

# Teoremi di rigidità per funzioni olomorfe nel disco

Scuola Normale Superiore di Pisa



19 Aprile 2021

Candidato: Marco Vergamini

Relatore: Prof. Marco Abate

## Definizione

Data  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D})$ , la *derivata iperbolica* è definita come

$$f^h(w) := \lim_{z \rightarrow w} \frac{\frac{f(z)-f(w)}{1-\overline{f(w)}f(z)}}{\frac{z-w}{1-\bar{w}z}} = \frac{f'(w)(1-|w|^2)}{1-|f(w)|^2}.$$

# Derivata e rapporto iperbolici

## Definizione

Data  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D})$ , la *derivata iperbolica* è definita come

$$f^h(w) := \lim_{z \rightarrow w} \frac{\frac{f(z)-f(w)}{1-\overline{f(w)}f(z)}}{\frac{z-w}{1-\bar{w}z}} = \frac{f'(w)(1-|w|^2)}{1-|f(w)|^2}.$$

## Definizione

Data  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D})$ , il *rapporto iperbolico* è definito come

$$f^*(z, w) := \begin{cases} \frac{\frac{f(z)-f(w)}{1-\overline{f(w)}f(z)}}{\frac{z-w}{1-\bar{w}z}} & \text{per } z \neq w \\ f^h(w) & \text{per } z = w. \end{cases}$$

## Definizione

Dati  $\sigma \in \partial\mathbb{D}$  e  $M > 1$ , chiamiamo *regione di Stolz*  $K(\sigma, M)$  l'insieme  $\left\{ z \in \mathbb{D} \mid \frac{|\sigma - z|}{1 - |z|} < M \right\}$ .

## Definizione

Dati  $\sigma \in \partial\mathbb{D}$  e  $M > 1$ , chiamiamo *regione di Stolz*  $K(\sigma, M)$  l'insieme  $\left\{ z \in \mathbb{D} \mid \frac{|\sigma - z|}{1 - |z|} < M \right\}$ .

Per ogni  $z \in \mathbb{D}$  si ha  $1 \leq \frac{|\sigma - z|}{1 - |z|}$ ; all'interno delle regioni di Stolz vale una sorta di disuguaglianza opposta.

## Definizione

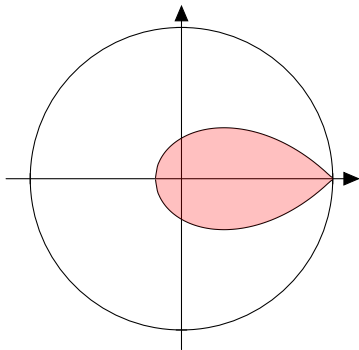
Dati  $\sigma \in \partial\mathbb{D}$  e  $M > 1$ , chiamiamo *regione di Stolz*  $K(\sigma, M)$  l'insieme  $\left\{ z \in \mathbb{D} \mid \frac{|\sigma - z|}{1 - |z|} < M \right\}$ .

Per ogni  $z \in \mathbb{D}$  si ha  $1 \leq \frac{|\sigma - z|}{1 - |z|}$ ; all'interno delle regioni di Stolz vale una sorta di disuguaglianza opposta.

Perciò, all'interno di una data regione, le quantità  $|\sigma - z|$  e  $1 - |z|$  sono vicendevolmente una  $O$ -grande dell'altra.

## Definizione

Dati  $\sigma \in \partial\mathbb{D}$  e  $M > 1$ , chiamiamo *regione di Stolz*  $K(\sigma, M)$  l'insieme  $\left\{ z \in \mathbb{D} \mid \frac{|\sigma - z|}{1 - |z|} < M \right\}$ .



La regione di Stolz  $K(1, 2)$ .

# Limiti non tangenziali

## Definizione

Diciamo che una funzione  $f : \mathbb{D} \longrightarrow \mathbb{C}$  ha *limite non-tangenziale*  $L \in \mathbb{C}$  in  $\sigma \in \partial\mathbb{D}$  e scriviamo

$$\lim_{z \rightarrow \sigma}^{\text{nt}} f(z) = L$$

se per ogni  $M > 1$  si ha  $\lim_{\substack{z \rightarrow \sigma, \\ z \in K(\sigma, M)}} f(z) = L.$



# Limiti non tangenziali

## Definizione

Diciamo che una funzione  $f : \mathbb{D} \longrightarrow \mathbb{C}$  ha *limite non-tangenziale*  $L \in \mathbb{C}$  in  $\sigma \in \partial\mathbb{D}$  e scriviamo

$$\lim_{z \rightarrow \sigma}^{\text{nt}} f(z) = L$$

se per ogni  $M > 1$  si ha  $\lim_{\substack{z \rightarrow \sigma, \\ z \in K(\sigma, M)}} f(z) = L.$

## Definizione

Date tre funzioni  $f, g, h : \mathbb{D} \longrightarrow \mathbb{C}$  scriviamo che  $f(z) = g(z) + o(h(z))$  per  $z \rightarrow \sigma$  *non tangenzialmente* se

$$\lim_{z \rightarrow \sigma}^{\text{nt}} \frac{f(z) - g(z)}{h(z)} = 0.$$

# Limiti non tangenziali

## Definizione

Diciamo che una funzione  $f : \mathbb{D} \longrightarrow \mathbb{C}$  ha *limite non-tangenziale*  $L \in \mathbb{C}$  in  $\sigma \in \partial\mathbb{D}$  e scriviamo

$$\text{nt-}\lim_{z \rightarrow \sigma} f(z) = L$$

se per ogni  $M > 1$  si ha  $\lim_{\substack{z \rightarrow \sigma, \\ z \in K(\sigma, M)}} f(z) = L$ .

## Definizione

Date tre funzioni  $f, g, h : \mathbb{D} \longrightarrow \mathbb{C}$  scriviamo che  $f(z) = g(z) + o(h(z))$  per  $z \rightarrow \sigma$  *non tangenzialmente* se

$$\text{nt-}\lim_{z \rightarrow \sigma} \frac{f(z) - g(z)}{h(z)} = 0.$$

Notiamo che la definizione di limite non tangenziale è più debole di quella di limite classico; nel nostro caso rende il risultato più forte.

## Teorema

(Bracci-Kraus-Roth, 2020) Sia  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D})$  tale che

$$|f^h(z_n)| = 1 + o((|z_n| - 1)^2) \quad (1)$$

per qualche successione  $\{z_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{D}$  con  $|z_n| \rightarrow 1$ . Allora  $f \in \text{Aut}(\mathbb{D})$ .

## Teorema

(Bracci-Kraus-Roth, 2020) Sia  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D})$  tale che

$$|f^h(z_n)| = 1 + o(|z_n| - 1)^2 \quad (1)$$

per qualche successione  $\{z_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{D}$  con  $|z_n| \rightarrow 1$ . Allora  $f \in \text{Aut}(\mathbb{D})$ .

## Teorema

(Burns-Krantz, 1994) Siano  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D})$  e  $\sigma \in \partial\mathbb{D}$  tali che

$$f(z) = \sigma + (z - \sigma) + o((z - \sigma)^3) \quad (2)$$

per  $z \rightarrow \sigma$  non tangenzialmente. Allora  $f$  è l'identità del disco.

# Teoremi di Bracci-Kraus-Roth e di Burns-Krantz

Ricordiamo il lemma di Schwarz-Pick.

# Teoremi di Bracci-Kraus-Roth e di Burns-Krantz

Ricordiamo il lemma di Schwarz-Pick.

## Lemma di Schwarz-Pick

*Sia  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D})$ . Allora per ogni  $z, w \in \mathbb{D}$  si ha*

$$|f^*(z, w)| \leq 1.$$

*Inoltre, se vale l'uguaglianza per  $z_0, w_0 \in \mathbb{D}$  allora  $f \in \text{Aut}(\mathbb{D})$  e vale sempre l'uguaglianza.*

# Teoremi di Bracci-Kraus-Roth e di Burns-Krantz

Ricordiamo il lemma di Schwarz-Pick.

## Lemma di Schwarz-Pick

*Sia  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D})$ . Allora per ogni  $z, w \in \mathbb{D}$  si ha*

$$|f^*(z, w)| \leq 1.$$

*Inoltre, se vale l'uguaglianza per  $z_0, w_0 \in \mathbb{D}$  allora  $f \in \text{Aut}(\mathbb{D})$  e vale sempre l'uguaglianza.*

## Osservazione

I due Teoremi sono risultati di rigidità simili alla parte di unicità del lemma di Schwarz-Pick, ma per un punto sul bordo del disco; lo stesso Lemma è il punto di partenza per la dimostrazione elementare dei Teoremi.

- Useremo il lemma di Schwarz-Pick per derivarne due versioni multipunto; l'idea è che se  $f \notin \text{Aut}(\mathbb{D})$ , allora  $f^*(\cdot, w) \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D})$ .



- Useremo il lemma di Schwarz-Pick per derivarne due versioni multipunto; l'idea è che se  $f \notin \text{Aut}(\mathbb{D})$ , allora  $f^*(\cdot, w) \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D})$ .
- Dalla versione a quattro punti seguirà un Corollario, che avrà a sua volta, come caso particolare, la disuguaglianza di Golusin.

- Useremo il lemma di Schwarz-Pick per derivarne due versioni multipunto; l'idea è che se  $f \notin \text{Aut}(\mathbb{D})$ , allora  $f^*(\cdot, w) \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D})$ .
- Dalla versione a quattro punti seguirà un Corollario, che avrà a sua volta, come caso particolare, la disuguaglianza di Golusin.
- Con Golusin dimostreremo il teorema di Bracci-Kraus-Roth e, sfruttando un risultato sui limiti non tangenziali, ne deriveremo il teorema di Burns-Krantz.

# La distanza di Poincaré

Sia  $p(z, w) = \left| \frac{z - w}{1 - \bar{w}z} \right|$ ; ricordiamo la distanza iperbolica.

# La distanza di Poincaré

Sia  $p(z, w) = \left| \frac{z - w}{1 - \bar{w}z} \right|$ ; ricordiamo la distanza iperbolica.

## Definizione

La *distanza di Poincaré* (o *iperbolica*) sul disco è la funzione  $\omega : \mathbb{D} \times \mathbb{D} \longrightarrow [0, +\infty)$  data da

$$\omega(z, w) := \operatorname{arctanh}(p(z, w)) = \frac{1}{2} \log \left( \frac{1 + p(z, w)}{1 - p(z, w)} \right).$$

# La distanza di Poincaré

Sia  $p(z, w) = \left| \frac{z - w}{1 - \bar{w}z} \right|$ ; ricordiamo la distanza iperbolica.

## Definizione

La *distanza di Poincaré* (o *iperbolica*) sul disco è la funzione  $\omega : \mathbb{D} \times \mathbb{D} \rightarrow [0, +\infty)$  data da

$$\omega(z, w) := \operatorname{arctanh}(p(z, w)) = \frac{1}{2} \log \left( \frac{1 + p(z, w)}{1 - p(z, w)} \right).$$

Per stretta crescenza della tangente iperbolica, in termini di  $\omega$  il lemma di Schwarz-Pick si riscrive come

$$\omega(f(z), f(w)) \leq \omega(z, w).$$

## Definizione

Dati  $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{D}$  e  $\theta \in \mathbb{R}$ , chiamiamo *prodotto di Blaschke* di grado  $n$  la funzione

$$e^{i\theta} \prod_{j=1}^n \frac{z - a_j}{1 - \bar{a}_j z}.$$

Indichiamo con  $\mathcal{B}_n$  i prodotti di Blaschke di grado  $n$ .

## Definizione

Dati  $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{D}$  e  $\theta \in \mathbb{R}$ , chiamiamo *prodotto di Blaschke* di grado  $n$  la funzione

$$e^{i\theta} \prod_{j=1}^n \frac{z - a_j}{1 - \bar{a}_j z}.$$

Indichiamo con  $\mathcal{B}_n$  i prodotti di Blaschke di grado  $n$ .

Notiamo che  $\mathcal{B}_1 = \text{Aut}(\mathbb{D})$ .

# Prodotti di Blaschke

## Definizione

Dati  $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{D}$  e  $\theta \in \mathbb{R}$ , chiamiamo *prodotto di Blaschke* di grado  $n$  la funzione

$$e^{i\theta} \prod_{j=1}^n \frac{z - a_j}{1 - \bar{a}_j z}.$$

Indichiamo con  $\mathcal{B}_n$  i prodotti di Blaschke di grado  $n$ .

Notiamo che  $\mathcal{B}_1 = \text{Aut}(\mathbb{D})$ .

## Proposizione

*Valgono le seguenti:*

- (i) *si ha che  $f \in \mathcal{B}_{n+1}$  se e solo se  $f^*(\cdot, w) \in \mathcal{B}_n$ , con  $w \in \mathbb{D}$  fissato;*
- (ii) *se  $f \in \mathcal{B}_2$  allora esiste un unico punto  $c \in \mathbb{D}$  in cui  $f$  ha molteplicità doppia.*



## Definizione

Dati  $a_1, \dots, a_n \in \mathbb{D}$  e  $\theta \in \mathbb{R}$ , chiamiamo *prodotto di Blaschke* di grado  $n$  la funzione

$$e^{i\theta} \prod_{j=1}^n \frac{z - a_j}{1 - \bar{a}_j z}.$$

Indichiamo con  $\mathcal{B}_n$  i prodotti di Blaschke di grado  $n$ .

Notiamo che  $\mathcal{B}_1 = \text{Aut}(\mathbb{D})$ .

## Proposizione

*Valgono le seguenti:*

- (i) *si ha che  $f \in \mathcal{B}_{n+1}$  se e solo se  $f^*(\cdot, w) \in \mathcal{B}_n$ , con  $w \in \mathbb{D}$  fissato;*
- (ii) *se  $f \in \mathcal{B}_2$  allora esiste un unico punto  $c \in \mathbb{D}$  in cui  $f$  ha molteplicità doppia.*

Data  $f$ , indichiamo con  $R_f$  la rotazione iperbolica attorno a  $c$ .

# Lemma di Schwarz-Pick a tre punti

## Teorema

(Beardon-Minda, 2004) Sia  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D}) \setminus \text{Aut}(\mathbb{D})$ . Allora per ogni  $z, w, v \in \mathbb{D}$  vale

$$\omega(f^*(z, v), f^*(w, v)) \leq \omega(z, w). \quad (3)$$

Si ha l'uguaglianza se e solo se  $f \in \mathcal{B}_2$ .

# Lemma di Schwarz-Pick a tre punti

## Teorema

(Beardon-Minda, 2004) Sia  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D}) \setminus \text{Aut}(\mathbb{D})$ . Allora per ogni  $z, w, v \in \mathbb{D}$  vale

$$\omega(f^*(z, v), f^*(w, v)) \leq \omega(z, w). \quad (3)$$

Si ha l'uguaglianza se e solo se  $f \in \mathcal{B}_2$ .

*Traccia della dimostrazione:* basta applicare il lemma di Schwarz-Pick alla funzione  $f^*(\cdot, v)$ . □

# Lemma di Schwarz-Pick a tre punti

## Teorema

(Beardon-Minda, 2004) Sia  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D}) \setminus \text{Aut}(\mathbb{D})$ . Allora per ogni  $z, w, v \in \mathbb{D}$  vale

$$\omega(f^*(z, v), f^*(w, v)) \leq \omega(z, w). \quad (3)$$

Si ha l'uguaglianza se e solo se  $f \in \mathcal{B}_2$ .

*Traccia della dimostrazione:* basta applicare il lemma di Schwarz-Pick alla funzione  $f^*(\cdot, v)$ . □

## Osservazione

Se  $f(0) = 0$  troviamo  $\omega(f(z)/z, f'(0)) \leq \omega(z, 0)$ . Il disco iperbolico di centro  $f'(0)$  e raggio  $\omega(z, 0)$  è, in generale, strettamente contenuto in  $\mathbb{D}$ .

# Lemma di Schwarz-Pick a quattro punti

## Teorema

*Sia  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D}) \setminus \text{Aut}(\mathbb{D})$ . Allora per ogni  $z, w, v, u \in \mathbb{D}$  vale*

$$\omega(0, f^*(z, v)) \leq \omega(0, f^*(u, w)) + \omega(z, w) + \omega(v, u). \quad (4)$$

*Si ha l'uguaglianza se e solo se  $f \in \mathcal{B}_2$  e  $R_f(v), R_f(u), w$  e  $z$  giacciono sulla stessa geodetica, in quest'ordine.*

# Lemma di Schwarz-Pick a quattro punti

## Teorema

Sia  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D}) \setminus \text{Aut}(\mathbb{D})$ . Allora per ogni  $z, w, v, u \in \mathbb{D}$  vale

$$\omega(0, f^*(z, v)) \leq \omega(0, f^*(u, w)) + \omega(z, w) + \omega(v, u). \quad (4)$$

Si ha l'uguaglianza se e solo se  $f \in \mathcal{B}_2$  e  $R_f(v), R_f(u), w$  e  $z$  giacciono sulla stessa geodetica, in quest'ordine.

*Traccia della dimostrazione:*

$$\omega(0, f^*(z, v)) \leq \omega(0, f^*(w, v)) + \omega(f^*(w, v), f^*(z, v))$$

# Lemma di Schwarz-Pick a quattro punti

## Teorema

Sia  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D}) \setminus \text{Aut}(\mathbb{D})$ . Allora per ogni  $z, w, v, u \in \mathbb{D}$  vale

$$\omega(0, f^*(z, v)) \leq \omega(0, f^*(u, w)) + \omega(z, w) + \omega(v, u). \quad (4)$$

Si ha l'uguaglianza se e solo se  $f \in \mathcal{B}_2$  e  $R_f(v), R_f(u), w$  e  $z$  giacciono sulla stessa geodetica, in quest'ordine.

*Traccia della dimostrazione:*

$$\begin{aligned} \omega(0, f^*(z, v)) &\leq \omega(0, f^*(w, v)) + \omega(f^*(w, v), f^*(z, v)) \\ &\leq \omega(0, f^*(w, v)) + \omega(w, z) \end{aligned}$$

# Lemma di Schwarz-Pick a quattro punti

## Teorema

Sia  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D}) \setminus \text{Aut}(\mathbb{D})$ . Allora per ogni  $z, w, v, u \in \mathbb{D}$  vale

$$\omega(0, f^*(z, v)) \leq \omega(0, f^*(u, w)) + \omega(z, w) + \omega(v, u). \quad (4)$$

Si ha l'uguaglianza se e solo se  $f \in \mathcal{B}_2$  e  $R_f(v), R_f(u), w$  e  $z$  giacciono sulla stessa geodetica, in quest'ordine.

*Traccia della dimostrazione:*

$$\begin{aligned} \omega(0, f^*(z, v)) &\leq \omega(0, f^*(w, v)) + \omega(f^*(w, v), f^*(z, v)) \\ &\leq \omega(0, f^*(w, v)) + \omega(w, z) \\ &= \omega(0, f^*(v, w)) + \omega(w, z) \end{aligned}$$



# Lemma di Schwarz-Pick a quattro punti

## Teorema

Sia  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D}) \setminus \text{Aut}(\mathbb{D})$ . Allora per ogni  $z, w, v, u \in \mathbb{D}$  vale

$$\omega(0, f^*(z, v)) \leq \omega(0, f^*(u, w)) + \omega(z, w) + \omega(v, u). \quad (4)$$

Si ha l'uguaglianza se e solo se  $f \in \mathcal{B}_2$  e  $R_f(v), R_f(u), w$  e  $z$  giacciono sulla stessa geodetica, in quest'ordine.

*Traccia della dimostrazione:*

$$\begin{aligned} \omega(0, f^*(z, v)) &\leq \omega(0, f^*(w, v)) + \omega(f^*(w, v), f^*(z, v)) \\ &\leq \omega(0, f^*(w, v)) + \omega(w, z) \\ &= \omega(0, f^*(v, w)) + \omega(w, z) \\ &\leq \omega(0, f^*(u, w)) + \omega(u, v) + \omega(w, z). \end{aligned}$$



# Lemma di Schwarz-Pick a quattro punti

## Teorema

Sia  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D}) \setminus \text{Aut}(\mathbb{D})$ . Allora per ogni  $z, w, v, u \in \mathbb{D}$  vale

$$\omega(0, f^*(z, v)) \leq \omega(0, f^*(u, w)) + \omega(z, w) + \omega(v, u). \quad (4)$$

Si ha l'uguaglianza se e solo se  $f \in \mathcal{B}_2$  e  $R_f(v), R_f(u), w$  e  $z$  giacciono sulla stessa geodetica, in quest'ordine.

Prendendo  $v = z$  e  $u = w$  otteniamo

$$\omega(0, f^h(z)) \leq \omega(0, f^h(w)) + 2\omega(z, w)$$

## Corollario

*Sia  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D}) \setminus \text{Aut}(\mathbb{D})$ . Allora per ogni  $z, w \in \mathbb{D}$  vale*

$$\omega(|f^h(z)|, |f^h(w)|) \leq 2\omega(z, w). \quad (5)$$

*Si ha l'uguaglianza se e solo se  $f \in \mathcal{B}_2$  e  $z$  e  $w$  giacciono sulla stessa geodetica, passante per il centro di rotazione di  $R_f$ .*

## Corollario

*Sia  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D}) \setminus \text{Aut}(\mathbb{D})$ . Allora per ogni  $z, w \in \mathbb{D}$  vale*

$$\omega(|f^h(z)|, |f^h(w)|) \leq 2\omega(z, w). \quad (5)$$

*Si ha l'uguaglianza se e solo se  $f \in \mathcal{B}_2$  e  $z$  e  $w$  giacciono sulla stessa geodetica, passante per il centro di rotazione di  $R_f$ .*

*Traccia della dimostrazione:*

$$\omega(|f^h(z)|, |f^h(w)|) = \frac{1}{2} \log \left( \frac{1 + \frac{|f^h(z)| - |f^h(w)|}{1 - |f^h(w)||f^h(z)|}}{1 - \frac{|f^h(z)| - |f^h(w)|}{1 - |f^h(w)||f^h(z)|}} \right)$$

## Corollario

Sia  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D}) \setminus \text{Aut}(\mathbb{D})$ . Allora per ogni  $z, w \in \mathbb{D}$  vale

$$\omega(|f^h(z)|, |f^h(w)|) \leq 2\omega(z, w). \quad (5)$$

Si ha l'uguaglianza se e solo se  $f \in \mathcal{B}_2$  e  $z$  e  $w$  giacciono sulla stessa geodetica, passante per il centro di rotazione di  $R_f$ .

*Traccia della dimostrazione:*

$$\begin{aligned} \omega(|f^h(z)|, |f^h(w)|) &= \frac{1}{2} \log \left( \frac{1 + \frac{|f^h(z)| - |f^h(w)|}{1 - |f^h(w)||f^h(z)|}}{1 - \frac{|f^h(z)| - |f^h(w)|}{1 - |f^h(w)||f^h(z)|}} \right) \\ &= \frac{1}{2} \log \left( \frac{1 + |f^h(z)|}{1 - |f^h(z)|} \right) - \frac{1}{2} \log \left( \frac{1 + |f^h(w)|}{1 - |f^h(w)|} \right) \end{aligned}$$

# Conseguenze dei lemmi di Schwarz-Pick multi-punto

## Corollario

Sia  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D}) \setminus \text{Aut}(\mathbb{D})$ . Allora per ogni  $z, w \in \mathbb{D}$  vale

$$\omega(|f^h(z)|, |f^h(w)|) \leq 2\omega(z, w). \quad (5)$$

Si ha l'uguaglianza se e solo se  $f \in \mathcal{B}_2$  e  $z$  e  $w$  giacciono sulla stessa geodetica, passante per il centro di rotazione di  $R_f$ .

Traccia della dimostrazione:

$$\begin{aligned} \omega(|f^h(z)|, |f^h(w)|) &= \frac{1}{2} \log \left( \frac{1 + \frac{|f^h(z)| - |f^h(w)|}{1 - |f^h(w)||f^h(z)|}}{1 - \frac{|f^h(z)| - |f^h(w)|}{1 - |f^h(w)||f^h(z)|}} \right) \\ &= \frac{1}{2} \log \left( \frac{1 + |f^h(z)|}{1 - |f^h(z)|} \right) - \frac{1}{2} \log \left( \frac{1 + |f^h(w)|}{1 - |f^h(w)|} \right) \\ &= \omega(0, f^h(z)) - \omega(0, f^h(w)) \leq 2\omega(z, w). \end{aligned}$$



## Corollario

Sia  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D}) \setminus \text{Aut}(\mathbb{D})$ . Allora per ogni  $z, w \in \mathbb{D}$  vale

$$\omega(|f^h(z)|, |f^h(w)|) \leq 2\omega(z, w). \quad (5)$$

Si ha l'uguaglianza se e solo se  $f \in \mathcal{B}_2$  e  $z$  e  $w$  giacciono sulla stessa geodetica, passante per il centro di rotazione di  $R_f$ .

Prendendo  $w = 0$  e raccogliendo i logaritmi otteniamo

$$\frac{1}{2} \log \left( \frac{1 + |f^h(z)|}{1 - |f^h(z)|} \cdot \frac{1 - |f^h(0)|}{1 + |f^h(0)|} \right) \leq 2\omega(0, z)$$

## Teorema

(disuguaglianza di Golusin, 1945) Sia  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D}) \setminus \text{Aut}(\mathbb{D})$ . Allora per ogni  $z \in \mathbb{D}$  vale

$$|f^h(z)| \leq \frac{|f^h(0)| + \frac{2|z|}{1+|z|^2}}{1 + |f^h(0)| \frac{2|z|}{1+|z|^2}}. \quad (6)$$



## Teorema

(disuguaglianza di Golusin, 1945) Sia  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D}) \setminus \text{Aut}(\mathbb{D})$ . Allora per ogni  $z \in \mathbb{D}$  vale

$$|f^h(z)| \leq \frac{|f^h(0)| + \frac{2|z|}{1+|z|^2}}{1 + |f^h(0)| \frac{2|z|}{1+|z|^2}}. \quad (6)$$

Traccia della dimostrazione:

$$\frac{1}{2} \log \left( \frac{1 + |f^h(z)|}{1 - |f^h(z)|} \cdot \frac{1 - |f^h(0)|}{1 + |f^h(0)|} \right) \leq \log \left( \frac{1 + |z|}{1 - |z|} \right),$$

## Teorema

(disuguaglianza di Golusin, 1945) Sia  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D}) \setminus \text{Aut}(\mathbb{D})$ . Allora per ogni  $z \in \mathbb{D}$  vale

$$|f^h(z)| \leq \frac{|f^h(0)| + \frac{2|z|}{1+|z|^2}}{1 + |f^h(0)| \frac{2|z|}{1+|z|^2}}. \quad (6)$$

Traccia della dimostrazione:

$$\frac{1}{2} \log \left( \frac{1 + |f^h(z)|}{1 - |f^h(z)|} \cdot \frac{1 - |f^h(0)|}{1 + |f^h(0)|} \right) \leq \log \left( \frac{1 + |z|}{1 - |z|} \right),$$

da cui

$$\frac{1 + |f^h(z)|}{1 - |f^h(z)|} \leq \frac{1 + |f^h(0)|}{1 - |f^h(0)|} \left( \frac{1 + |z|}{1 - |z|} \right)^2.$$



## Teorema

(Bracci-Kraus-Roth, 2020) Sia  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D})$  tale che

$$|f^h(z_n)| = 1 + o((|z_n| - 1)^2) \quad (7)$$

per qualche successione  $\{z_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{D}$  con  $|z_n| \rightarrow 1$ . Allora  $f \in \text{Aut}(\mathbb{D})$ .

# Teorema di Bracci-Kraus-Roth

## Teorema

(Bracci-Kraus-Roth, 2020) Sia  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D})$  tale che

$$|f^h(z_n)| = 1 + o((|z_n| - 1)^2) \quad (7)$$

per qualche successione  $\{z_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{D}$  con  $|z_n| \rightarrow 1$ . Allora  $f \in \text{Aut}(\mathbb{D})$ .

*Traccia della dimostrazione:* per assurdo  $f \notin \text{Aut}(\mathbb{D})$ . La disuguaglianza di Golusin si riscrive come

$$\frac{(1 + |f^h(0)|)(1 + |z_n|)^2}{(1 - |f^h(0)|)(1 + |f^h(z_n)|)} (1 - |f^h(z_n)|) \geq (1 - |z_n|)^2.$$

## Teorema

(Bracci-Kraus-Roth, 2020) Sia  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D})$  tale che

$$|f^h(z_n)| = 1 + o((|z_n| - 1)^2) \quad (7)$$

per qualche successione  $\{z_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{D}$  con  $|z_n| \rightarrow 1$ . Allora  $f \in \text{Aut}(\mathbb{D})$ .

*Traccia della dimostrazione:* per assurdo  $f \notin \text{Aut}(\mathbb{D})$ . La disuguaglianza di Golusin si riscrive come

$$\frac{(1 + |f^h(0)|)(1 + |z_n|)^2}{(1 - |f^h(0)|)(1 + |f^h(z_n)|)} (1 - |f^h(z_n)|) \geq (1 - |z_n|)^2.$$

Poiché  $f \notin \text{Aut}(\mathbb{D})$ , per Schwarz-Pick  $|f^h(0)| < 1$  e dunque

## Teorema

(Bracci-Kraus-Roth, 2020) Sia  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D})$  tale che

$$|f^h(z_n)| = 1 + o((|z_n| - 1)^2) \quad (7)$$

per qualche successione  $\{z_n\}_{n \in \mathbb{N}} \subset \mathbb{D}$  con  $|z_n| \rightarrow 1$ . Allora  $f \in \text{Aut}(\mathbb{D})$ .

*Traccia della dimostrazione:* per assurdo  $f \notin \text{Aut}(\mathbb{D})$ . La disuguaglianza di Golusin si riscrive come

$$\frac{(1 + |f^h(0)|)(1 + |z_n|)^2}{(1 - |f^h(0)|)(1 + |f^h(z_n)|)} (1 - |f^h(z_n)|) \geq (1 - |z_n|)^2.$$

Poiché  $f \notin \text{Aut}(\mathbb{D})$ , per Schwarz-Pick  $|f^h(0)| < 1$  e dunque

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{(1 + |f^h(0)|)(1 + |z_n|)^2}{(1 - |f^h(0)|)(1 + |f^h(z_n)|)} = \frac{2(1 + |f^h(0)|)}{1 - |f^h(0)|} < +\infty. \quad \square$$

# Risultato sui limiti non tangenziali

Per poter dimostrare il teorema di Burns-Krantz passando dal teorema di Bracci-Kraus-Roth, dobbiamo vedere che le ipotesi di quest'ultimo siano verificate sotto le ipotesi del primo; la seguente proposizione ci garantisce che è vero.

# Risultato sui limiti non tangenziali

Per poter dimostrare il teorema di Burns-Krantz passando dal teorema di Bracci-Kraus-Roth, dobbiamo vedere che le ipotesi di quest'ultimo siano verificate sotto le ipotesi del primo; la seguente proposizione ci garantisce che è vero.

## Proposizione

*Siano  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D})$  e  $\sigma \in \partial\mathbb{D}$  tali che*

$$f(z) = \sigma + (z - \sigma) + o((z - \sigma)^3)$$

*per  $z \rightarrow \sigma$  non tangenzialmente. Allora*

$$|f^h(z)| = 1 + o((z - \sigma)^2)$$

*per  $z \rightarrow \sigma$  non tangenzialmente.*



## Teorema

(Burns-Krantz, 1994) Siano  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D})$  e  $\sigma \in \partial\mathbb{D}$  tali che

$$f(z) = \sigma + (z - \sigma) + o((z - \sigma)^3) \quad (8)$$

per  $z \rightarrow \sigma$  non tangenzialmente. Allora  $f$  è l'identità del disco.

## Teorema

(Burns-Krantz, 1994) Siano  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D})$  e  $\sigma \in \partial\mathbb{D}$  tali che

$$f(z) = \sigma + (z - \sigma) + o((z - \sigma)^3) \quad (8)$$

per  $z \rightarrow \sigma$  non tangenzialmente. Allora  $f$  è l'identità del disco.

*Traccia della dimostrazione:* senza perdita di generalità  $\sigma = 1$ . Dalla Proposizione sui limiti non tangenziali segue che

$$|f^h(z)| = 1 + o((z - 1)^2)$$

per  $z \rightarrow 1$  non tangenzialmente.

## Teorema

(Burns-Krantz, 1994) Siano  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D})$  e  $\sigma \in \partial\mathbb{D}$  tali che

$$f(z) = \sigma + (z - \sigma) + o((z - \sigma)^3) \quad (8)$$

per  $z \rightarrow \sigma$  non tangenzialmente. Allora  $f$  è l'identità del disco.

*Traccia della dimostrazione:* senza perdita di generalità  $\sigma = 1$ . Dalla Proposizione sui limiti non tangenziali segue che

$$|f^h(z)| = 1 + o((z - 1)^2)$$

per  $z \rightarrow 1$  non tangenzialmente.

Per il teorema di Bracci-Kraus-Roth,  $f \in \text{Aut}(\mathbb{D})$ ; per ipotesi dev'essere  $f(1) = 1$  e  $f''(1) = 0$ , perciò  $f(z) = z$ . □

## Teorema

(Burns-Krantz, 1994) Siano  $f \in \text{Hol}(\mathbb{D}, \mathbb{D})$  e  $\sigma \in \partial\mathbb{D}$  tali che

$$f(z) = \sigma + (z - \sigma) + o((z - \sigma)^3) \quad (8)$$

per  $z \rightarrow \sigma$  non tangenzialmente. Allora  $f$  è l'identità del disco.

## Esempio

Se  $f(z) = \frac{1 + 3z^2}{3 + z^2}$ , si ha  $\lim_{z \rightarrow 1} \frac{f(z) - z}{(z - 1)^3} = -\frac{1}{4}$ ; dunque il termine  $o((z - \sigma)^3)$  nel teorema di Burns-Krantz non è migliorabile.