *Naj bosta f in g dve funkciji $f\colon M \to \widehat{\mathbb{C}}$ stopnje 2. Tedaj obstaja Möbiusova transformacija A, za katero je*

$$g = A \circ f.$$

Dokaz. Naj bo $f^{-1}(\infty) = P_1Q_1$ in $g^{-1}(\infty) = P_2Q_2$. Ker na M ne obstajajo funkcije stopnje 1, sledi $r(P_1^{-1}Q_1^{-1}) = r(P_2^{-1}Q_2^{-1}) = 2$. Prostora $L(P_1^{-1}Q_1^{-1})$ in $L(P_2^{-1}Q_2^{-1})$ imata tako zaporedoma bazi $\{1, f\}$ in $\{1, g\}$. Ker za Weierstrassovo točko P velja $P_1Q_1 \sim P^2 \sim P_2Q_2$, sledi, da obstaja meromorfna preslikava h, za katero je $(h) = P_1Q_1P_2^{-1}Q_2^{-1}$. Ker je s predpisom $\varphi \mapsto h \cdot \varphi$ očitno podan izomorfizem prostorov $L(P_1^{-1}Q_1^{-1})$ in $L(P_2^{-1}Q_2^{-1})$, obstajajo konstante α, β, γ in δ, za katere je

$$1 = \alpha h + \beta h f \quad \text{in} \quad g = \gamma h + \delta h f.$$

Tako lahko izrazimo

$$g = \frac{\gamma + \delta f}{\alpha + \beta f}. \qquad \square$$

Trditev 2.34. *Naj bo M kompaktna Riemannova ploskev roda g. Tedaj je M hipereliptična natanko tedaj, ko obstaja involucija $J \in \operatorname{Aut} M$ z natanko $2g+2$ fiksnimi točkami.*

Dokaz. Predpostavimo najprej, da je M hipereliptična. Naj bo $f\colon M \to \widehat{\mathbb{C}}$ meromorfna funkcija stopnje 2. Za vsak $P \in M$ tako obstaja še ena točka $Q \in M$, za katero je $f(P) = f(Q)$ (če je $\operatorname{ord}_P f = 2$, vzamemo $Q = P$). Tako lahko enostavno definiramo $J(P) = Q$. Ni težko videti, da je J res involucija z $2g+2$ fiksnimi točkami.

Če je $Q = J(P) \neq P$, lahko na okolici U_Q točke Q zapišemo

$$J(X) = \left(f|_{U_Q}\right)^{-1}(f(X)),$$

zato je J holomorfna na $M \setminus W$. Če pa je $J(P) = P$, pa je $h = \sqrt{f - f(P)}$ lokalna koordinata, za katero velja $J(h) = -h$, saj je

$$f(P_h) = h^2 + f(P) = (-h)^2 + f(P) = f(P_{-h}).$$

Tako je J holomorfna tudi na W.

Predpostavimo sedaj, da obstaja involucija $J \in \operatorname{Aut} M$ z $2g+2$ fiksnimi točkami. Ker se projekcija $f\colon M \to M/\langle J\rangle$ BRANCHA v natanko $2g+2$ točkah, po izreku 2.9 sledi, da je rod ploskve $M/\langle J\rangle$ enak 0. Sledi, da je $M/\langle J\rangle \cong \widehat{\mathbb{C}}$, zato je f meromorfna funkcija z dvema poloma. □

Opazimo, da so fiksne točke hipereliptične involucije natanko Weierstrassove točke.

Trditev 2.35. *Naj bo M hipereliptična Riemannova ploskev roda $g \geq 2$ in $T \in \operatorname{Aut} M$. Če je $T \notin \langle J\rangle$, ima T kvečjemu 4 fiksne točke.*

Dokaz. Naj bo $f\colon M \to \widehat{\mathbb{C}}$ funkcija z natanko dvema poloma. Tedaj je taka tudi $f \circ T$, zato obstaja Möbiusova transformacija A, za katero je

$$f \circ T = A \circ f.$$

Naj bo P fiksna točka avtomorfizma T. Sledi, da je

$$A(f(P)) = f(T(P)) = f(P),$$

zato je $f(P)$ fiksna točka preslikave A. Opazimo, da je $A \neq \mathrm{id}$, saj bi v nasprotnem primeru veljalo $f \circ T = f$, kar implicira $T \in \langle J\rangle$. Tako ima A kvečjemu 2 fiksni točki, zato jih ima T največ 4. □

3 Avtomorfizmi Riemannovih poloskev

3.1 Sfere in torusi

Za določanje grupe avtomorfizmov Riemannovih ploskev so pomembne njihove topološke lastnosti – vsak avtomorfizem je namreč tudi homeomorfizem. Iz geometrijske topologije vemo, da je vsaka orientabilna kompaktna ploskev homeomorfna vsoti g torusov. Številu g pravimo rod ploskve.

Najprej si oglejmo ploskve z ničelnim rodom – topološko so to kar sfere. V prejšnjih razdelkih smo ugotovili, da je grupa avtomorfizmov Riemannove sfere enaka

$$\operatorname{Aut}\left(\widehat{\mathbb{C}}\right) = \left\{ \frac{az+b}{cz+d} \;\middle|\; ad - bc = 1 \right\}.$$

Vemo pa, da je grupa avtomorfizmov odvisna ne samo od topoloških lastnosti objekta, ampak tudi njegove kompleksne strukture.

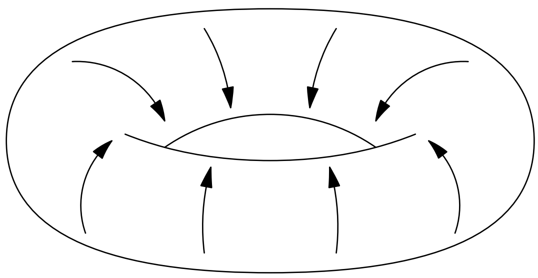
Naslednji izziv so ploskve z rodom $g = 1$ – torusi. Za toruse IZREK ne velja, zato imamo več različnih grup avtomorfizmov.

Topološko je torus kvocient $\mathbb{R}^2/\mathbb{Z}^2$, pri čemer $\mathbb{Z}^2$ deluje na $\mathbb{R}^2$ s predpisom $(m, n) \cdot (x, y) = (x + m, y + n)$. Množico $\mathbb{R}^2$ lahko seveda enačimo s $\mathbb{C}$. Delovanje grupe $\mathbb{Z}^2$ je povsem nezvezno in brez negibnih točk, zato je kvocient $\mathbb{C}/\mathbb{Z}^2$ spet kompleksna mnogoterost (VIR). Tako smo dobili kompleksno strukturo na torusu.

Seveda pa lahko za delovanje grupe $\mathbb{Z}^2$ vzamemo tudi kak drug predpis, na primer $(m, n) \cdot z = z + m\lambda + n\mu$ za $\mathbb{R}$-linearno neodvisna $\lambda, \mu \in \mathbb{C}$. Topološko spet dobimo enak prostor ne glede na izbiro $\lambda, \mu \in \mathbb{C} \setminus \mathbb{R}$, izkaže pa se, da tako dobimo bistveno različne kompleksne strukture. To lahko dokažemo tako, da poiščemo grupe avtomorfizmov.

Naj bo $\Lambda = \{m\lambda + n\mu \mid m, n \in \mathbb{Z}\}$, torej neka mreža v ravnini. Kompleksen torus, generiran s to mrežo, označimo s $\mathbb{C}/\Lambda$.

Najprej si oglejmo primere preprostih avtomorfizmov, ki jih najdemo na vsakem torusu. Najpreprostejša geometrijska transformacija torusa je kar rotacija – v krovnem prostoru to ustreza preslikavi $z \mapsto z + r \cdot \lambda$ za realno število r. Obstaja pa še ena vrsta rotacije, pri kateri se torus rotira »sam vase«. To so še preslikave $z \mapsto z + r \cdot \mu$. Skupaj tako dobimo množico preslikav $z \mapsto z + \alpha$ za poljuben $\alpha \in \mathbb{C}$.



Slika 5: Rotacija torusa

Preslikave oblike

$$f(z + \Lambda) = z + \alpha + \Lambda$$

so res avtomorfizmi torusa, saj so očitno dobro definirane in imajo inverz

$$f^{-1}(z + \Lambda) = z - \alpha + \Lambda.$$

oba sta seveda holomorfna, saj je kompleksna struktura na torusu podedovana iz kompleksne ravnine. Opazimo še, da je tudi $f(z+\Lambda) = -z+\Lambda$ avtomorfizem torusa. To nas privede do naslednje trditve:

Trditev 3.1. *Naj bo* $T \in \operatorname{Aut} \mathbb{C}/_{\Lambda}$ *poljuben avtomorfizem in* $\pi \colon \mathbb{C} \to \mathbb{C}/_{\Lambda}$ *krovna projekcija. Tedaj obstaja taka afina funkcija* $F \colon \mathbb{C} \to \mathbb{C}$*, da velja*

$$T \circ \pi = \pi \circ F.$$

Dokaz. Najprej opazimo, da lahko T razširimo do preslikave $f \colon \mathbb{C} \to \mathbb{C}/_{\Lambda}$ s predpisom $f = T \circ \pi$, kjer je π krovna projekcija. Mnogoterost $\mathbb{C}$ je enostavno povezana, zato po izreku o dvigu preslikave v krov (VIR) obstaja taka holomorfna funkcija $F \colon \mathbb{C} \to \mathbb{C}$, da velja

$$T \circ \pi = \pi \circ F.$$

Naj bo sedaj $\alpha \in \Lambda$ poljubna točka mreže in

$$\Phi(z) = F(z + \alpha) - F(z).$$

Tedaj velja

$$\pi(\Phi(z)) = \pi(F(z + \alpha)) - \pi(F(z)) = T(\pi(z)) - T(\pi(z + \alpha)) = 0.$$

Sledi, da je $\Phi(\mathbb{C}) \subseteq \Lambda$, ker pa je to diskretna množica in Φ zvezna funkcija, sledi, da je Φ konstantna. Tako dobimo $F(z + \alpha) = F(z) + c$ za vsak $a \in \Lambda$, oziroma $F'(z+\alpha) = F'(z)$. To že pomeni, da je F' omejena, zato je po Liouvilleovem izreku konstantna, kar pomeni, da je

$$F(z) = az + b,$$

pri čemer je $a \neq 0$. □

Sedaj si oglejmo, kakšne avtomorfizme take preslikave F dopuščajo. Velja

$$T(z + \Lambda) = T(\pi(z)) = \pi(F(z)) = az + b + \Lambda.$$

Ker že vemo, da so translacije avtomorfizmi, je dovolj preveriti, katere izmed preslikav $T(z + \Lambda) = az + \Lambda$ so avtomorfizmi torusa.

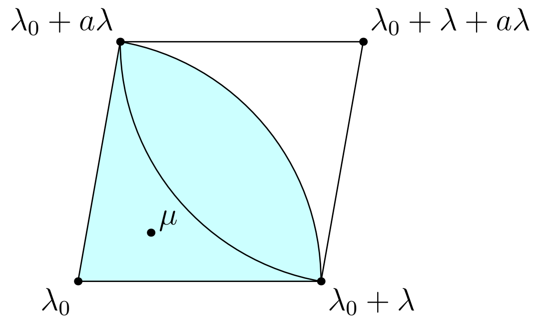
Naj bo $\lambda \in \Lambda$ poljuben element mreže. Tedaj je

$$\Lambda = T(\Lambda) = T(\lambda + \Lambda) = a\lambda + \Lambda,$$

enako pa velja za inverz $T^{-1}(z+\Lambda) = \frac{z}{a} + \Lambda$. Tako sledi, da je $\lambda \in \Lambda$ natanko tedaj, ko je $a\lambda \in \Lambda$. Oglejmo si $\lambda \in \Lambda \setminus \{0\}$ z najmanjšo dolžino. Brez škode za splošnost lahko vzamemo $F(0) = 0$, kar pomeni, da je $a\lambda \in \Lambda \setminus \{0\}$, od koder sledi $|a| \geq 1$. Z enakim premislekom za T^{-1} dobimo še $|a| \leq 1$.

Če je $a = \pm 1$, dobimo avtomorfizme, ki smo jih našteli zgoraj. Sicer sta λ in $a\lambda$ $\mathbb{R}$-linearno neodvisna. Denimo, da mreža Λ ni generirana z λ in $a\lambda$. To pomeni, da obstaja element mreže $\mu \in \Lambda$, ki ga ne moremo izraziti z λ in $a\lambda$. To med drugim pomeni, da μ leži v notranjosti (ali na stranici) nekega romba z oglišči λ_0, $\lambda_0 + \lambda$, $\lambda_0 + \lambda + a\lambda$ in $\lambda_0 + a\lambda$.

Sedaj ni težko videti, da velja $|\lambda_0 - \mu| < |\lambda|$ ali $|\lambda_0 + \lambda + a\lambda - \mu| < |\lambda|$, saj leži v notranjosti enega izmed krožnih izsekov s središčem v λ_0 ali $\lambda_0+\lambda+a\lambda$ in polmerom $|\lambda|$, označenima na sliki 6. To ni mogoče, saj sta tako $\lambda_0 - \mu$ kot $\lambda_0 + \lambda + a\lambda - \mu$ elementa mreže, λ pa je po dolžini najmanjši.



Slika 6: Element mreže ne more ležati v notranjosti romba

Ker je $a\lambda \in \Lambda$, velja tudi $a^2\lambda \in \Lambda$. Tako lahko izrazimo

$$a^2\lambda = ma\lambda + n\lambda,$$

oziroma

$$a^2 = ma + n.$$

To je kvadratna enačba z realnimi koeficienti, zato sta njeni rešitvi a in $\overline{a}$. Po Vietovih formulah tako dobimo $n = 1$ in $|m| \leq 2$. Z obravnavo primerov dobimo

$$a \in \left\{\pm 1, \pm i, e^{\pm \frac{i\pi}{3}}, e^{\pm \frac{2i\pi}{3}}\right\}.$$

3.2 Ploskve večjih rodov

Trditev 3.2. *Naj bo $T \in \operatorname{Aut} M$ netrivialen avtomorfizem. Tedaj ima T največ $2g + 2$ fiksnih točk.*

Dokaz. Naj bo $P \in M$ točka, za katero je $T(P) \neq P$. Tedaj obstaja meromorfna funkcija $f \in \mathscr{K}(M)$ z divizorjem polov P^r za nek $1 \leq r \leq g+1$. Oglejmo si funkcijo $h = f - f \circ T$. Njen divizor polov je očitno $P^r(T^{-1}P)^r$. Velja torej

$$\deg h^{-1}(0) = \deg h^{-1}(\infty) = 2r \leq 2g + 2,$$

zato ima g kvečjemu $2g + 2$ ničel. Ni težko videti, da so njene ničle natanko fiksne točke avtomorfizma T. $\square$

Lema 3.3. *Naj bo M kompaktna Riemannova ploskev roda $g \geq 2$, W pa množica njenih Weierstrassovih točk. Tedaj ta vsak avtomorfizem $T \in \operatorname{Aut} M$ velja $T(W) = W$.*

Dokaz. Avtomorfizmi ohranjajo GAPE. $\square$

Izrek 3.4 (Schwarz)**.** *Grupe avtomorfizmov kompaktnih ploskev roda $g \geq 2$ so končne.*

Dokaz. Po zgornji lemi sledi, da obstaja homomorfizem $\lambda\colon \operatorname{Aut} M \to S_W$, kjer je S_W simetrična grupa. Dovolj je pokazati, da ima λ končno jedro. Ločimo dva primera.

a) Če M ni hipereliptična, ima več kot $2g + 2$ Weierstrassovih točk. Vsak avtomorfizem, ki fiksira Weierstrassove točke, je zato kar identiteta, zato je $\ker \lambda$ trivialno.

b) Če je M hipereliptična, velja kar $\ker \lambda = \langle J \rangle$, kjer je J hipereliptična involucija. Ostali avtomorfizmi imajo namreč kvečjemu 4 fiksne točke. Ker velja $|\langle J \rangle| = 2$, je grupa $\operatorname{Aut} M$ res končna. $\square$

Izrek 3.5 (Hurwitz)**.** *Naj bo M kompaktna Riemannova ploskev roda $g \geq 2$. Tedaj je*

$$|\operatorname{Aut} M| \leq 84(g-1).$$

Dokaz. Ker je $G = \operatorname{Aut} M$ končna grupa, lahko tvorimo kvocient $N = {}^{M}/_{G}$. Naj bo $\pi \colon M \to N$ kvocientna projekcija. Ni težko videti, da je $\deg \pi = |G|$, saj ima vsaka točka P, ki ni fiksna točka nobenega netrivialnega avtomorfizma, orbito velikosti $|G|$. Za preslikavo π so BRANCHING NUMBER enaka $b(P) = |G_P| - 1$, pri čemer označimo $G_P = \{g \in G \mid g(P) = P\}$. Vzemimo maksimalno množico $\{P_j \mid 1 \leq j \leq r\}$ točk, ki so fiksne točke nekega netrivialnega avtomorfizma in imajo disjunktne orbite, in označimo $v_j = \left|G_{P_j}\right|$. Jasno je, da je velikost orbite točke P_j enaka $\frac{|G|}{v_j}$, zato za TOTAL BRANCH NUMBER velja

$$B = \sum_{j=1}^{r} \frac{|G|}{v_j} \cdot (v_j - 1)\,,$$

zato po izreku 2.9 sledi

$$2g - 2 = |G| \cdot (2\gamma - 2) + |G| \cdot \sum_{j=1}^{r} \left(1 - \frac{1}{v_j}\right),$$

kjer je γ rod ploskve N. Preostanek dokaza ločimo na tri primere:

i) Velja $\gamma \geq 2$. V tem primeru mora veljati

$$2g - 2 \geq |G| \cdot 2,$$

od koder dobimo oceno $|G| \leq g - 1$.

ii) Velja $\gamma = 1$. Če je $r = 0$, dobimo $g = 1$, v nasprotnem primeru pa velja

$$\sum_{j=1}^{r} \left(1 - \frac{1}{v_j}\right) \geq \frac{1}{2},$$

od koder sledi $|G| \leq 4(g-1)$.

iii) Velja $\gamma = 0$. Od tod lahko enačbo prepišemo v

$$2g - 2 = |G| \cdot \left(\sum_{j=1}^{r} \left(1 - \frac{1}{v_j}\right) - 2\right). \tag{3.1}$$

Veljati mora $r \geq 3$, saj je v nasprotnem primeru desna stran enačbe negativna. Če je $r \geq 5$, sledi

$$\sum_{j=1}^{r} \left(1 - \frac{1}{v_j}\right) \geq \frac{5}{2},$$

zato je $|G| \leq 4(g-1)$. Enostavno se lahko znebimo tudi primera $r = 4$. V tem primeru namreč ne morejo vsi v_j biti enaki 2, saj bi tedaj desna stran enačbe (3.1) bila negativna. Tako lahko ocenimo

$$\sum_{j=1}^{4} \left(1 - \frac{1}{v_j}\right) \geq 3 \cdot \frac{1}{2} + \frac{2}{3} = \frac{13}{6},$$

zato velja ocena $|G| \leq 12(g-1)$.

Preostane še primer $r = 3$. Naj bo $2 \leq v_1 \leq v_2 \leq v_3$. Najprej opazimo, da je $v_2 \geq 3$, saj bi v nasprotnem primeru desna stran enačbe (3.1) bila negativna. Iz enakega razloga dobimo tudi $v_3 > 3$. Če je $v_3 \geq 7$, tako dobimo

$$\sum_{j=1}^{3} \left(1 - \frac{1}{v_j}\right) \geq \frac{1}{2} + \frac{2}{3} + \frac{6}{7} = \frac{85}{42},$$

od koder dobimo oceno iz trditve izreka, to je $|G| \leq 84(g-1)$.

Preostane nam še možnost $v_3 \leq 6$. Pri vsakem izmed teh končno mnogo primerov dobimo, da je desna stran enačbe (3.1) negativna ali pa sledi ocena $|G| \leq 40(g-1)$. $\square$

Slovar strokovnih izrazov

Riemann surface Riemannova ploskev

Literatura

[1] M. Artin, *Algebra*, Prentice Hall, 1991.

[2] H. M. Farkas in I. Kra, *Riemann surfaces*, **71**, Springer, 1980, bibliografija: str. 330-332.

[3] F. Forstnerič, *Analiza na mnogoterostih*, 2023, [ogled 16. 5. 2023], dostopno na https://users.fmf.uni-lj.si/forstneric/papers/AMbook.pdf, bibliografija: str. 237-239.

[4] S. G. Krantz, *Geometric Function Theory*, Birkhäuser Boston, MA, 1 izd., 2006, doi: https://doi.org/10.1007/0-8176-4440-7, [ogled 7. 5. 2023], dostopno na https://link.springer.com/book/10.1007/0-8176-4440-7, bibliografija: str. 303-306.

[5] R. C. Lyndon in J. L. Ullman, *Groups of elliptic linear fractional transformations*, Proceedings of the American Mathematical Society **18**(6) (1967) 1119–1124, [ogled 11. 6. 2023], dostopno na http://www.jstor.org/stable/2035812.