

# Notatki do Analizy I R

Na podstawie wykładu głoszonoego przez prof. Sołtana w 2023 r.

red. Filip Baciak

November 2023

# 1 Wstęp

## 1.1 Relacje

### Definicja 1.1. Relacja

Relacją  $R$  ze zbioru  $A$  do zbioru  $B$  nazywamy podzbiór iloczynu kartezjańskiego tych dwu zbiorów:

$$R \subseteq A \times B. \quad (1)$$

Jeśli  $(x, y) \in R$  to piszemy  $xRy$ .

### Przykłady relacji:

- Relacja równości  $R \subseteq A \times A$ , zdefiniowana:

$$R = \{(a, a) | a \in A\}. \quad (2)$$

- Na zbiorze  $\mathbb{N}$  mamy relację wewnętrzną (tj. będącą podzbiorem  $\mathbb{N}^2$ ):

$$R = \{(n, m) | n \leq m\}. \quad (3)$$

### Definicja 1.2. Relacja równoważności

Relacją równoważności nazywamy relację  $R \subseteq A \times A$ , spełniającą następujące aksjomaty:

1. Zwrotność:

$$\forall_{x \in A} : xRx. \quad (4)$$

2. Symetryczność:

$$\forall_{x, y \in A} : xRy \implies yRx. \quad (5)$$

3. Przechodność:

$$\forall_{x, y, z \in A} : xRy \wedge yRz \implies xRz. \quad (6)$$

Przykładem relacji równoważności jest relacja  $R_f$  zadana przez funkcję  $f : A \rightarrow B$ :

$$xR_f y \iff f(x) = f(y). \quad (7)$$

### Definicja 1.3. Częściowy porządek

Częściowym porządkiem na zbiorze  $A$  nazywamy relację  $R \subseteq A^2$  (którą oznaczamy  $\leq$  i piszemy  $x \leq y$  zamiast  $xRy$ ), jeśli ma następujące cechy:

1. Zwrotność:

$$\forall_{x \in A} : x \leq x. \quad (8)$$

2. Antysymetryczność:

$$\forall_{x, y \in A} : x \leq y \wedge y \leq x \implies x = y. \quad (9)$$

3. Przechodność:

$$\forall_{x, y, z \in A} : xRy \wedge yRz \implies xRz. \quad (10)$$

Zbiór parę  $(A, \leq)$  nazywamy zbiorem częściowo uporządkowanym.

Na przykład relacja wewnętrzna na zbiorze  $\mathbb{N}^2$  zdefiniowana następująco:

$$(a, b) \leq (a', b') \iff a \leq a' \wedge b \leq b',$$

zadaje częściowy porządek nad  $\mathbb{N}^2$ .

#### Definicja 1.4. Porządek liniowy

Porządek częściowy  $\leq$  nad  $A$  nazywamy **liniowym**, jeśli:

$$\forall x, y \in A : x \leq y \vee x \leq y. \quad (11)$$

Zbiór z określonym porządkiem liniowym nazywamy **uporządkowanym liniowo**. Jeśli  $x \leq y \wedge x \neq y$  to piszemy  $x < y$ .

Zauważmy, że porządek częściowy - jak sama nazwa wskazuje - niekoniecznie określa relację wielkości między każdymi dwoma elementami zbioru na którym jest określony. Tę własność ma dopiero porządek liniowy.

#### Definicja 1.5. Ograniczenia

Podzbiór  $X \subseteq A$  zbioru uporządkowanego liniowo  $(A, \leq)$  nazywamy **ograniczonym z góry**, jeśli:

$$\exists u \in A \forall x \in X : x \leq u. \quad (12)$$

Podobnie definiujemy **ograniczenie z dołu**:

$$\exists l \in A \forall x \in X : l \leq x. \quad (13)$$

Elementy  $u$  i  $l$  nazywamy odpowiednio **ograniczeniem górnym** i **ograniczeniem dolnym**.

#### Definicja 1.6. Kresy górne i dolne

**Kresem górnym** podzbioru  $X \subseteq A$  uporządkowanego  $(A, \leq)$  nazwiemy najmniejsze jego ograniczenie górne, to znaczy taką liczbę  $b \in A$ , że:

- $b$  jest ograniczeniem górnym  $X$ ,
- jeśli  $l$  jest ograniczeniem górnym  $X$ , to  $b \leq l$ .

Podobnie - jako największe ograniczenie dolne - definiujemy **kres dolny**. Kres górny zbioru  $X$  oznaczamy  $\sup X$ , a kres dolny  $\inf X$ .

Zauważmy, że w ogólności zbiór nie musi mieć kresu górnego lub dolnego, a jeśli go ma to kres nie musi być elementem tegoż zbioru.

## 1.2 Liczby rzeczywiste

#### Definicja 1.7. $\mathbb{R}$

**Liczbami rzeczywistymi** nazywamy zbiór  $\mathbb{R}$  z określonymi działaniami dodawania  $+$  i mnożenia  $\cdot$ , wyróżnionymi, różnymi elementami  $0$  i  $1$  i określoną relacją porządku liniowego  $\leq$  - w skrócie  $(\mathbb{R}, +, \cdot, 0, 1, \leq)$  - taki że:

1.  $\mathbb{R}$  jest ciałem, tzn. spełnia:

(a) Zamkniętość dodawania i mnożenia:

$$\forall_{a,b \in \mathbb{R}} : a + b \in \mathbb{R} \wedge a \cdot b \in \mathbb{R}; \quad (14)$$

(b) 0 jest elementem neutralnym dodawania:

$$\forall_{a \in \mathbb{R}} : a + 0 = a; \quad (15)$$

(c) Istnieją elementy odwrotne względem dodawania:

$$\forall_{a \in \mathbb{R}} \exists_{-a \in \mathbb{R}} : a + (-a) = 0; \quad (16)$$

(d) Dodawanie jest łączne:

$$\forall_{a,b,c \in \mathbb{R}} : (a + b) + c = a + (b + c); \quad (17)$$

(e) Dodawanie jest przemienne:

$$\forall_{a,b \in \mathbb{R}} : a + b = b + a; \quad (18)$$

(f) 1 jest elementem neutralnym mnożenia:

$$\forall_{a \in \mathbb{R}} : a \cdot 1 = a; \quad (19)$$

(g) Mnożenie jest łączne:

$$\forall_{a,b,c \in \mathbb{R}} : (a \cdot b) \cdot c = a \cdot (b \cdot c); \quad (20)$$

(h) Mnożenie jest przemienne:

$$\forall_{a,b \in \mathbb{R}} : a \cdot b = b \cdot a; \quad (21)$$

(i) Istnieją elementy przeciwne względem mnożenia (z wyjątkiem 0):

$$\forall_{a \in \mathbb{R} \setminus \{0\}} \exists_{a^{-1} \in \mathbb{R}} : a \cdot a^{-1} = 1; \quad (22)$$

(j) Dodawanie jest rozdzielne względem mnożenia:

$$\forall_{a,b,c \in \mathbb{R}} : a \cdot (b + c) = a \cdot b + a \cdot c. \quad (23)$$

2. Porządek liniowy  $\leq$  spełnia:

(a) Możliwość dodawania "stronami":

$$\forall_{a,b,t \in \mathbb{R}} : a \leq b \implies a + t \leq b + t; \quad (24)$$

(b) Mnożenie dodatnich zachowuje dodatniość

$$\forall_{a,b \in \mathbb{R}} : 0 < a \wedge 0 < b \implies 0 < a \cdot b. \quad (25)$$

3.  $\mathbb{R}$  jest zwarty, tj. każdy niepusty zbiór ograniczony z góry ma kres górny w  $\mathbb{R}$ .

Można podać konstrukcję ciała o podanych własnościach (np. konstrukcja Dedekina, konstrukcja Rie-

mana) i dowieść, że z dokładnością do izomorfizmu istnieje tylko jedno takie ciało.

### Twierdzenie 1.1. Własność Archimedesesa

$$\forall x > 0, y \in \mathbb{R} \exists n \in \mathbb{N} : nx > y. \quad (26)$$

#### Dowód

Twierdzenia dowiedziemy nie wprost:

Niech  $X = nx | n \in \mathbb{N}$  i założmy, że  $X$  jest ograniczony z góry przez  $y$ . Zatem posiada supremum:  $\alpha = \sup X$ . Wiemy, że  $\alpha - x < \alpha$ , więc nie może to być ograniczenie górne. Zatem:

$$\exists n_0 \in \mathbb{N} : n_0 x > \alpha - x.$$

Ale wtedy:

$$X \ni (n_0 + 1)x > \alpha = \sup X.$$

Sprzeczność! Istotnie więc, zbiór  $nx | n \in \mathbb{N}$  nie może być ograniczony przez żadną liczbę, co dowodzi tezy.

### Twierdzenie 1.2. Gęstość $\mathbb{Q}$ w $\mathbb{R}$

$$\forall x, y \in \mathbb{R}, x < y \exists r \in \mathbb{Q} : x < r < y. \quad (27)$$

#### Dowód

Skoro  $y - x > 0$ , to  $\exists n \in \mathbb{N} : n(y - x) > 1$ . Ponadto, skoro  $1 > 0$ , to  $\exists m_1, m_2 \in \mathbb{N} : m_1 > nx \wedge m_2 > -nx$ . Zatem  $-m_2 < nx < m_1$ , tzn.  $nx$  leży pomiędzy dwiema liczbami całkowitymi. Istnieje więc takie  $m \in \mathbb{Z}$ , takie że:

$$m - 1 \leq nx < m.$$

Stąd już prosto:

$$nx < m \leq nx + 1 < ny,$$

$$x < \frac{m}{n} < y.$$

Na koniec krótka notka - zbiór  $\overline{\mathbb{R}} = \mathbb{R} \cup \{+\infty, -\infty\}$ , to jest liczby rzeczywiste z dołączonymi symbolami (nie liczbami!) plus i minus nieskończoności, nazywami **rozszerzonymi liczbami rzeczywistymi**.

## 2 Ciagi rzeczywiste

### 2.1 Pojęcie ciągu i ogólne rezultaty

#### Definicja 2.1. Ciąg

Ciagiem elementów z zbioru  $X$  nazywamy funkcję:

$$a : \mathbb{N} \rightarrow X \quad (28)$$

i zamiast  $a(n)$  piszemy  $a_n$ . Cały ciąg oznaczamy  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ . My w szczególności zajmować się będziemy ciągami rzeczywistymi i zespolonymi.

W sekcji tej, o ile nie powiedziano inaczej, zakładamy, że wszystkie ciągi są rzeczywiste.

### Definicja 2.2. ZBIEŻNOŚĆ CIĄGU

Ciąg rzeczywisty  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  nazywamy zbieżnym do granicy  $g$ , jeśli:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N_\varepsilon \in \mathbb{N} \forall n \geq N : |a_n - g| \leq \varepsilon. \quad (29)$$

Piszemy wtedy:  $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = g$  lub  $a_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} g$ .

Ciąg  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  nazywamy **ograniczonym**, jeśli:

$$\exists C \forall n \in \mathbb{N} : |a_n| \leq C. \quad (30)$$

### Obserwacja 1. Obserwacja

Każdy ciąg zbieżny jest ograniczony.

### Twierdzenie 2.1. Arytmetyka granic

Niech  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  i  $(b_n)_{n \in \mathbb{N}}$  będą ciągami rzeczywistymi, takimi, że  $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$  i  $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = b$ . Wtedy:

$$1. \quad \lim_{n \rightarrow \infty} a + b_n = a + b \quad (31)$$

$$2. \quad \lim_{n \rightarrow \infty} a \cdot b_n = a \cdot b \quad (32)$$

$$3. \quad \lim_{n \rightarrow \infty} |a|_n = |a| \quad (33)$$

4. Jeśli  $b_n \neq 0$  DDD  $n$  (dla dostatecznie dużych  $n$ ) i  $b \neq 0$ :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = \frac{a}{b} \quad (34)$$

### Dowód

W dowodach wszystkich tych twierdzeń chcemy dla dowolnego  $\varepsilon$  skonstruować takie  $N$ , że dla wszystkich  $n \geq N$  różnica między wyrazami ciągu po lewej a granicą po prawej stronie jest mniejsza od  $\varepsilon$ . Pamiętajmy tutaj, że:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists M_\varepsilon \in \mathbb{N} \forall n \geq M_\varepsilon : |a_n - a| \leq \varepsilon, \quad (35)$$

$$\forall \varepsilon > 0 \exists K_\varepsilon \in \mathbb{N} \forall n \geq K_\varepsilon : |b_n - b| \leq \varepsilon, \quad (36)$$

1. Mamy:

$$|a_n + b_n - a - b| \leq |a_n - a| + |b_n - b|, \quad (37)$$

więc dla  $n \geq N = \max\{M_{\frac{\varepsilon}{2}}, K_{\frac{\varepsilon}{2}}\}$ :

$$|a_n + b_n - a - b| \leq |a_n - a| + |b_n - b| \leq \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon. \quad (38)$$

2.

$$|a_n b_n - ab| = |a_n b_n - a_n b + a_n b - ab| \leq |a_n| |b_n - b| + |b| |a_n - a|. \quad (39)$$

Ale  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  jest ograniczony, więc  $a_n \leq C$  i mamy:

$$|a_n b_n - ab| \leq |a_n| |b_n - b| + |b| |a_n - a| \leq (|C| + 1) |b_n - b| + (|b| + 1) |a_n - a|. \quad (40)$$

Zatem dla  $n \geq \max\{M_{\frac{\varepsilon}{2(|b|+1)}}, K_{\frac{\varepsilon}{2(|C|+1)}}\}$ :

$$|a_n b_n - ab| \leq (|C| + 1) \frac{\varepsilon}{2(|C| + 1)} + (|b| + 1) \frac{\varepsilon}{2(|b| + 1)} = \varepsilon. \quad (41)$$

Dodaliśmy tutaj 1 do  $|C|$  i  $|b|$ , żeby uniknąć ewentualnego dzielenia przez 0.

3. Jeśli  $a > 0$ , to ciąg od pewnego miejsca musi być dodatni:  $|a_n| = a_n$  dla  $n > M_{|a|}$ , więc dla  $n > N = \max\{M_{|x|}, M_{\varepsilon}\}$ :

$$||a_n| - |a|| = |a_n - a| < \varepsilon.$$

Podobnie, jeśli  $a < 0$ , to ciąg od pewnego miejsca jest ujemny i  $|a_n| = -a_n$  dla  $n > M_{|a|}$ , więc dla  $n > N = \max\{M_{|x|}, M_{\varepsilon}\}$ :

$$||a_n| - |a|| = |-a_n - |a|| = |a_n - a| < \varepsilon.$$

Dla  $a = 0$ , mamy prosto:

$$|a_n| < \varepsilon \implies ||a_n|| < \varepsilon.$$

4. Zakładamy, że  $b_n \neq 0$  DDD  $n$ , więc istnieje takie  $K_0$ , że dla  $n \geq K_0$   $b_n \neq 0$ . Wtedy:

$$\left| \frac{a_n}{b_n} - \frac{a}{b} \right| = \left| \frac{a_n b - a b_n}{b_n b} \right| = \left| \frac{a_n b - ab + ab - a b_n}{b_n b} \right| = \left| \frac{b(a_n - a) + a(b - b_n)}{b_n b} \right| \quad (42)$$

$$\left| \frac{a_n}{b_n} - \frac{a}{b} \right| \leq \left| \frac{a_n - a}{b_n} \right| + \left| \frac{a}{b_n b} \right| |b_n - b| \leq \left| \frac{a_n - a}{b_n} \right| + \left( \left| \frac{a}{b_n b} \right| + 1 \right) |b_n - b| \quad (43)$$

Zauważmy, że dla  $n \geq K_{\frac{b}{2}}$  mamy  $|b_n - b| \leq \frac{b}{2}$ , więc  $\frac{1}{2}|b| \leq |b_n|$ , przez co:

$$\left| \frac{a_n}{b_n} - \frac{a}{b} \right| \leq \left| \frac{a_n - a}{b_n} \right| + \left( \left| \frac{a}{b_n b} \right| + 1 \right) |b_n - b| \leq \left| \frac{2}{b} \right| |a_n - a| + \left( \left| \frac{2a}{b} \right| + 1 \right) |b_n - b| \quad (44)$$

Ostatecznie dla  $n > \max\{K_0, K_{\frac{b}{2}}, K_{\frac{\varepsilon}{2(|\frac{2a}{b}|+1)}}, M_{\frac{\varepsilon}{4|b|}}\}$ :

$$\left| \frac{a_n}{b_n} - \frac{a}{b} \right| \leq \left| \frac{2}{b} \right| \frac{\varepsilon}{4|b|} + \left( \left| \frac{2a}{b} \right| + 1 \right) \frac{\varepsilon}{2(|\frac{2a}{b}|+1)} = \varepsilon. \quad (45)$$

Powiemy teraz o mocnym twierdzeniu, pozwalającym stwierdzić, czy ciąg ma granicę, bez jej wyznaczania.

### Twierdzenie 2.2. Twierdzenie o ciągu monotonicznym i ograniczonym

Każdy ciąg monotoniczny i ograniczony jest zbieżny.

- Jeśli ciąg jest niemalejący, to jest on zbieżny do supremum zbioru wyrazów ciągu.
- Jeśli ciąg jest nierosnący, to jest on zbieżny do infimum zbioru wyrazów ciągu.

Uwaga - dla ciągu  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  supremum jego wyrazów - tj.  $\sup\{a_n | n \in \mathbb{N}\}$  - oznaczamy  $\sup_{n \in \mathbb{N}} a_n$ .

Analogicznie piszemy  $\inf_{n \in \mathbb{N}} a_n$  dla infimum jego wyrazów.

### Dowód

Załóżmy, że  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  jest niemalejący. Zbiór  $\{a_n | n \in \mathbb{N}\}$  jest ograniczony, zatem posiada supremum. Oznaczmy je  $g$ . Zatem dla każdego  $\varepsilon > 0$  liczba  $g - \varepsilon$  nie jest ograniczeniem górnym:

$$\exists_m : g - \varepsilon \leq a_m \leq g. \quad (46)$$

Ale wtedy, z racji monotoniczności  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ :

$$\forall_{n \geq m} : g - \varepsilon \leq a_m \leq a_n \leq g \leq g + \varepsilon. \quad (47)$$

Czyli:

$$\forall_{n \geq m} : |a_n - g| \leq \varepsilon, \quad (48)$$

co chcieliśmy pokazać. Dla  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  nierosnącego dowód jest zupełnie analogiczny (można też rozważać zbieżność niemalejącego ciągu  $(-a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ ).

### Twierdzenie 2.3. Twierdzenie o trzech ciągach

Niech  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  i  $(c_n)_{n \in \mathbb{N}}$  będą dwoma ciągami zbieżnymi do wspólnej granicy  $g$ . Wtedy, jeśli dla ciągu  $(b_n)_{n \in \mathbb{N}}$  istnieje takie  $N$ , że:

$$\forall_{n \geq N} : a_n \leq b_n \leq c_n, \quad (49)$$

to  $\lim_{n \rightarrow \infty} b_n = g$ .

### Dowód

Dowód jest bardzo krótki. Dla dowolnego  $\varepsilon$  bierzemy takie  $M_\varepsilon$ , że  $\forall_{n \geq M_\varepsilon} : |a_n - g| \leq \varepsilon$  i takie  $K_\varepsilon$ , że:  $\forall_{n \geq K_\varepsilon} : |c_n - g| \leq \varepsilon$ . Wtedy dla  $n \geq \max\{N, M_\varepsilon, K_\varepsilon\}$ :

$$g - \varepsilon \leq a_n \leq b_n \leq c_n \leq g + \varepsilon, \quad (50)$$

więc  $|b_n - g| \leq \varepsilon$ .



**Definicja 2.3. Rozbieżność do  $\pm\infty$** 

Powiemy, że ciąg  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  jest rozbieżny do  $+\infty$ , jeśli:

$$\forall C \exists N_C \in \mathbb{N} \forall n \geq N_C : a_n \geq C. \quad (51)$$

Analogicznie, powiemy, że ciąg  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  jest rozbieżny do  $-\infty$ , jeśli:

$$\forall C \exists N_C \in \mathbb{N} \forall n \geq N_C : a_n \leq C. \quad (52)$$

Mówimy też o "zbieżności" do  $\pm\infty$ , tj. zbieżności w zbiorze  $\overline{\mathbb{R}}$

**Obserwacja 2.**

Ciąg monotoniczny, nieograniczony jest rozbieżny do  $\pm\infty$ .

**Definicja 2.4. Podciąg**

Podciągiem ciągu  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  nazywamy ciąg  $(a_{n_k})_{k \in \mathbb{N}}$ , gdzie  $n \ni k \mapsto n_k \in \mathbb{N}$  jest funkcją ściśle rosnącą.

**Obserwacja 3.**

Jeśli  $a_n \rightarrow g$ , to każdy podciąg  $a_{n_k} \rightarrow g$

**2.2  $\limsup$  i  $\liminf$** 

Założmy, że mamy dany ciąg liczb rzeczywistych  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ . Zdefiniujemy wtedy następujące dwa ciągi:  $(\alpha_n)_{n \in \mathbb{N}}$  oraz  $(\beta_n)_{n \in \mathbb{N}}$ , takie że:

$$\alpha_n = \inf\{a_k \mid k \geq n\} \quad (53)$$

$$\beta_n = \sup\{a_k \mid k \geq n\} \quad (54)$$

Wtedy,  $(\alpha_n)_{n \in \mathbb{N}}$  jest ciągiem niemalejącym, co wynika z faktu, że:

$$\inf\{a_k \mid k \geq n+1\} \subseteq \inf\{a_k \mid k \geq n\}$$

Podobnie,  $(\beta_n)_{n \in \mathbb{N}}$  jest ciągiem nierosnącym. Z tego wynika więc, że są to ciągi zbieżne w  $\overline{\mathbb{R}}$ . Mamy więc:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_n = \sup \alpha_n, \quad (55)$$

gdyż  $(\alpha_n)_{n \in \mathbb{N}}$  to ciąg nierosnący oraz podobnie:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \beta_n = \inf \beta_n. \quad (56)$$

**Definicja 2.5. Granice górne i dolne ciągu**

Wielkość:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \inf\{a_k \mid k \geq n\} = \lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_n = \sup \alpha_n \quad (57)$$

nazywamy **granica dolną** ciągu  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  i oznaczamy  $\liminf_{n \rightarrow \infty} a_n$ . Podobnie, wielkość:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sup \{a_k \mid k \geq n\} = \lim_{n \rightarrow \infty} \beta_n = \inf \beta_n \quad (58)$$

nazywamy **granica górną** ciągu i oznaczamy  $\limsup_{n \rightarrow \infty} a_n$ .

#### Twierdzenie 2.4. Bolzano-Weierstrassa I

Niech  $L$  będzie zbiorem punktów skupienia zbioru  $\{a_n \mid n \in \mathbb{N}\}$ , tzn. takich liczb, dla których istnieje podciąg ciągu  $((a_n)_{n \in \mathbb{N}})$  zbieżny do tej liczby:

$$L = \{x \in \overline{\mathbb{R}} \mid \exists \text{ podciąg } (a_{n_k})_{k \in \mathbb{N}} : \lim_{k \rightarrow \infty} a_{n_k} = x\}. \quad (59)$$

Wtedy:

$$1. \quad L \neq \emptyset \quad (60)$$

$$2. \quad \liminf a_n \in L \quad \wedge \quad \limsup a_n \in L \quad (61)$$

$$3. \quad \liminf a_n = \inf L \quad \wedge \quad \limsup a_n = \sup L \quad (62)$$

#### Dowód

TODO

Nietrudnym wnioskiem z tego twierdzenia jest następujące:

#### Twierdzenie 2.5. Kryterium zbieżności

Ciąg  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  jest zbieżny do  $a \in \overline{\mathbb{R}}$  wtedy i tylko wtedy, gdy:

$$\liminf a_n = \limsup a_n. \quad (63)$$

#### Dowód

$\Rightarrow$  Jeśli  $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a$ , to także każdy podciąg  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  dąży do  $a$ , więc  $L = \{a\}$ . Ale  $\liminf a_n \in L$  i  $\limsup a_n \in L$ , więc:

$$\liminf a_n = a = \limsup a_n. \quad (64)$$

$\Leftarrow$  Oczywiście zachodzi nierówność:

$$\alpha_n \leq a_n \leq \beta_n. \quad (65)$$

Skoro mamy:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \alpha_n = \liminf a_n = \limsup a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \beta_n, \quad (66)$$

więc z twierdzenia o trzech ciągach mamy:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \liminf a_n = \limsup a_n. \quad (67)$$

### Twierdzenie 2.6. Warunek Cauchy'ego

Niech  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  będzie ciągiem rzeczywistym. Wtedy następujące warunki są równoważne:

$$1. \quad \lim_{n \rightarrow \infty} a_n = a \in \mathbb{R} \quad (68)$$

$$2. \quad \forall \varepsilon > 0 \exists M_\varepsilon \forall n, m \geq M_\varepsilon |a_n - a_m| \leq \varepsilon. \quad (69)$$

Jeśli ciąg spełnia ten warunek, mówimy, że spełnia warunek Cauchy'ego.

Sprawdzając warunek Cauchy'ego, możemy dowodzić zbieżności ciągu do granicy rzeczywistej bez wyznaczania tej granicy.

### Dowód

1.  $\Rightarrow$  2. Skoro  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  zbieżny do  $a \in \mathbb{R}$ , to dla dowolnego  $\varepsilon > 0$  istnieje takie  $N_{\frac{\varepsilon}{2}}$ , że:

$$\forall n, m \geq N_{\frac{\varepsilon}{2}} : |a_n - a| \leq \frac{\varepsilon}{2} \wedge |a_m - a| \leq \frac{\varepsilon}{2}, \quad (70)$$

ale wtedy:

$$|a_n - a_m| \leq \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon. \quad (71)$$

2.  $\Rightarrow$  1. Zauważmy, że  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  jest ciągiem ograniczonym. Istotnie, weźmy  $\varepsilon = 1$ :

$$\exists M_1 \forall n \geq M_1 : |a_n - a_{M_1}| \leq 1, \quad (72)$$

więc:

$$\min\{a_{M_1} - 1; a_k \mid k < M_1\} \leq a_n \leq \max\{a_{M_1} + 1; a_k \mid k < M_1\}. \quad (73)$$

Weźmy teraz dowolny  $\varepsilon > 0$ . Z ograniczoności  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  wynika:  $\alpha = \liminf a_n \in \mathbb{R}$  i  $\beta = \limsup a_n \in \mathbb{R}$ . Oznacza to, że:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists A_\varepsilon \forall n \geq A_\varepsilon : |\alpha_n - \alpha| \leq \varepsilon, \quad (74)$$

$$\forall \varepsilon > 0 \exists B_\varepsilon \forall n \geq B_\varepsilon : |\beta_n - \beta| \leq \varepsilon, \quad (75)$$

Zauważmy, że:

$$|\alpha - \beta| \leq |\alpha - \alpha_n| + |\beta - \beta_n| + |\alpha_n - \beta_n|. \quad (76)$$

Dwa pierwsze czynniki po prawej potrafimy ograniczyć, zbadajmy więc ostatni wyraz:

$$\begin{aligned} |\alpha_n - \beta_n| &\leq |\alpha_n - a_n| + |\beta_n - a_n| = |\inf\{a_n, a_{n+1}, \dots\} - a_n| + |\sup\{a_n, a_{n+1}, \dots\} - a_n| \\ &= \inf\{|a_m - a_n| \mid m \geq n\} + \sup\{|a_m - a_n| \mid m \geq n\}. \end{aligned} \quad (77)$$

Możemy teraz skorzystać z warunku Cauchy'ego i znaleźć takie  $M_{\frac{\varepsilon}{6}}$ , że:

$$\forall m \geq n \geq M_{\frac{\varepsilon}{6}} : |a_m - a_n| \leq \frac{\varepsilon}{6}. \quad (78)$$

Zatem dla  $n \geq M_{\frac{\varepsilon}{6}}$ :

$$\inf\{|a_m - a_n| \mid m \geq n\} \leq \frac{\varepsilon}{6} \quad (79)$$

$$\sup\{|a_m - a_n| \mid m \geq n\} \leq \frac{\varepsilon}{6} \quad (80)$$

Ostatecznie otrzymujemy dla  $n \geq \max\{A_{\frac{\varepsilon}{3}}, B_{\frac{\varepsilon}{3}}, M_{\frac{\varepsilon}{6}}\}$ :

$$|\alpha - \beta| \leq |\alpha - \alpha_n| + |\beta - \beta_n| + |\alpha_n - a_n| + |\beta_n - a_n| \leq \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{6} + \frac{\varepsilon}{6} = \varepsilon. \quad (81)$$

Pokazaliśmy, że różnica  $|\liminf a_n - \limsup a_n|$  jest mniejsza od dowolnej liczby dodatniej, zatem musi być równa 0. Oznacza to, że  $\liminf a_n = \limsup a_n \in \mathbb{R}$ , a więc - co udowodniliśmy już wcześniej - ciąg jest zbieżny do rzeczywistej granicy.

### 3 Szeregi liczbowe

#### Definicja 3.1. Szereg liczbowy

Niech  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  będzie ciągiem liczb zespolonych ( $a_n \in \mathbb{C}$ ). **Szeregiem** o wyrazach  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  nazwiemy napis:

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n. \quad (82)$$

$N$ -tą **sumą częściową** szeregu  $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$  nazwiemy sumę:

$$S_N = \sum_{n=1}^N a_n. \quad (83)$$

Powiemy, że szereg  $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$  jest **zbieżny** do  $S$ , jeśli:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} S_N = S \in \mathbb{C}. \quad (84)$$

Napiszemy wtedy, że  $\sum_{n=1}^{\infty} a_n = S$ , a liczbę  $S$  nazwiemy sumą szeregu. Jeśli  $S_N$  nie ma granicy, to szereg nazwiemy **rozbieżnym**.

**Przykład 1.** Jeśli  $a_n = (-1)^n$ , to szereg  $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$  jest rozbieżny.

**Przykład 2.** Jeśli  $a_n = q^{n-1}$ , dla  $|q| < 1$ , to  $S_N = \frac{1-q^N}{1-q}$  i  $\sum_{n=1}^{\infty} q^{n-1} = \frac{1}{1-q}$ .

### Twierdzenie 3.1.

Szereg  $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$  jest zbieżny wtedy i tylko wtedy, gdy:

$$\forall \varepsilon \exists N_{\varepsilon} \forall N \geq M \geq N_{\varepsilon} \left| \sum_{n=M+1}^N a_n \right| \leq \varepsilon. \quad (85)$$

### Dowód

Twierdzenie wynika prosto z zastosowania warunku Cauchy'ego do ciągu  $S_N$ . Bowiem  $S_N$  jest zbieżny wtedy i tylko wtedy, gdy:

$$\forall \varepsilon \exists N_{\varepsilon} \forall N \geq M \geq N_{\varepsilon} |S_N - S_M| \leq \varepsilon, \quad (86)$$

co po rozpisaniu  $S_N$  i  $S_M$  jest równoważne twierdzeniu.

$\sum_{n=M+1}^N a_n$  nazywa się czasami **ogonem szeregu**.

### Obserwacja 4. Warunek konieczny zbieżności

Warunkiem koniecznym zbieżności szeregu  $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$  jest, aby  $\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 0$ .

Istotnie, wystarczy podstawić  $M = N - 1$  w twierdzeniu 3, żeby otrzymać definicję zbieżności  $a_n$  do 0.

Warto pamiętać, że nie jest to warunek wystarczający - kontrprzykładem jest np. rozbieżny szereg  $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n}$ . Wtedy

$$S_{2^k} = 1 + \sum_{l=1}^k \sum_{j=2^{l-1}+1}^{2^l} \frac{1}{j} \geq 1 + \sum_{l=1}^k \frac{2^{l-1}}{2^l} = 1 + \frac{1}{2}k \rightarrow \infty. \quad (87)$$

Zatem  $S_N \rightarrow \infty$ , bo jest to ciąg monotoniczny.

## 3.1 Szeregi o wyrazach dodatnich

W tej sekcji zajmujemy się jedynie szeregami o wyrazach dodatnich, to jest takimi, dla których  $\mathbb{R} \ni a_n \geq 0$ .

### Obserwacja 5.

Dla szeregów o wyrazach dodatnich, ciąg sum częściowych jest niemalejącym ciągiem rzeczywistym. Oznacza to, że szereg jest zbieżny wtedy i tylko wtedy, gdy ciąg sum częściowych

jest ograniczony. W przeciwnym wypadku  $\lim_{N \rightarrow \infty} S_N = +\infty$  i wtedy mówimy, że  $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$  jest rozbieżny do  $+\infty$ .

### Twierdzenie 3.2. Kryterium porównawcze

Niech  $\sum_{n=1}^{\infty} a_n, \sum_{n=1}^{\infty} b_n$  będą szeregami o wyrazach dodatnich. Wtedy:

1. Jeśli  $\exists_{C>0} : a_n \leq C b_n \quad \forall n$ , to:

$$\sum_{n=1}^{\infty} b_n < \infty \implies \sum_{n=1}^{\infty} a_n < \infty. \quad (88)$$

2. Jeśli  $\exists_{C>0} : a_n \geq C b_n \quad \forall n$ , to:

$$\sum_{n=1}^{\infty} b_n = +\infty \implies \sum_{n=1}^{\infty} a_n = +\infty. \quad (89)$$

### Dowód

Niech  $N_0$  będzie oznaczał indeks, od którego podane nierówności zachodzą.

1. Dla  $N > N_0$  mamy:

$$S_N^{(a)} = S_{N_0}^{(a)} + \sum_{n=N_0+1}^N a_n \leq S_{N_0}^{(a)} + \sum_{n=N_0+1}^N C b_n = S_{N_0}^{(a)} - C S_{N_0}^{(b)} + C S_N^{(b)} \leq S_{N_0}^{(a)} - C S_{N_0}^{(b)} + C \sum_{n=1}^{\infty} b_n < \infty.$$

Zatem skoro  $S_N^{(a)}$  jest ograniczony, to (por. Obs. 3.1) jest i zbieżny.

2. Podobnie jak poprzednio, dla  $N > N_0$  mamy:

$$S_N^{(a)} = S_{N_0}^{(a)} + \sum_{n=N_0+1}^N a_n \geq S_{N_0}^{(a)} + \sum_{n=N_0+1}^N C b_n = S_{N_0}^{(a)} - C S_{N_0}^{(b)} + C S_N^{(b)} \xrightarrow{N \rightarrow \infty} \infty,$$

więc  $S_N^{(a)}$  jest rozbieżny do nieskończoności.

### Twierdzenie 3.3. Kryterium porównawcze (wersja graniczna)

Niech  $\sum_{n=1}^{\infty} a_n, \sum_{n=1}^{\infty} b_n$  będą szeregami o wyrazach dodatnich i niech  $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_n}{b_n} = L$ . Wtedy:

1. Jeśli  $L < \infty$ , to:

$$\sum_{n=1}^{\infty} b_n < \infty \implies \sum_{n=1}^{\infty} a_n < \infty. \quad (90)$$

2. Jeśli  $L > 0$ , to:

$$\sum_{n=1}^{\infty} b_n = +\infty \implies \sum_{n=1}^{\infty} a_n = +\infty. \quad (91)$$

### Dowód

1. Jeśli  $L < \infty$ , to  $a_n \leq (L + L) * b_n$  dla dostatecznie dużych  $n$  i stosujemy Tw. 3.1.1.
2. Jeśli  $L > 0$ , to  $a_n \leq \frac{1}{2} L b_n$  DDDn (ew.  $a_n \leq 2b_n$ , jeśli  $L = \infty$ ) i stosujemy Tw. 3.1.2.

### Twierdzenie 3.4. Kryterium D'Alemberta

Niech  $\forall_n a_n > 0$  i niech  $d_n = \frac{a_{n+1}}{a_n}$ . Wtedy:

1.

$$\limsup d_n < 1 \implies \sum_{n=1}^{\infty} a_n < \infty \quad (92)$$

2.

$$(\liminf d_n > 1 \vee \exists_k \forall_{n \geq k} : d_n \geq 1) \implies \sum_{n=1}^{\infty} a_n = \infty. \quad (93)$$

Ponadto, jeśli zachodzi poprzecznik implikacji, to  $a_n \not\rightarrow 0$ .

### Dowód

1. Skoro  $\limsup d_n < 1$ , to  $d_n$  musi być ograniczony. Niech  $\lambda$  będzie taką liczbą, że  $1 > \lambda > \limsup d_n$ . Zauważmy, że może istnieć tylko skończona liczba wyrazów  $d_n$  większych lub równych  $\lambda$ , gdyż inaczej wybralibyśmy z nich podciąg zbieżny do granicy  $\geq \lambda$ , co przeczy założeniu, że  $\lambda < \limsup d_n$ . Zatem:

$$\exists_N \forall_{n \geq N} : d_n < \lambda.$$

Czyli:

$$\exists_N \forall_{n \geq N} : a_{n+1} < \lambda a_n.$$

Stąd, dla  $n > N$ :  $a_n < \frac{\lambda^N}{\lambda^n} \lambda^n$ . Tak więc na mocy kryterium porównawczego ze zbieżnym szeregiem  $\sum_{n=1}^{\infty} \lambda^n$  ( $\lambda < 1$ ) szereg  $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$  jest zbieżny.

2. Jeśli  $\liminf d_n > 1$ , to (używając podobnego rozumowania, jak poprzednio) istnieje  $\rho > 1$  t.j.  $d_n > \rho$ . Skoro tak, to DDDn:  $a_{n+1} > \rho a_n > a_n$ , jako rosnący ciąg o wyrazach

dodatnich, nie może dążyć do 0. Podobnie, jeśli mamy  $d_n \geq 1$ , to  $a_{n+1} \geq a_n$  i znowuż  $a_n$  nie może dążyć do 0.

**Uwagi.**

1. Może być tak, że  $d_n \geq 1$  dla nieskończenie wielu  $n$ , a szereg  $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$  jest zbieżny. Przykład:

$$a_n = \begin{cases} \frac{1}{(\frac{n}{2})^2}, & \text{gdy } n = 2k \\ \frac{1}{(\frac{n-1}{2})^2}, & \text{gdy } n = 2k+1 \end{cases}$$

2. Może być tak, że szereg  $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$  jest zbieżny, ale  $\limsup d_n > 1$ .

Następne kryterium jest rozszerzeniem kryterium D'Alemberta:

#### Twierdzenie 3.5. Kryterium Cauchy'ego

TODO

#### Twierdzenie 3.6.

Załóżmy, że  $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$  jest szeregiem o wyrazach dodatnich ( $a_n > 0$ ). Wtedy:

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n = \sup_{\substack{F \subseteq \mathbb{N} \\ |F| < +\infty}} \sum_{n \in F} a_n. \quad (94)$$

#### Dowód

Oczywiście, skoro  $S_N$  jest rosnący, to  $\sum_{n=1}^{\infty} a_n = \lim_{N \rightarrow \infty} S_N = \sup_{N \in \mathbb{N}} S_N$ . Łatwo widać też, że  $\sup_{N \in \mathbb{N}} S_N \leq \sup_{\substack{F \subseteq \mathbb{N} \\ |F| < +\infty}} \sum_{n \in F} a_n$  (ponieważ  $S_N$  to suma tego samego typu, co po prawej stronie z  $F = \{1, \dots, N\}$ ). Dodatkowo, dla każdego skończonego  $F \subseteq \mathbb{N}$ , istnieje takie  $N$ , że  $\forall_{n \in F} n \leq N$ , zatem  $\sum_{n \in F} a_n \leq S_N$ . Ostatecznie mamy  $\sup_{\substack{F \subseteq \mathbb{N} \\ |F| < +\infty}} \sum_{n \in F} a_n \leq \sup_{N \in \mathbb{N}} S_N$ , stąd te dwie wielkości są sobie równe i mamy tezę.

Wynikają z tego następujące wnioski:

#### Twierdzenie 3.7.

1.

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n < +\infty \iff \exists_{C>0} \forall_{F \subseteq \mathbb{N}, |F| < +\infty} \sum_{n \in F} a_n \leq C$$



(Zbiór wszystkich sum elementów o indeksach pochodzących ze SKOŃCZONEGO podzbioru  $\mathbb{N}$  jest ograniczony)

2. Jeśli  $\sigma : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  jest bijekcją (permutacją indeksów), to:

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_{\sigma(n)} = \sum_{n=1}^{\infty} a_n.$$

Oznacza to, że zmiana kolejności sumowania nie wpływa na wynik.

3. Jeśli:

$$\mathbb{N} = \bigsqcup_{i=1}^{\infty} A_i \quad (\text{jest to suma rozłączna, tj. } A_i \cap A_j = \emptyset \text{ dla } i \neq j)$$

i:

$$S_i = \sum_{n \in A_i} a_n,$$

to:

$$\sum_{i=1}^{\infty} S_i = \sum_{n=1}^{\infty} a_n.$$

Jest to grupowania (łączności i przemienności) dla szeregu.

### Dowód wniosków

1. Ograniczoność sum po prawej jest oczywiście równoważne istnieniu skończonego ich supremum, co równe jest sumie po lewej.
2.  $\sigma$  zachowuje klasę skończonych podzbiorów i wyznacza bijekcję:

$$\sigma : 2^{\mathbb{N}} \rightarrow 2^{\mathbb{N}}$$

$$\sigma(F) = \{\sigma(n) \mid n \in F\},$$

która zachowuje moc zbioru  $F$  i przeprowadza zbiory skończone na skończone. Zatem:

$$\left\{ \sum_{n \in F} a_n \mid F \subset \mathbb{N}, |F| < \infty \right\} = \left\{ \sum_{n \in \sigma(F)} a_n \mid F \subset \mathbb{N}, |F| < \infty \right\},$$

więc:

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n = \sup \left\{ \sum_{n \in F} a_n \mid F \in 2^{\mathbb{N}} \right\} = \sup \left\{ \sum_{n \in \sigma(F)} a_n \mid F \subset \mathbb{N}, |F| < \infty \right\} = \sum_{n=1}^{\infty} a_{\sigma(n)}$$

3. a) Jeśli  $\exists j : S_j = \infty$ , to:

$$\sum_{i=1}^{\infty} S_i = \infty$$

i:

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n \geq \sum_{n \in A_j} a_n = \infty.$$

Stąd:

$$\sum_{i=1}^{\infty} S_i = \infty = \sum_{n=1}^{\infty} a_n$$

b) Niech  $\forall_i : S_i < \infty$ . Ustalmy  $\varepsilon > 0$  i weźmy dowolny:

$$K \subset \mathbb{N}, \quad |K| < \infty.$$

Przypomnijmy:

$$\sum_{i=1}^{\infty} S_i = \sup_{\substack{K \subset \mathbb{N}, \\ |K| < \infty}} \sum_{j \in K} S_j.$$

Niech  $K = \{i_1, i_2, \dots, i_l\}$  i wybierzmy:

$$C_1 \subseteq A_{i_1}, C_2 \subseteq A_{i_2}, \dots, C_l \subseteq A_{i_l},$$

takie, że:

$$\forall_j : \sum_{n \in C_j} a_n \geq S_{i_j} - \frac{\varepsilon}{l},$$

co jest możliwe, gdyż  $S_{i_j}$  jest supremum sum po skończonych podzbiorach. Jeśli  $A_{i_j}$  jest skończony, możemy przyjąć  $C_j = A_{i_j}$ .

Wtedy:

$$\sum_{i \in K} S_i = S_{i_1} + S_{i_2} + \dots + S_{i_l} \leq \left( \sum_{n \in C_1} a_n + \frac{\varepsilon}{l} \right) + \left( \sum_{n \in C_2} a_n + \frac{\varepsilon}{l} \right) + \dots + \left( \sum_{n \in C_l} a_n + \frac{\varepsilon}{l} \right) = \varepsilon + \sum_{n \in \bigcup_{j=1}^l C_j} a_n.$$

NB:  $\bigcup_{j=1}^l C_j$  jest zbiorem skończonym, więc:

$$\sum_{i \in K} S_i \leq \varepsilon + \sup_{\substack{F \subset \mathbb{N} \\ |F| < +\infty}} \sum_{n \in F} a_n = \varepsilon + \sum_{n=1}^{\infty} a_n.$$

Rozumowanie to przeprowadziliśmy dla dowolnego  $K$  i  $\varepsilon$ , więc:

$$\sum_{i=1}^{\infty} S_i = \sup_{\substack{K \subset \mathbb{N} \\ |K| < \infty}} \sum_{i \in K} S_i \leq \sum_{n=1}^{\infty} a_n.$$

W drugą stronę, weźmy  $F \subset \mathbb{N}$ ,  $|F| < \infty$  i niech:

$$K = \{i \in \mathbb{N} \mid A_i \cap F \neq \emptyset\},$$

wtedy  $|K| < \infty$ , bo  $F$  jest skończony, a  $A_j$  są rozłączne. Wtedy mamy:

$$\sum_{n \in F} a_n = \sum_{i \in K} \sum_{n \in A_i \cap F} a_n \leq \sum_{i \in K} \sum_{n \in A_i} a_n = \sum_{i \in K} S_i.$$

Z tego:

$$\sum_{n \in F} a_n \leq \sum_{i \in K} S_i \leq \sup_{\substack{K \subset \mathbb{N} \\ |K| < \infty}} \sum_{i \in K} S_i = \sum_{i=1}^{\infty} S_i,$$

co zachodzi dla dowolnego  $F$  skończonego. Zatem:

$$\sup_{\substack{F \subset \mathbb{N} \\ |F| < \infty}} \sum_{n \in F} a_n = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \leq \sum_{i=1}^{\infty} S_i.$$

Porównując dwie otrzymane nierówności, otrzymujemy tezę.

### 3.2 Szeregi o wyrazach dowolnych

W tej podsekcji rozważamy szeregi o dowolnych wyrazach zespolonych:

$$\sum_{n=1}^{\infty} z_n, \quad z_n \in \mathbb{C}.$$

#### Twierdzenie 3.8. Kryterium zbieżności bezwzględnej

Jeśli następujący szereg jest zbieżny:

$$\sum_{n=1}^{\infty} |z_n| < +\infty$$

to i:

$$\sum_{n=1}^{\infty} z_n$$

jest zbieżny.

#### Dowód

Korzystamy z warunku Cauchy'ego dla szeregu modułów:

$$\forall \varepsilon \exists N_\varepsilon \forall n > m \geq N_\varepsilon : \left| \sum_{k=m+1}^n |z_k| \right| \leq \varepsilon,$$

ale:

$$\left| \sum_{k=m+1}^n z_k \right| \leq \sum_{k=m+1}^n |z_k|,$$

więc:

$$\forall \varepsilon \exists M_\varepsilon = N_\varepsilon \forall n > m \geq M_\varepsilon : \left| \sum_{k=m+1}^n z_k \right| \leq \varepsilon.$$

To dowodzi, że warunek Cauchy'ego zachodzi dla  $\sum_{n=1}^{\infty} z_n$ , zatem jest to szereg zbieżny.

### Definicja 3.2. Zbieżność bezwzględna

- Szereg  $\sum_{n=1}^{\infty} z_n$  nazywamy zbieżnym bezwzględnie, jeśli szereg  $\sum_{n=1}^{\infty} |z_n|$  jest zbieżny.
- Jeśli szereg  $\sum_{n=1}^{\infty} z_n$  jest zbieżny, ale  $\sum_{n=1}^{\infty} |z_n|$  już nie, to szereg nazywamy zbieżnym warunkowo.

Dla szeregów o wyrazach dowolnych obowiązują inne kryteria zbieżności niż dla szeregów o wyrazach dodatnich. Jednym z nich, jest:

### Twierdzenie 3.9. Kryterium Dirichleta

Założmy, że:

- Mamy ciągi:

$$(a_n)_{n \in \mathbb{N}}, \quad a_n \in \mathbb{C}$$
$$(b_n)_{n \in \mathbb{N}}, \quad b_n \in \mathbb{R}, \quad b_n \geq 0$$

- $b_n$  zbiega monotonicznie do 0.
- Ciąg sum częściowych wyrazów  $(a_n)$  jest ograniczony:

$$\exists C \in \mathbb{R} \forall N \in \mathbb{N} : \left| \sum_{n=1}^N a_n \right| \leq C.$$

Wtedy szereg  $\sum_{n=1}^{\infty} a_n b_n$  jest zbieżny.

**Uwaga!** W kryterium tym wystarczy, żeby  $b_n$  był nierosnący (i.e. nie trzeba, by był on ściśle malejący).

**Przykład - szeregi naprzemienne.** Weźmy szereg postaci:

$$\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n b_n,$$

gdzie  $b_n \searrow 0$  (dąży monotonicznie z góry do 0). Szereg taki nazywamy szeregiem naprzemiennym. Z kryterium Dirichleta wynika, że każdy szereg takiej postaci jest zbieżny (co nazywa się czasem kryterium Leibnitza). W szczególności:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} = \ln 2.$$

### Dowód kryterium Dirichleta

Niech  $\sum_{n=1}^N a_n = z_N$ . Zauważmy, że  $(z_N)$  jest ciągiem ograniczonym. Zapiszmy sumy częściowe docelowego szeregu:

$$\begin{aligned}\sum_{n=1}^N a_n b_n &= a_1 b_1 + a_2 b_2 + \dots + a_N b_N = z_1 b_1 + (z_2 - z_1) b_2 + \dots + (z_N - z_{N-1}) b_N = \\ &= z_1 (b_1 - b_2) + z_2 (b_2 - b_3) + \dots + z_{N-1} (b_{N-1} - b_N) + z_N b_N.\end{aligned}$$

Zauważmy, że wyraz  $z_N b_N$  jest zbieżny do 0 (jako iloczyn czynnika ograniczonego i czynnika dążącego do 0). Zajmijmy się więc otrzymaną sumą. Zauważmy, że zachodzi:

$$\begin{aligned}\sum_{n=1}^{\infty} |z_n (b_n - b_{n+1})| &= \sum_{n=1}^{\infty} |z_n| |b_n - b_{n+1}| \leq C \sum_{n=1}^{\infty} |b_n - b_{n+1}| = \\ &= C \lim_{N \rightarrow \infty} (b_1 - b_{N+1}) = C b_1 < +\infty\end{aligned}$$

Zatem szereg  $\sum_{n=1}^{\infty} z_n (b_n - b_{n+1})$  jest zbieżny bezwzględnie, a więc i zbieżny. Z tego i z równości:

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n b_n = \sum_{n=1}^{\infty} z_n (b_n - b_{n+1}) + \lim_{n \rightarrow \infty} z_n b_n,$$

Wynika, że szereg  $\sum_{n=1}^{\infty} a_n b_n$  musi być zbieżny.

Kolejnym kryterium zbieżności dla szeregów o wyrazach dowolnych jest prosto wynikające z kryterium Dirichleta tzw.:

### Twierdzenie 3.10. Kryterium Abela

Jeśli:

- mamy ciągi:

$$(a_n)_{n \in \mathbb{N}}, \quad a_n \in \mathbb{C}$$

$$(b_n)_{n \in \mathbb{N}}, \quad b_n \in \mathbb{R}$$

- $b_n$  jest monotoniczny i ograniczony,

- $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$  jest zbieżny.

Wtedy szereg  $\sum_{n=1}^{\infty} a_n b_n$  jest zbieżny.

### Dowód

Oczywiście  $b = \lim_{n \rightarrow \infty} b_n$  istnieje. Wtedy:

$$\sum_{n=1}^N a_n b_n = \sum_{n=1}^N a_n (b_n - b) + b \sum_{n=1}^N a_n.$$

Szereg  $b \sum_{n=1}^{\infty} a_n$  jest oczywiście zbieżny na mocy założenia. Za to  $\sum_{n=1}^{\infty} a_n (b_n - b)$  jest zbieżne na mocy kryterium Dirichleta, zauważmy bowiem, że:

$$\sum_{n=1}^N a_n (b_n - b) = \text{sign}(b_n - b) \sum_{n=1}^N a_n |b_n - b|,$$

ale  $|b_n - b| \searrow 0$  na mocy założenia, a sumy częściowe  $|\sum_{n=1}^N a_n|$  muszą być ograniczone, gdyż są zbieżne. Warunki kryterium Dirichleta są więc spełnione. Ostatecznie:

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n b_n = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N a_n b_n = \sum_{n=1}^{\infty} a_n (b_n - b) + b \sum_{n=1}^{\infty} a_n.$$

Wszystkie składniki po prawej są zbieżne, zatem szereg  $\sum_{n=1}^{\infty} a_n b_n$  także musi być zbieżny.

**Grupowanie składników** Zajmijmy się teraz kwestią grupowania składników w szeregach o wyrazach dowolnych i kiedy taka operacja nie zmienia wartości szeregu. Prowadźmy jednak trochę notacji.

### Definicja 3.3. Rozbicie na wyrazy dodatnie

Dla szeregu  $\sum_{n=1}^{\infty} z_n$  definiujemy następujące ciągi:

•

$$a_n = \text{Re}(z_n)$$

•

$$b_n = \text{Im}(z_n)$$

•

$$a_n^+ = \max\{0, a_n\}$$

•

$$a_n^- = -\min\{0, a_n\}$$

•

$$b_n^+ = \max\{0, b_n\}$$

•

$$b_n^- = -\min\{0, b_n\}$$

Jasnym jest, że:

$$z_n = a_n^+ - a_n^- + i b_n^+ - i b_n^-$$

oraz:

$$0 \leq a_n^+, a_n^-, b_n^+, b_n^- \leq |z_n|.$$

Z ostatniej nierówności wynika (kryterium porównawcze), że jeśli szereg  $\sum_{n=1}^{\infty} |z_n|$  jest zbieżny, to i szeregi  $\sum_{n=1}^{\infty} a_n^{\pm}, \sum_{n=1}^{\infty} b_n^{\pm}$  muszą być zbieżne. Wtedy:

$$\sum_{n=1}^{\infty} z_n = \sum_{n=1}^{\infty} a_n^+ - \sum_{n=1}^{\infty} a_n^- + i \sum_{n=1}^{\infty} b_n^+ - i \sum_{n=1}^{\infty} b_n^-,$$

jako że:

$$\sum_{n=1}^N z_n = \sum_{n=1}^N a_n^+ - \sum_{n=1}^N a_n^- + i \sum_{n=1}^N b_n^+ - i \sum_{n=1}^N b_n^-.$$

Z tego wynika następujący wniosek:

### Twierdzenie 3.11. Grupowanie szeregów zbieżnych bezwzględnie

Niech szereg  $\sum_{n=1}^{\infty} z_n$  będzie zbieżny bezwzględnie. Wtedy:

1. Jeśli  $\sigma : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$  jest bijekcją (permutacją indeksów), to:

$$\sum_{n=1}^{\infty} z_{\sigma(n)} = \sum_{n=1}^{\infty} z_n.$$

Oznacza to, że zmiana kolejności sumowania nie wpływa na wynik.

2. Jeśli:

$$\mathbb{N} = \bigsqcup_{j=1}^{\infty} A_j$$

i:

$$S_j = \sum_{n \in A_j} z_n,$$

to  $\sum_{j=1}^{\infty} S_j$  jest zbieżny bezwzględnie i:

$$\sum_{j=1}^{\infty} S_j = \sum_{n=1}^{\infty} z_n.$$

Są to prawa grupowania dla szeregów o wyrazach dowolnych, analogiczne do tych, które zachodzą dla szeregów o wyrazach dodatnich.

## Dowód

1. Mamy następujące równości:

$$\begin{aligned}\sum_{n=1}^{\infty} z_{\sigma(n)} &= \sum_{n=1}^{\infty} a_{\sigma(n)}^+ - \sum_{n=1}^{\infty} a_{\sigma(n)}^- + i \sum_{n=1}^{\infty} b_{\sigma(n)}^+ - i \sum_{n=1}^{\infty} b_{\sigma(n)}^- = \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} a_n^+ - \sum_{n=1}^{\infty} a_n^- + i \sum_{n=1}^{\infty} b_n^+ - i \sum_{n=1}^{\infty} b_n^- = \sum_{n=1}^{\infty} z_n\end{aligned}$$

W 2 równości korzystamy z analogicznego prawa dla zbieżnych szeregów dodatnich.

Oczywiście, jako że  $\sum_{n=1}^{\infty} z_n$  jest zbieżny bezwzględnie, to mamy:

$$\sum_{n=1}^{\infty} |z_n| = \sum_{n=1}^{\infty} |z_{\sigma(n)}|,$$

więc permutacja szeregu zbieżnego bezwzględnie jest także zbieżna bezwzględnie.

2. Mamy:

$$\sum_{j=1}^{\infty} |S_j| = \sum_{j=1}^{\infty} \left| \sum_{n \in A_j} z_n \right| \leq \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{n \in A_j} |z_n| = \sum_{n=1}^{\infty} |z_n| < +\infty.$$

Widzimy więc, że  $\sum_{j=1}^{\infty} S_j$  jest także zbieżny bezwzględnie. Jako że  $\sum_{n=1}^{\infty} z_n$  jest zbieżny bezwzględnie, więc tym bardziej jego podszeregi muszą być zbieżne bezwzględnie. Możemy więc zapisać:

$$\begin{aligned}\sum_{j=1}^N S_j &= \sum_{j=1}^N \sum_{n \in A_j} z_n = \sum_{j=1}^N \left( \sum_{n \in A_j} a_n^+ - \sum_{n \in A_j} a_n^- + i \sum_{n \in A_j} b_n^+ - i \sum_{n \in A_j} b_n^- \right) = \\ &= \sum_{j=1}^N \sum_{n \in A_j} a_n^+ - \sum_{j=1}^N \sum_{n \in A_j} a_n^- + i \sum_{j=1}^N \sum_{n \in A_j} b_n^+ - i \sum_{j=1}^N \sum_{n \in A_j} b_n^-.\end{aligned}$$

Każdy z szeregów po prawej stronie jest szeregiem zbieżnym o wyrazach dodatnich. Biorąc granicę  $N \rightarrow \infty$  otrzymamy więc:

$$\sum_{j=1}^{\infty} S_j = \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{n \in A_j} a_n^+ - \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{n \in A_j} a_n^- + i \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{n \in A_j} b_n^+ - i \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{n \in A_j} b_n^- = \sum_{n=1}^{\infty} z_n,$$

co wynika z odpowiednich twierdzeń dla szeregów dodatnich.



## 4 Przestrzenie metryczne

### 4.1 Podstawowe definicje. Otwartość i domkniętość

Zmienimy teraz temat, odchodząc od analizy zbieżności w liczbach zespolonych i rozpoczniemy rozważania o temacie znacznie bardziej ogólnym, mianowicie o przestrzeniach z metrykami, będących uogólnieniem znanego pojęcia odległości w  $\mathbb{C}$ .

#### Definicja 4.1. Metryka

Ustalmy  $X$  będące dowolnym niepustym zbiorem. Funkcję:

$$d : X \times X \rightarrow [0; +\infty[$$

nazywamy **metryką**, jeśli spełnia następujące aksjomaty:

1.

$$\forall_{x,y \in X} : d(x,y) = d(y,x),$$

2.

$$\forall_{x,y \in X} : d(x,y) = 0 \iff x = y,$$

3.

$$\forall_{x,y,z \in X} : d(x,z) \leq d(x,y) + d(y,z).$$

O metryce myśleć można, jako o funkcji zwracającej "odległość" między dwoma elementami w zbiorze  $X$ . Podane aksjomaty zapewniają, że nasza metryka spełniać będzie "zdraworozsądkowe" własności odległości. 1. nakłada warunek symetryczności na metrykę - odległość z  $x$  do  $y$  musi być równa odległości z  $y$  do  $x$ . 2. normalizuje metrykę, mówiąc, że punkt jest odległy o 0 od samego siebie i **tylko** od samego siebie. 3. to tak zwana **nierówność trójkąta** - dodając na drodze między dwoma punktami trzeci punkt nie można odległości skrócić.

#### Definicja 4.2. Przestrzeń metryczna

Parę  $(X, d)$  - gdzie  $X$  to niepusty zbiór, a  $d : X \times X \rightarrow [0; +\infty[$  to metryka - nazywamy **przestrzenią metryczną**.

**Przykłady** Pokażemy parę przykładów przestrzeni metrycznych, aby dać pojęcie, jak mogą one wyglądać.

- $X = \mathbb{R}$   $d(x, y) = |x - y|$  - jest to odległość między dwiema liczbami rzeczywistymi, z której korzystaliśmy np. przy definicji granicy ciągu.
- $X = \mathbb{R}^v$ , gdzie  $v \in \mathbb{N}$  jest wymiarem przestrzeni,

$$d_p(x, y) = \left( \sum_{n=1}^v |x_n - y_n|^p \right)^{\frac{1}{p}}.$$

Podstawiając za  $p$  różne wartości możemy otrzymać wiele alternatywnych metryk. Np. dla  $p = 1$  otrzymujemy tzw. **metrykę Manhattanu**:

$$d_1(x, y) = \sum_{n=1}^v |x_n - y_n|.$$

Nazwa pochodzi od tego, że jest to odległość jaką trzeba pokonać między dwoma punktami, mogąc przemieszczać się tylko równolegle do osi współrzędnych - tak jak na Manhattanie, gdzie ulice są do się prostopadłe.

Dla  $p = 2$  otrzymujemy znaną **odległość Euklidesową**:

$$d_2(x, y) = \sqrt{\sum_{n=1}^v (x_n - y_n)^2}.$$

- $X = \mathbb{R}^v$ ,

$$d_\infty(x, y) = \max_{1 \leq n \leq v} |x_n - y_n|.$$

Jest to tak zwana **metryka maximum**. Indeks  $\infty$  wziął się z faktu, że o  $d_\infty$  myśleć można o jako o granicy  $d_p$  dla  $p \rightarrow \infty$ , mamy bowiem:

$$\lim_{p \rightarrow \infty} \left( \sum_{n=1}^v a_n^p \right)^{\frac{1}{p}} = \max_{1 \leq n \leq v} a_n.$$

- Dla dowolnego zbioru  $X$  definiujemy **metrykę dyskretną**:

$$d(x, y) = \delta_{x,y} = \begin{cases} 1 & x = y \\ 0 & x \neq y \end{cases}. \quad (95)$$

- Niech  $X$  będzie zbiorem funkcji klasy  $C^0$  (tj, funkcji ciągłych) z  $[0; 1]$  na  $\mathbb{C}$ . Wtedy za odległość między dwiema funkcjami przyjąć możemy:

$$d(f, g) = \sup_{x \in [0; 1]} |f(x) - g(x)|. \quad (96)$$

- Dla  $X$  takiego samego jak w poprzednim punkcie można określić także:

$$d_p(f, g) = \left( \int_0^1 |f(x) - g(x)|^p \right)^{\frac{1}{p}}. \quad (97)$$

#### Definicja 4.3. Zbieżność w przestrzeni metrycznej

Niech  $(X, d)$  będzie przestrzenią metryczną i niech  $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$  będzie ciągiem elementów z  $X$ . Powiemy, że  $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$  jest zbieżny do  $g \in X$ , jeśli:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N_\varepsilon \in \mathbb{N} \forall n \geq N_\varepsilon : d(x_n, g) < \varepsilon, \quad (98)$$

co możemy alternatywnie zapisać, jako:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} d(x_n, g) = 0. \quad (99)$$

Oczywiście jeśli  $x_n \rightarrow g$  i  $x_n \rightarrow g'$ , to  $g = g'$  - co wynika z faktu, że jedynym elementem odległym o 0 od  $g$  jest  $g$ . Ponadto jeśli  $x_n \rightarrow g$  to każdy podciąg  $(x_{n_k})_{k \in \mathbb{N}}$  także dąży do  $g$ :  $x_{n_k} \xrightarrow{k \rightarrow \infty} g$ .

**Definicja 4.4. Równoważność metryk**

Niech  $d$  i  $\delta$  będą metrykami na  $X$ . Powiemy, że  $d$  i  $\delta$  są równoważne, jeśli:

$$\exists_{C_1, C_2 \in \mathbb{R}} : \forall_{x, y \in X} : C_1 d(x, y) \leq \delta(x, y) \leq C_2 d(x, y). \quad (100)$$

Łatwo widać, że jest to relacja symetryczna, przechodnia i zwrotna.

**Przykład** Metryk  $d_p$  i  $d_\infty$  na  $\mathbb{R}^n$  są równoważne, albowiem:

$$d_\infty(x, y) = \max_i |x_i - y_i| \leq d_p(x, y) = \left( \sum_{n=1}^n |x_n - y_n|^p \right)^{\frac{1}{p}}. \quad (101)$$

Ponadto:

$$d_p(x, y)^p \leq n d_\infty(x, y)^p \implies d_p(x, y) \leq n^{\frac{1}{p}} d_\infty(x, y) \quad (102)$$

Wystarczy więc wziąć  $C_1 = 1$  i  $C_2 = n^{\frac{1}{p}}$ .

**Obserwacja 6.**

Jeśli  $d$  i  $\delta$  są równoważne, to  $x_n \rightarrow g$  w  $(X, d) \iff x_n \rightarrow g$  w  $(X, \delta)$ .

**Definicja 4.5. Warunek Cauchy'ego**

Powiemy, że ciąg  $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$  spełnia **warunek Cauchy'ego** (i.e. że jest **ciągami Cauchy'ego**), jeśli:

$$\forall_{\varepsilon > 0} \exists_{N_\varepsilon \in \mathbb{N}} \forall (m, n \geq N_\varepsilon) : d(x_m, x_n) \leq \varepsilon. \quad (103)$$

**Definicja 4.6. Przestrzeń zupełna**

Powiemy, że przestrzeń  $(X, d)$  jest **zupełna** jeśli każdy ciąg Cauchy'ego w tej przestrzeni jest zbieżny.

Zauważmy, że  $(\mathbb{R}, d_2)$  (czyli liczby rzeczywiste ze standardową metryką Euklidesową) to przestrzeń zupełna, co udowodniliśmy.  $(\mathbb{Q}, d_2)$  nie jest przestrzenią zupełną (gdyż np. ciąg kolejnych przybliżeń dziesiętnych  $\sqrt{2}$  spełnia warunek Cauchy'ego, jednak nie ma w  $\mathbb{Q}$  granicy).

**Definicja 4.7. Kule**

Niech  $(X, d)$  - p-ń metryczna. Wtedy **kulą (otwartą)** o środku  $x_0 \in X$  i promieniu  $r \in \mathbb{R}_+$  nazywamy zbiór:

$$\text{Ball}(x_0, r) = \{x \in X \mid d(x, x_0) < r\}. \quad (104)$$

**Definicja 4.8. Punkty wewnętrzne**

Niech  $(X, d)$  - p-ń metryczna,  $A \subseteq X$  i  $a \in A$ . Powiemy, że  $a$  jest **punktem wewnętrznym**  $A$ , jeśli:

$$\exists_{r > 0} : \text{Ball}(a, r) \subseteq A. \quad (105)$$

Widzimy więc, że jeśli  $a$  jest punktem wewnętrznym  $A$ , to znajduje się w  $A$  razem z pewną kulą wokół siebie - można potocznie sobie więc wyobrazić, że  $a$  nie może być na "brzegu"  $A$ .

#### Definicja 4.9. Zbiór otwarty

Powiemy, że  $A$  jest **otwarty** (w ustalonej  $p$ -ń metrycznej  $(X, d)$ ), jeśli każdy jego punkt jest punktem wewnętrznym:

$$\forall a \in A \exists r > 0 : \text{Ball}(a, r) \subseteq A. \quad (106)$$

Dla ustalonej przestrzeni metrycznej zdefiniujemy  $\mathcal{T}$  jako rodzinę wszystkich zbiorów otwartych w tej przestrzeni. Wprowadzimy też zapis:

$$U \underset{\text{otw.}}{\subseteq} X, \quad (107)$$

jeśli  $U$  jest otwartym podzbiorem  $X$  (i.e. jeśli  $U \in \mathcal{T}$ ).

#### Twierdzenie 4.1. Właściwości $\mathcal{T}$

1.  $\emptyset \in \mathcal{T}$  oraz  $X \in \mathcal{T}$ .
2.  $U, V \in \mathcal{T} \implies U \cap V \in \mathcal{T}$ . Inaczej mówiąc (rozszerzywszy łatwo twierdzenie za pomocą indukcji), skończony iloczyn zbiorów otwartych jest otwarty.
3.  $\{U_i\}_{i \in I}$  - rodzina zbiorów otwartych. Wtedy

$$\bigcup_{i \in I} U_i \in \mathcal{T}. \quad (108)$$

Zauważmy, że nie zakładamy, że jest to skończona (ani nawet przeliczalna) rodzina.

#### Dowód

1. Prawdziwym jest zdanie, że dla każdego elementu należącego do  $\emptyset$  jest on punktem wewnętrznym. Ponadto:

$$\forall x \in X, r > 0 \text{Ball}(x, r) \subseteq X, \quad (109)$$

co wynika za samej definicji Ball.

2. Skoro  $U, V$  są otwarte, to dla każdego  $x \in U \cap V$  istnieją  $r_1$  i  $r_2$  takie, że:

$$\text{Ball}(x, r_1) \in U, \quad \text{Ball}(x, r_2) \in V.$$

Wtedy jednak:

$$\text{Ball}(x, \min\{r_1, r_2\}) \in U, \quad \text{Ball}(x, \min\{r_1, r_2\}) \in V.$$

Wystarczy więc wziąć  $r = \min\{r_1, r_2\}$

3. Dla każdego  $x \in \bigcup_{i \in I} U_i$  mamy  $i \in I$  takie, że  $x \in U_i$ . Wtedy jednak istnieje takie  $r$ , że  $\text{Ball}(x, r) \in U_i$ , przeto  $\text{Ball}(x, r) \in \bigcup_{i \in I} U_i$ .

#### Twierdzenie 4.2.

Kula otwarta jest otwarta.

### dowód

Istotnie, jeśli niech  $y \in \text{Ball}(x, r)$ . Wtedy  $d(x, y) < r$ . Zauważmy, że  $\text{Ball}(y, r - d(x, y)) \subseteq \text{Ball}(x, r)$ , bowiem jeśli  $z \in \text{Ball}(y, r - d(x, y))$ , to  $d(z, y) < r - d(x, y)$ , zatem:

$$d(z, x) < d(z, y) + d(y, x) < r,$$

czyli  $z \in \text{Ball}(x, r)$ .

### Definicja 4.10. Punkt skupienia

Niech  $(X, d)$  - p-ń metryczna i  $A \subseteq X$ , wtedy punkt  $x \in X$  nazwiemy **punktem skupienia**  $A$ , jeśli:

$$\forall_{r>0} : \text{Ball}(x, r) \cap A \neq \emptyset. \quad (110)$$

### Definicja 4.11. Zbiór domknięty

Zbiór  $A$  nazwiemy **domkniętym** jeśli zawiera wszystkie swoje punkty skupienia. To znaczy:

$$\forall_{x \in X} [\forall_{r>0} : \text{Ball}(x, r) \cap A \neq \emptyset \implies x \in A]. \quad (111)$$

Podobnie jak  $\mathcal{T}$ , zdefiniujemy  $\mathcal{F}$  jako rodzinę wszystkich zbiorów domkniętych w danej przestrzeni. Będziemy również pisać:

$$U \underset{\text{domk.}}{\subseteq} X, \quad (112)$$

jeśli  $U$  jest domkniętym podzbiorem  $X$ .

### Definicja 4.12. Kula domknięta

**Kulą domkniętą** o środku  $x_0 \in X$  i promieniu  $r \in \mathbb{R}_+$  nazwiemy zbiór:

$$\overline{\text{Ball}}(x, r) = \{x \in X \mid d(x, x_0) \leq r\}. \quad (113)$$

### Twierdzenie 4.3.

Kula domknięta jest domknięta.

### Dowód

Niech  $y \notin \overline{\text{Ball}}(x, r)$ . Wtedy  $d(y, x) > r$ . Weźmy  $R = d(y, x) - r > 0$ . Wtedy  $\text{Ball}(y, R) \cap \overline{\text{Ball}}(x, r) = \emptyset$ . Albowiem, jeśli  $z \in \text{Ball}(y, R)$ , to  $d(z, y) < d(y, x) - r$ , zatem  $d(x, z) \geq d(x, y) - d(z, y) > r$ , czyli  $z \notin \overline{\text{Ball}}(x, r)$ .

### Twierdzenie 4.4. Dopelnienie zbioru otwartego jest domknięte

Niech  $A \subseteq X$ .  $A$  jest otwarty wtedy i tylko wtedy, gdy  $X \setminus A$  jest domknięty.

### Dowód

Mamy następujący ciąg równoważności:

$$(X \setminus A) - \text{domknięty} \iff (114)$$

$$\forall y \notin (X \setminus A) \exists r > 0 : \text{Ball}(y, r) \cap (X \setminus A) = \emptyset \iff (115)$$

$$\forall y \in A \exists r > 0 : \text{Ball}(y, r) \subseteq X \setminus (X \setminus A) = A \iff (116)$$

$$A - \text{otwarty} (117)$$

Zauważmy, że istnieją zbiory jednocześnie domknięte i otwarte. Na przykład w każdej przestrzeni metrycznej są to  $\emptyset$  oraz cała przestrzeń. W  $\mathbb{R}$  są to jedynie takie zbiory. Za to w przestrzeni dyskretniej, wszystkie zbiory mają tę własność.

### Twierdzenie 4.5.

Zbiór  $A$  jest otwarty wtedy i tylko wtedy, gdy  $A$  jest sumą kul.

### Dowód

$\implies$  Możemy wybrać sumę rodziny generowanej w ten sposób, że każdemu elementowi przypisujemy kulę mu odpowiadającą, która należy do  $A$ :

$$\forall y \in A \exists r(y) > 0 : \text{Ball}(y, r(y)) \subseteq A. (118)$$

Zatem:

$$A = \bigcup_{y \in A} \{y\} \subseteq \bigcup_{y \in A} \text{Ball}(y, r(y)) (119)$$

oraz:

$$\bigcup_{y \in A} \text{Ball}(y, r(y)) \subseteq A, (120)$$

więc:

$$A = \bigcup_{y \in A} \text{Ball}(y, r(y)) (121)$$

$\Leftarrow$  W drugą stronę sprawa jest jasna - suma każdej rodziny kul (i.e. zbiorów otwartych) będzie otwarta.

### Obserwacja 7. na temat $\mathcal{F}$

1.  $\emptyset, X \in \mathcal{F}$ .
2.  $\mathcal{F} = \{X \setminus A \mid A \in \mathcal{T}\}$ .
3.  $A, B \in \mathcal{F} \implies A \cup B \in \mathcal{F}$ . Inaczej mówiąc - skończony iloczyn zbiorów domkniętych jest domknięty.
4.  $\{V_i\}_{i \in I}$  - rodzina zbiorów domkniętych. Wtedy

$$\bigcap_{i \in I} V_i \in \mathcal{T}. (122)$$

Fakty te są oczywistą konsekwencją własności  $\mathcal{T}$  i prawa, które mówi, że dopełnienie zbioru otwartego jest domknięte.

Spójrzmy jeszcze na przykład, pokazujący, że w 3. własność ta zachodzi tylko dla sum skończonych:

$$]0, 1[ = \bigcup_{i=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{n}, 1 - \frac{1}{n} \right].$$

#### Definicja 4.13. Wnętrze i domknięcie

Niech  $B \subseteq X$ .

**Wnętrzem** zbioru  $B$ , oznaczanym  $B^\circ$ , nazywamy zbiór wszystkich punktów wewnętrznych  $B$ .

**Domknięciem** zbioru  $B$ , oznaczanym  $\bar{B}$ , nazywamy zbiór punktów skupienia  $B$ .

Innymi słowy:

$$x \in B^\circ \iff \exists_r : \text{Ball}(x, r) \subseteq B. \quad (123)$$

$$x \in \bar{B} \iff \forall_r : \text{Ball}(x, r) \cap B \neq \emptyset. \quad (124)$$

#### Obserwacja 8.

$$B^\circ \subseteq B \subseteq \bar{B} \quad (125)$$

#### Obserwacja 9.

- $B$  - otwarty  $\iff B^\circ = B$ .
- $B$  - domknięty  $\iff \bar{B} = B$ .

#### Twierdzenie 4.6.

$$X \setminus \bar{B} = (X \setminus B)^\circ \quad (126)$$

lub

$$\bar{B} = X \setminus (X \setminus B)^\circ. \quad (127)$$

#### Dowód

$$x \in X \setminus \bar{B} \iff x \text{ nie jest punktem skupienia } B \iff \exists_r \text{Ball}(x, r) \cap B = \emptyset \iff \exists_r \text{Ball}(x, r) \cap B \subseteq X \setminus B \iff x \in (X \setminus B)^\circ.$$

Powiemy teraz o bardzo ważnym twierdzeniu pozwalającym utożsamić punkty skupienia z granicami ciągów ze zbioru.

#### Twierdzenie 4.7.

Niech  $B \subseteq X$ . Wtedy domknięcie  $B$  to zbiór granic ciągów z  $B$ , tj.:

$$\bar{B} = \left\{ \lim_{n \rightarrow \infty} x_n \mid (x_n)_{n \in \mathbb{N}} \wedge \forall_n x_n \in B \right\}. \quad (128)$$

### Dowód

⊇ Dla każdego  $x \in \overline{B}$  zdefiniujmy ciąg  $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$  następująco - niech  $x_n$  to dowolny element należący do  $\text{Ball}(x, \frac{1}{n}) \cap B$  (jest to zbiór zawsze niepusty na mocy tego, że  $x$  jest punktem skupienia  $B$ ). Oczywiście  $x_n \rightarrow x$ , gdyż  $d(x_n, x) < \frac{1}{n} \rightarrow 0$ .

⊆ Odwrotnie, jeśli  $x_n \rightarrow x$  i  $\forall_n : x_n \in B$ , to:

$$\forall_{\varepsilon > 0} \exists_{N_\varepsilon} \forall_{n \geq N_\varepsilon} : B \ni x_n \in \text{Ball}(x, \varepsilon) \implies \forall_{\varepsilon > 0} \text{Ball}(x, \varepsilon) \cap B \neq \emptyset, \quad (129)$$

skąd mamy  $x \in \overline{B}$ .

### Definicja 4.14. Ograniczoność

Powiemy, że  $B \subseteq X$  jest **ograniczony**, jeśli:

$$\exists_{x \in X, r > 0} : B \subseteq \text{Ball}(x, r). \quad (130)$$

### Definicja 4.15. Gęstość

Powiemy, że  $A \subseteq X$  jest **gęsty** w  $B \subseteq X$ , jeśli:

$$B \subseteq \overline{A}. \quad (131)$$

Uwaga! Mówiąc po prostu, że zbiór jest gęsty, mamy na myśli, że jest gęsty w  $X$ .

**Przykład**  $\mathbb{Q}$  jest gęsty w  $\mathbb{R}$ .

### Definicja 4.16. Otoczenie

$A \subseteq X$  jest otoczeniem punktu  $x \in X$ , jeśli:

$$\exists_{U \subseteq X \atop \text{otw.}} : x \in U \subseteq A. \quad (132)$$

Warunek ten jest równoważny temu, że  $x \in A^\circ$ .

Dla danego punktu rodzinę wszystkich jego otoczeń oznaczamy będziemy  $\mathcal{N}(x)$ :

$$\mathcal{N}(x) = \{A \in \mathcal{P}(X) = 2^X \mid x \in A^\circ\}. \quad (133)$$

### Twierdzenie 4.8.

Niech  $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$  będzie ciągiem elementów  $X$ . Wtedy:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x \iff \forall_{A \in \mathcal{N}(x)} \exists_{N_A \in \mathbb{N}} \forall_{n \geq N_A} : x_n \in A. \quad (134)$$

### Dowód

$\Leftarrow$  Weźmy  $A_\varepsilon \text{Ball}(x, \varepsilon)$ . Wtedy:

$$\forall_{\varepsilon > 0} \exists_{N_\varepsilon} \forall_{n \geq N_\varepsilon} : x_n \in \text{Ball}(x, \varepsilon) \implies d(x_n, x) < \varepsilon. \quad (135)$$



implies  $x_n$  zbiega do  $x$ , zatem:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N_\varepsilon \forall n \geq N_\varepsilon : d(x_n, x) < \varepsilon.$$

Mamy też:

$$A \in \mathcal{N}(x) \implies \exists \varepsilon : \text{Ball}(x, \varepsilon) \subseteq A.$$

Wystarczy więc wziąć  $N_A = N_\varepsilon$ . Wtedy będzie:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists N_\varepsilon \forall n \geq N_\varepsilon : (d(x_n, x) < \varepsilon \wedge \text{Ball}(x, \varepsilon) \subseteq A) \implies x_n \in A. \quad (136)$$

Twierdzenie to mówi nie mniej, nie więcej niż to, że jeśli ciąg zbiega do jakiegoś punktu, to w każdym otoczeniu tego punktu znajdują się prawie wszystkie wyrazy tego ciągu.

#### Twierdzenie 4.9.

Niech  $(X, d)$  - p-ń. metryczna, niech  $Y \subseteq X$  i niech  $d_Y = d|_{Y \times Y}$  będzie obcięciem  $d$  do  $Y$ . Wtedy:

1.  $A \subseteq Y$  jest otwarty w  $(Y, d_Y) \iff \exists_{\substack{U \subseteq X \\ \text{otw.}}} : A = Y \cap U.$
2.  $A \subseteq Y$  jest domknięty w  $(Y, d_Y) \iff \exists_{\substack{F \subseteq X \\ \text{domk.}}} : A = Y \cap F.$

Twierdzenie to daje nam pojęcie o tym, jak wyglądają zbiory otwarte i domknięte w jakimś zawężeniu metryki - mianowicie są to zawężenia odpowiednich zbiorów otwartych i domkniętych.

#### Dowód

Zacniemy od dowodu 2.

$\implies$  Niech  $A$  domknięty w  $Y$  i niech  $F$  będzie domknięciem  $A$  w  $X$  (więc  $F$  musi być domknięty w  $X$ ). Wtedy:

$$F = \{ \lim_{n \rightarrow \infty} a_n \in X \mid a_n \in A \},$$

za to:

$$A = \{ \lim_{n \rightarrow \infty} a_n \in Y \mid a_n \in A \},$$

gdyż  $A$  jest domknięty w  $Y$ . Widzimy z tych definicji łatwo, że  $A = F \cap Y$ .

$\Leftarrow$  W drugą stronę, niech  $A = Y \cap F$  i  $F$  będzie domknięty w  $X$ . Niech  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  będzie ciągiem w  $A$  (więc i w  $F$ ), zbiegającym do  $g$ . Wtedy  $g \in F$ . Zatem jeśli  $g \in Y$ , to  $g \in A$ , z konstrukcji  $A$ . Pokazaliśmy więc, że każdy ciąg z  $A$  zbieżny w  $Y$  ma granicę w samym  $A$ , zatem  $A$  jest domknięty.

2.  $\implies$  1. Pokażemy teraz, jak z 2. wynika 1. Mamy bowiem ciąg następujących równoważności:

$$A \subseteq Y \text{ jest otwarty w } Y \iff Y \setminus A \text{ jest domknięty w } Y \iff \exists_{\substack{F \subseteq X \\ \text{domk.}}} : Y \setminus A = Y \cap F \iff$$

$$\exists_{\substack{F \subseteq X \\ \text{domk.}}} : A = Y \cap (X \setminus F) \iff \exists_{\substack{U \subseteq X \\ \text{otw.}}} : A = Y \cap U.$$

Przedostatnia równoważność, wynika z faktu, że jeśli  $Y \setminus A = Y \cap F$ , to  $A = Y \setminus (Y \cap F) = Y \setminus F = Y \cap (X \setminus F)$  (pamiętamy, że  $Y \subseteq X$ ). Ostatnia równoważność jest konsekwencją tego, że dopełnienie zbioru domkniętego jest otwarte (Tw. 4.1).

## 4.2 Przekształcenia ciągłe

Zacniemy rozważać teraz przekształcenia (i.e. funkcje) pomiędzy przestrzeniami metrycznymi i wyróżnimy wśród nich szczególnie ważną klasę funkcji ciągłych.

### Twierdzenie 4.10. Warunki ciągłości

Niech  $(X, d)$  i  $(Y, \delta)$  będą przestrzeniami metrycznymi, a  $\Phi : X \rightarrow Y$  przekształceniem między nimi. Ustalmy też  $x_0 \in X$ . Wtedy następujące warunki są równoważne:

$$1. \quad \forall \varepsilon > 0 \exists \lambda_\varepsilon > 0 \forall x \in X : d(x, x_0) < \lambda_\varepsilon \implies \delta(\Phi(x), \Phi(x_0)) < \varepsilon. \quad (137)$$

$$2. \quad \forall U \in \mathcal{N}(\Phi(x_0)) \exists V \in \mathcal{N}(x_0) : \Phi(V) \subseteq U. \quad (138)$$

$$3. \quad \forall U \in \mathcal{N}(\Phi(x_0)) : \Phi^{-1}(U) \in \mathcal{N}(x_0). \quad (139)$$

(Przypominamy, że  $\Phi^{-1}(U)$  to w przeciwobraz  $U$ ).

4. Jeśli  $x_n \rightarrow x_0$  w  $(X, d)$ , to  $\Phi(x_n) \rightarrow \Phi(x_0)$  w  $(Y, \delta)$ .

### Dowód

1.  $\implies$  2. Dla dowolnego  $U \in \mathcal{N}(\Phi(x_0))$  istnieje  $\varepsilon > 0$ :

$$\text{Ball}(\Phi(x_0), \varepsilon) \subseteq U.$$

Z 1. weźmy więc  $\lambda_\varepsilon$  spełniające podaną implikację i  $V = \text{Ball}(x_0, \lambda_\varepsilon)$ . Wtedy:

$$\Phi(x \in V) \in \text{Ball}(\Phi(x_0), \varepsilon),$$

zatem:

$$\Phi(V) \subseteq \text{Ball}(\Phi(x_0), \varepsilon) \subseteq U.$$

2.  $\implies$  3. Weźmy dowolne  $U \in \mathcal{N}(\Phi(x_0))$ . Wtedy:

$$\exists V \in \mathcal{N}(x_0) : \Phi(V) \subseteq U,$$

i.e.  $V \subseteq \Phi^{-1}(U)$ . Ale skoro  $V \in \mathcal{N}(x_0)$ , to tym bardziej  $\Phi^{-1}(U) \in \mathcal{N}(x_0)$ , jako rozszerzenie  $V$ .

3.  $\implies$  4. Weźmy ciąg  $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$  zbieżny do  $x_0$ . Niech  $U \in \mathcal{N}(\Phi(x_0))$ , skąd  $\Phi^{-1}(U) \in \mathcal{N}(x_0)$ . Zatem:

$$\exists N_U \forall n \geq N_U : x_n \in \Phi^{-1}(U),$$

z twierdzenia udowodnionego wcześniej. Ergo:

$$\forall U \in \mathcal{N}(\Phi(x_0)) \exists N_U \forall n \geq N_U : \Phi(x_n) \in U.$$

Zatem, z tego samego twierdzenia:

$$\Phi(x_n) \rightarrow \Phi(x_0).$$

4.  $\implies$  1. Dowodzimy nie wprost, że  $\neg 1. \implies \neg 4.$  Zaprzeczeniem 1. jest:

$$\exists \varepsilon > 0 \forall \lambda \exists x_\lambda \in X : d(x_\lambda, x_0) < \lambda \wedge \delta(\Phi(x_\lambda), \Phi(x_0)) \geq \varepsilon.$$

Weźmy  $\lambda_n = \frac{1}{n}$  i na tej podstawie skonstruujemy ciąg  $x_n$  odpowiadających  $x_\lambda$  w powyższym stwierdzeniu dla odpowiednich  $\lambda$ . Wtedy musi być, że  $x_n \rightarrow x_0$ , gdyż  $d(x_n, x_0) < \frac{1}{n}$ , ale  $\Phi(x_n) \not\rightarrow \Phi(x_0)$ , gdyż  $\delta(\Phi(x_n), \Phi(x_0)) \geq \varepsilon \forall n$ . Zatem zachodzi  $\neg 4.$

#### Definicja 4.17. Odwzorowanie ciągłe

Odwzorowanie spełniające warunki 1. - 4. Twierdzenia 4.2 dla punktu  $x_0 \in X$  nazywamy **ciągłym** w  $x_0$  (w p-ń.  $(X, d)$ ). Jeśli odwzorowanie jest ciągłe w każdym punkcie przestrzeni, nazywamy je po prostu ciągłym.

Czasami, mając na myśli warunek 1., mówimy o tzw. zbieżności według Cauchy'ego, zaś o warunku 4. mówimy, jako zbieżności według Heinego.

#### Twierdzenie 4.11. Złożenie odwzorowań ciągłych jest ciągłe

Jeśli  $\Phi : X \rightarrow Y$  jest ciągłe w  $x_0 \in X$  i  $\Psi : Y \rightarrow Z$  jest ciągłe w  $\Phi(x_0)$ , to  $\Psi \circ \Phi : X \rightarrow Z$  jest ciągłe w  $X_0$ .

#### Dowód

Korzystając np. z 4. warunku ciągłości, weźmy ciąg  $x_n \rightarrow x_0$ , wtedy  $\Phi(x_n) \rightarrow \Phi(x_0)$  z ciągłości  $\Phi$ . Ponadto  $\Psi(\Phi(x_n)) \rightarrow \Psi(\Phi(x_0))$  z ciągłości  $\Psi$ . Widzimy, więc prosto, że  $\Psi \circ \Phi$  musi być ciągłe.

#### Twierdzenie 4.12. Ciągłość na całej dziedzinie

$\Phi : X \rightarrow Y$  jest ciągłe na całym  $X$  wtedy i tylko wtedy, gdy:

$$\forall_{\substack{U \subseteq Y \\ \text{otw.}}} : \Phi^{-1}(U) \subseteq X. \quad (140)$$

Inaczej mówiąc, przekształcenie jest ciągłe na całej dziedzinie wtedy i tylko wtedy, gdy przeciwobrazy zbiorów otwartych są otwarte.

#### Dowód

$\implies$  Niech  $U \subseteq Y$  i  $x \in \Phi^{-1}(U)$ . Zatem  $\Phi(x) \in U$ . Skoro  $U$  jest otwarty, to musi być otoczeniem  $\Phi(x)$ , i.e.  $U \in \mathcal{N}(\Phi(x))$ , zatem (warunek 3.):

$$\Phi^{-1}(U) \in \mathcal{N}(x) \quad \forall_{x \in \Phi^{-1}(U)},$$

czyli  $\Phi^{-1}(U)$  jest otwarty.

$\Leftarrow$  Udowadniamy warunek 2.:

$$\forall_{\substack{U \subseteq Y \\ \text{otw.}}} : \Phi^{-1}(U) \subseteq X.$$

Weźmy  $x \in X$  i  $U \in \mathcal{N}(\Phi(x))$ . Wtedy:

$$\exists_{\substack{\tilde{U} \subseteq X \\ \text{otw.}}} : \Phi(x) \in \tilde{U} \subseteq U,$$

więc  $V = \Phi^{-1}(\tilde{U})$  - otwarty. Ponadto  $x \in V$ . Zatem  $V \in \mathcal{N}(x)$ , oraz  $\Phi(V) \subseteq \tilde{U} \subseteq U$ , więc 2. zachodzi.

#### Definicja 4.18. Ciągłość jednostajna

$\Phi : X \rightarrow Y$  nazwiemy **jednostajnie ciągłym**, jeśli:

$$\forall_{\varepsilon > 0} \exists_{\lambda_\varepsilon} : \forall_{x, x' \in X} : d(x, x') \leq \lambda_\varepsilon \implies \delta(\Phi(x), \Phi(x')) \leq \varepsilon. \quad (141)$$

Ważną częścią tejże definicji jest to, że wybór  $\lambda$  zależy jedynie od  $\varepsilon$ , nie zaś od samych punktów  $x, x'$ .

#### Obserwacja 10.

Każda funkcja jednostajnie ciągła, jest ciągła.

#### Definicja 4.19. Przekształcenie Lipschitzowskie

Przekształcenie  $\Phi : X \rightarrow Y$  nazwiemy **Lipschitzowskim** (i.e. spełniającym **warunek Lipschitza**), jeśli:

$$\exists_{L > 0} \forall_{x, x' \in X} : \delta(\Phi(x), \Phi(x')) \leq L \cdot d(x, x'). \quad (142)$$

Warunek ten mówi, że odległość między wartościami funkcji jest zawsze ograniczona przez odległość między jej argumentami (z pewną proporcjonalnością).

#### Obserwacja 11.

Funkcje Lipschitzowskie są ciągłe jednostajnie.

Istotnie - wystarczy ustalić:  $\lambda_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{L}$ .

### 4.3 Zwartość

Powiemy teraz o bardzo ważnym pojęciu charakteryzującym zbiory w przestrzeni metrycznej - to jest o zwartości.

#### Definicja 4.20. Pokrycie

Ustalmy  $(X, d)$  - p-ń. metryczną. **Pokryciem** zbioru  $K$  nazwiemy rodzinę zbiorów  $U = \{U_i\}_{i \in I}$ ,  $U_i \subseteq X$ , taką że:

$$K \subseteq \bigcup_{i \in I} U_i. \quad (143)$$

Pokrycie jest otwarte, jeśli wszystkie  $U_i$  są otwarte. Pokrycie  $V = \{V_i\}_{i \in I'}$  nazwiemy podpokryciem  $U$ , jeśli  $V \subseteq U$ .

**Przykład** Dla  $X = \mathbb{R}$ ,  $K = [0, 1]$ , pokryciem  $K$  jest rodzina:

$$U_{n \in \mathbb{N}} : U_n = [0, 1 + \frac{1}{n}].$$

Nie jest to pokrycie otwarte.

#### Definicja 4.21. Zwartość (pokryciowa)

Zbiór  $K \subseteq X$  nazwiemy **ZWARTYM**, jeśli z każdego pokrycia otwartego tegoż zbioru, można wybrać podpokrycie skończone (tj. mające skończoną liczbę elementów). Jeśli  $K$  jest zwartym podzbiorem  $X$ , to zapiszemy  $K \subseteq\subseteq X$ .

#### Twierdzenie 4.13. Własności zbiorów zwartych

1. Każdy zbiór zwarty jest ograniczony.
2. Każdy zbiór zwarty jest domknięty.

#### Dowód

Niech  $K \subseteq\subseteq X$ .

1. Weźmy dowolny  $x \in X$ . Wtedy  $\{\text{Ball}(x, \frac{1}{n})\}_{n \in \mathbb{N}}$  niewątpliwie jest pokryciem otwartym  $K$ . Skoro tak, to można zeń wybrać skończone podpokrycie. Zatem istnieje  $N \in \mathbb{N}$ , będące największym z indeksów z tegoż podpokrycia, takie że:

$$K \subseteq \text{Ball}(x, N),$$

jako że kolejne z tych kul zawierają w sobie poprzednie. Widzimy więc, że  $K$  jest ograniczony.

2. Dowód nie wprost. Przypuśćmy, że  $\exists y$  będący punktem skupienia  $K$ , t.ż.  $y \notin K$ . Weźmy rodzinę zbiorów  $\{X \setminus \overline{\text{Ball}}(y, \frac{1}{n})\}_{n \in \mathbb{N}}$ . Niewątpliwie jest to pokrycie otwarte, gdyż wszystkie z tych zbiorów są otwarte i sumują się one do  $X \setminus \{y\}$ . Wybierzmy z niego więc skończone podpokrycie i niech  $N$  będzie największym z indeksów w tym podpokryciu. Zauważmy, że wtedy sumujw się ono do  $X \setminus \overline{\text{Ball}}(y, \frac{1}{N})$ , jako że kolejne z tych zbiorów zawierają w sobie poprzednie. Mamy więc, że  $K \subseteq X \setminus \overline{\text{Ball}}(y, \frac{1}{N})$ . Wtedy jednak  $\text{Ball}(y, \frac{1}{N}) \cap K \subseteq \overline{\text{Ball}}(y, \frac{1}{N}) \cap K = \emptyset$ , co przeczy temu, że  $y$  jest punktem skupienia  $K$ . Sprzeczność! Zatem  $K$  rzeczywiście musi być domknięty.

**Definicja 4.22. Zwartość ciągowa**

Powiemy, że podzbiór  $K \subseteq X$  jest **ciągowo zwarty**, jeśli każdy ciąg  $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$  zawarty w  $K$  ( $x_n \in K$ ) zawiera podciąg zbieżny do granicy w  $K$ :

$$\forall (x_n)_{n \in \mathbb{N}}, x_n \in K \exists k \mapsto n_k : x_{n_k} \rightarrow g \in K. \quad (144)$$

**Twierdzenie 4.14.**

Zbiór  $K$  ciągowo zwarty jest także domknięty.

**Dowód**

Istotnie, jeśli ciąg  $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$  elementów z  $K$  jest zbieżny, to każdy jego podciąg jest zbieżny do tej samej granicy. Ale skoro  $K$  jest ciągowo zwarty, to  $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$  ma podciąg zbieżny do elementu z  $K$ , który będzie wspólną granicą wszystkich podciągów. Zatem i granica  $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$  musi leżeć w  $K$ .

**Definicja 4.23.  $\varepsilon$  - sieć**

Niech  $K \subseteq X$  i  $\varepsilon > 0$ . Wtedy  $S \subseteq X$  nazwiemy  **$\varepsilon$  - siecią dla  $K$**  jeśli:

$$\forall z \in K \exists s \in S : z \in \text{Ball}(s, \varepsilon). \quad (145)$$

$S$  jest  $\varepsilon$  - siecią w  $K$  jeśli jest  $\varepsilon$  - siecią dla  $K$  i  $S \subseteq K$ .

**Twierdzenie 4.15.**

Jeśli  $K$  jest ciągowo zwarty, to dla każdego  $\varepsilon > 0$  istnieje skończona  $\varepsilon$  - sieć w  $K$ .

**Dowód**

**Dowód nie wprost.** Przypuśćmy, że istnieje  $\varepsilon > 0$ , t.ż. w  $K$  nie ma skończonej  $\varepsilon$  - sieci. Skonstruujmy wtedy następująco ciąg  $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$  i rodzinę zbiorów  $(U_n)_{n \in \mathbb{N}}$ :  
Niech  $x_1 \in K$  będzie dowolne i  $U_1 = \text{Ball}(x_1, \varepsilon)$ . Oczywiście  $U_1$  nie pokrywa  $K$  (z założenia):  $K \setminus U_1 \neq \emptyset$ . Za  $x_2$  bierzemy więc dowolny element w  $K \setminus U_1$ , a  $U_2 = U_1 \cup \text{Ball}(x_2, \varepsilon)$ . Ogólnie  $x_n \in K \setminus U_{n-1}$  i  $U_n = U_{n-1} \cup \text{Ball}(x_n, \varepsilon)$ . Oczywiście  $K \setminus U_{n-1} \neq \emptyset$ , gdyż gdyby było inaczej, to z konstrukcji mielibyśmy wbrew założeniu skończoną  $\varepsilon$  - sieć pokrywającą  $K$ .  
Otrzymaliśmy ciąg  $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ , który jednak nie może mieć podciągu zbieżnego, gdyż nie spełnia warunku Cauchy'ego - z konstrukcji jasno widać, że  $\forall i < j : d(x_i, x_j) \geq \varepsilon$ , jako że  $x_j \in K \setminus U_{j-1} \subseteq K \setminus U_i$ . Przeczy to założeniu, że  $K$  jest ciągowo zwarty.

**Twierdzenie 4.16.**

Jeśli  $K$  jest ciągowo zwarty, to istnieje przeliczalny  $D \subseteq K$ , t.ż.  $\overline{D} = K$  i.e.  $D$  jest gęsty w  $K$ .

**Dowód**

Weźmy

$$D = \bigcup_{n=1}^{\infty} S_{\frac{1}{n}} \subseteq K,$$

gdzie jako  $S_{\varepsilon}$  oznaczyliśmy skończoną  $\varepsilon$  - sieć w  $K$ , która na mocy Tw. 4.3 istnieje. Jasno wi-  
dać, że  $D$  jest przeliczalny. Wtedy  $\overline{D} \subseteq K$ , gdyż dla każdego  $y \in K$  tworzymy ciąg  $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$   
elementów, takich że  $x_n \in S_{\frac{1}{n}}$  i  $y \in \text{Ball}(x_n, \frac{1}{n})$ , co zawsze możemy zrobić, bo  $S_{\frac{1}{n}}$  są  $\varepsilon$  - sie-  
ciami w  $K$ . Wtedy  $d(x_n, y) < \frac{1}{n} \rightarrow 0$ , więc  $x_n \rightarrow y$ , czyli  $y \in \overline{D}$ . Odwrotnie mamy  $\overline{D} \supseteq K$ , bo  
 $D \subseteq K \implies \overline{D} \subseteq \overline{K}$  (domknięcie jest monotoniczne, a  $K$  jest domknięty por. Tw. 4.3). Z tych  
dwu inkluzji mamy tezę.

**Twierdzenie 4.17.**

Jeśli  $K$  jest ciągowo zwarty, do każde jego pokrycie otwarte ma przeliczalne podpokrycie.

**Dowód**

Niech  $U$  - pokrycie otwarte  $K$ . Dla dowolnego  $y \in K$  zdefiniujmy:

$$n_y = \min\{n \in \mathbb{N} \mid \exists U_y \in U : \text{Ball}(y, \frac{1}{n}) \subseteq U_y\}.$$

Taka liczba będzie bez wątpienia istniała, gdyż  $U$  pokrywa  $K$  i składa się z samych zbiorów  
otwartych. Niech  $U_y$  będzie zbiorem spełniającym powyższy warunek dla  $y \in K$ . Niech  $V =$   
 $\{U_y \mid y \in D\}$ , gdzie  $D$  to przeliczalny podzbiór gęsty w  $K$  (istnieje on na mocy Tw. 4.3). Jasne,  
że  $V \subseteq U$  i że  $V$  jest przeliczalny. Pokażemy, że jest to podpokrycie.

Niech  $x \in K$ . Wiemy, że  $\exists U_x \in U, N \in \mathbb{N} : \text{Ball}(x, \frac{1}{N}) \subseteq U_x$ . Ponadto, jako że  $D$  jest gęsty w  $K$ , to  
 $\exists y \in D : d(y, x) < \frac{1}{2N}$ . Wtedy:

$$x \in \text{Ball}(y, \frac{1}{2N}) \implies \text{Ball}(y, \frac{1}{2N}) \subseteq \text{Ball}(x, \frac{1}{N}) \subseteq U_x \in U.$$

Więc  $2N \geq n_y$  z konstrukcji  $n_y$ . Zatem:

$$x \in \text{Ball}(y, \frac{1}{2N}) \subseteq \text{Ball}(y, \frac{1}{n_y}) \subseteq U_y \in V.$$

Czyli  $V$  pokrywa  $K$ .

Jesteśmy już gotowi, żeby udowodnić najważniejsze twierdzenie w tej sekcji.

**Twierdzenie 4.18. Zwartość ciągowa = zwartość pokryciowa**

Zbiór  $K$  jest ciągowo zwarty wtedy i tylko wtedy gdy jest zwarty (pokryciowo).

## Dowód

$\Rightarrow$  Niech  $K \subseteq X$ ,  $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$  będzie ciągiem elementów z  $K$  i niech  $Z = \{x_n \mid n \in \mathbb{N}\}$ . Pokażemy, że zachodzi jedna z dwu możliwości:

1.

$$\exists_{y \in K} : \forall_{U \in \mathcal{N}(y), U \subseteq X \atop \text{otw.}} : |Z \cap U| = \infty.$$

2.  $Z$  jest skończony.

Mianowicie, niech  $\neg 1.$ , i.e.:

$$\forall_{y \in K} : \exists_{U_y \in \mathcal{N}(y), U_y \subseteq X \atop \text{otw.}} : |Z \cap U_y| < \infty.$$

Oczywiście  $\{U_y\}_{y \in K}$  jest pokryciem otwartym  $K$  (gdyż każdy  $y$  zawiera się np. w odpowiadającym mu  $U_y$ ). Wybierzmy więc zeń skończone podpokrycie, tak, żeby:

$$K \subseteq U_{y_1} \cup U_{y_2} \cup \dots \cup U_{y_N}.$$

Mamy jednak  $Z \subseteq K$ , zatem:

$$Z = K \cap Z = (U_{y_1} \cap Z) \cup (U_{y_2} \cap Z) \cup \dots \cup (U_{y_N} \cap Z). \quad (146)$$

Każdy z elementów tej sumy jest skończony, na mocy założenia, zatem  $Z$  także jest skończony, jako skończona suma skończonych.

Widzimy więc, że zachodzi 1. lub 2.:

1. Jeśli zachodzi pierwszy warunek, to skoro:

$$\exists_{y \in K} : \forall_{U \in \mathcal{N}(y), U \subseteq X \atop \text{otw.}} : |Z \cap U| = \infty,$$

to konstruujemy  $k \mapsto n_k$ , tak aby  $\forall_k : n_{k+1} > n_k$  i  $x_{n_k} \in \text{Ball}(y, \frac{1}{k})$ . Jest to możliwe, bo każde otwarte otoczenie  $y$  zawiera nieskończenie wiele elementów ciągu  $x_n$ , w szczególności zawiera element o indeksie większym od dowolnej liczby. Oczywiście z podanej konstrukcji mamy  $x_{n_k} \rightarrow y \in K$ .

2. Jeśli  $Z$  jest skończony, to z zasady szuflatkowej istnieje wartość  $x \in Z \subseteq K$ , która zostanie odwiedzona nieskończenie wiele razy przez wyrazy ciągu  $x_n$  - można więc wziąć podciąg stały równy  $x$  i oczywiście do tej liczby zbieżny.

Widzimy więc, że w obu przypadkach potrafimy skonstruować podciąg zbieżny w  $K$ , zatem  $K$  istotnie jest ciągowo zwarty.

$\Leftarrow$  Dowód przeprowadzimy nie wprost. Niech  $K$  będzie ciągowo zwartym,  $U$  pewnym jego pokryciem otwartym, a  $V = V_{i \in \mathbb{N}}$  jego przeliczalnym podpokryciem, które na mocy Tw. 4.3 istnieje. Przypuśćmy, że żadna skończona podrodzina  $V$  nie jest pokryciem  $K$ . Wtedy dla  $n \in \mathbb{N}$  wybieramy  $x_n \in K \setminus (\bigcup_{i=1}^n V_i)$ . Oczywiście zbiór z którego wybieramy  $x_n$  będzie niepusty na mocy założenia, że żadna skończona podrodzina  $V$  nie pokrywa  $K$ . Otrzymujemy ciąg  $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$  elementów z  $K$ , więc ma on podciąg zbieżny do  $y \in K$ . Ale  $\exists_N : y \in V_N$ . Skoro jednak  $V_N$  jest otwarty (gdyż wyjściowe pokrycie  $U$  było otwarte), to prawie wszystkie wyrazy podciągu  $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$  zbieżnego do  $y$  powinny leżeć w  $V_N$ . Jednakże tylko skończona liczba wyrazów  $x_n$  leży w  $V_N$ , gdyż dla  $n \geq N$ :  $x_n \in K \setminus V_N$ . Sprzeczność! Musi więc istnieć skończone podpokrycie  $V$ , zatem  $K$  jest zwarty pokryciowo.



**Obserwacja 12.**

Domknięty podzbiór zbioru zwartego jest zwarty.

Istotnie  $K \subseteq X$  wtedy  $C \subseteq K$  wtedy  $C = \overline{C} \implies C \subseteq X$ .

**Twierdzenie 4.19. Bolzano-Weierstrassa II**

Każdy ograniczony i domknięty podzbiór  $\mathbb{R}$  jest zwarty.

**Dowód**

Wynika on prosto z równoważności zwartości ciągowej i pokryciowej. Jeśli jakiś podzbiór  $\mathbb{R}$  jest ograniczony, to zawiera podciąg zbieżny (Twierdzenie 2.2), a skoro jest domknięty, to ów podciąg zbieżny ma granicę w tymże zbiorze. Zatem podzbiór ten jest ciągowo zwarty, czyli zwarty.

**Definicja 4.24. Metryka na iloczynie kartezjańskim**

Rozważmy dwie p-ń metryczne  $(X, d_1)$  i  $(Y, d_2)$ . Można wtedy wprowadzić na ich iloczynie kartezjańskim nową metrykę  $D$ , tworząc p-ń  $(X \times Y, D)$ . Standardowo robi się to w ramach jednej z równoważnych metryk  $d_p$  ( $p \in [1, \infty]$ ) - tak, że  $D((x_1, y_1), (x_2, y_2)) = d_p(d_1(x_1, x_2), d_2(y_1, y_2))$ . Wszystkie te metryki zadają tę samą topologię. Metrykę na iloczynie kartezjańskim większej liczby zbiorów definiuje się indukcyjnie.

**Obserwacja 13.**

$$(x_n, y_n) \xrightarrow{D} (x, y) \iff x_n \rightarrow x \wedge y_n \rightarrow y. \quad (147)$$

Widzimy, że zbieżność na iloczynie kartezjańskim jest "po współrzędnych".

**Twierdzenie 4.20.**

Iloczyn kartezjańskich dwu zbiorów zwartych jest zwarty.

**Dowód**

TODO

**Obserwacja 14.**

Niech  $K \subseteq \mathbb{R}$ . Wtedy  $K$  zawiera swoje kresy.

Rzeczywiście, skoro  $K$  jest zwarty, to i ograniczony:  $\inf K \in \mathbb{R}$  i  $\sup K \in \mathbb{R}$ . Ponadto  $\inf K$  i  $\sup K$  są granicami ciągów z  $K$ , więc do  $K$  należą, skoro  $K$  jest domknięty.

**Twierdzenie 4.21.**

Niech  $(X, d)$  to p-ń. metryczna zupełna. Niech  $K \subseteq X$ . Wtedy, zbiór  $K$  jest zwarty jeżeli  $\forall_{\varepsilon > 0}$  można go pokryć skończoną  $\varepsilon$  - siecią.  
domk.

**Dowód**

TODO

**Twierdzenie 4.22. Obraz zbioru zwartego jest zwarty**

Niech  $(X, d), (Y, \delta)$  będą p-ń. metrycznymi, a  $\phi : X \rightarrow Y$  będzie odwzorowaniem ciągłym. Ponadto niech  $K \subseteq X$ . Wtedy zbiór  $\phi(K)$  jest zwarty.

**Dowód**

Niech  $U = \{U_i\}_{i \in I}$  - rodzina zbiorów otwartych pokrywająca  $\phi(K)$ :  $\phi(K) \subseteq \bigcup_{i \in I} U_i$ . Skonstruujmy rodzinę  $V = \{V_i = \phi^{-1}(U_i)\}$ . Skoro  $\phi$  jest ciągłe, to  $V$  jest rodziną otwartą. Ponadto z właściwości przeciwobrazów:  $K \subseteq \bigcup_{i \in I} V_i$ . Zatem  $V$  jest pokryciem otwartym. Możemy więc zeń wybrać skończone podpokrycie otwarte:

$$K \subseteq V_{i_1} \cup \dots \cup V_{i_n} = \phi^{-1}(U_{i_1}) \cup \dots \cup \phi^{-1}(U_{i_n}).$$

Wtedy:

$$\phi(K) \subseteq \phi(\phi^{-1}(U_{i_1}) \cup \dots \cup \phi^{-1}(U_{i_n})) = \phi(\phi^{-1}(U_{i_1})) \cup \dots \cup \phi(\phi^{-1}(U_{i_n})) \subseteq U_{i_1} \cup \dots \cup U_{i_n}.$$

Zatem dla każdego pokrycia  $\phi(K)$  wybraliśmy zeń skończone podpokrycie - zatem  $\phi(K)$  jest zwarty.

**Obserwacja 15. Odwzorowanie ciągle na zbiorze zwartym osiąga swoje kresy**

Niech  $(X, d)$  - p-ń. metryczna i niech  $f : X \rightarrow \mathbb{R}$  będzie ciągłą funkcją oraz niech  $K \subseteq X$ . Wtedy:

$$\sup_{x \in K} f = \sup f(K) \in f(K) \quad (148)$$

oraz

$$\inf_{x \in K} f = \inf f(K) \in f(K). \quad (149)$$

Wynika to od razu z Twierdzenia 4.3 oraz Obserwacji 4.3.

**Twierdzenie 4.23. Heinego - Borela**

Podzbiór  $K \subseteq \mathbb{R}^n$  jest zwarty wtedy i tylko wtedy, gdy jest domknięty i ograniczony.

**Dowód**

$\Rightarrow$  Por. Tw. 4.3.

$\Leftarrow$  Skoro  $K$  jest ograniczony, to istnieje kostka postaci:

$$C = [a_1, b_1] \times \dots \times [a_n, b_n], \quad (150)$$

t.ż.  $K \subseteq C$ . Ponadto,  $C$  musi być zwarty, jako iloczyn kartezjański dwu zbiorów zwartych (por. Tw. 4.3). Zauważyliśmy jednak, że domknięty podzbiór zbioru zwartego jest zwarty, zatem i  $K$  jest zwarty (Obs. 4.3).

#### Twierdzenie 4.24. Lemat Lebesgue'a

Niech  $(X, d)$  - p-ń. metryczna,  $K \subseteq X$  ( $K$  jest zwartym podzbiorem  $X$ ). Niech  $U$  będzie pokryciem otwartym  $K$ . Wówczas:

$$\exists \lambda > 0 \forall x \in K \exists U_x \in U : \text{Ball}(x, \lambda) \subseteq U_x. \quad (151)$$

**Uwaga!** Liczbę  $\lambda$  podaną w twierdzeniu nazywa się **liczbą Lebesgue'a**.

#### Dowód

Skoro  $K$  - zwarty, to wybierzmy z  $U$  skończone podpokrycie:  $\{U_i\}_{1 \leq i \leq N}$ .

- Jeżeli  $\exists i \leq N : X = U_i$ , to sytuacja nie przedstawia żadnego problemu - za  $\lambda$  bierzemy dowolną liczbę, zaś za  $U_x = X$ . Teza jest trywialnie spełniona.
- Jeżeli  $\forall i \leq N : X \not\subseteq U_i$ , to definiujemy rodzinę  $F_i = X \setminus U_i$  oraz funkcję:

$$f(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d(x, F_i),$$

gdzie

$$d(x, F_i) = \inf_{v \in F_i} \{d(x, v)\}$$

jest dobrze określoną funkcją dla niepustego  $F_i$ .

Oczywiście  $f$  jest ciągła, bo mamy:

$$|f(x) - f(x_0)| = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N d(x, F_i) - d(x_0, F_i) \right| \leq \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \inf_{v \in F_i} \{d(x, v)\} - \inf_{v \in F_i} \{d(x_0, v)\} \right|.$$

Zauważmy, że skoro:

$$d(x, v) \leq d(x_0, v) + d(x, x_0)$$

oraz:

$$d(x_0, v) \leq d(x, v) + d(x, x_0),$$

to:

$$\inf_{v \in F_i} \{d(x, v)\} \leq \inf_{v \in F_i} \{d(x_0, v)\} + d(x, x_0)$$

i:

$$\inf_{v \in F_i} \{d(x_0, v)\} \leq \inf_{v \in F_i} \{d(x, v)\} + d(x, x_0),$$

zatem:

$$|\inf_{v \in F_i} \{d(x, v)\} - \inf_{v \in F_i} \{d(x_0, v)\}| \leq d(x, x_0).$$

Widzimy, więc że

$$|f(x) - f(x_0)| \leq d(x, x_0),$$

czyli  $f$  musi być ciągła.

Skoro  $f$  jest ciągła na zbiorze zwartym  $K$  i  $\forall_{x \in K} : f(x) > 0$  (bo inaczej – gdyby  $f(x) = 0$ , to  $x$  nie należałby do żadnego pokrycia  $U_i$ ), to  $\exists_{x_0} : f(x_0) = \inf f(x) > 0$ . Funkcja ciągła na zbiorze zwartym osiąga swoje kresy. Weźmy  $\lambda = \inf f(x) > 0$ . Skoro mamy  $\forall_{x \in K} : f(x) \geq \lambda$ , a  $f(x)$  jest średnią odległością  $x$  od  $F_i$ , to w szczególności istnieje takie  $F_j$ , że  $\lambda \leq d(x, F_j) = \inf_{v \in U_j} d(x, v) \implies \forall_{v \in U_j} : d(x, v) \geq \lambda$ . Zatem dla tego  $U_j$ :

$$\text{Ball}(x, \lambda) \subseteq U_j.$$

Znaleźliśmy więc szukaną  $\lambda$  i szukane  $U_x = U_j$ . Dowód został zakończony.

**Koniec**

## Spis treści

<b>1</b>	<b>Wstęp</b>	<b>2</b>
1.1	Relacje . . . . .	2
1.2	Liczby rzeczywiste . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Ciagi rzeczywiste</b>	<b>5</b>
2.1	Pojęcie ciągu i ogólne rezultaty . . . . .	5
2.2	limsup i liminf . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Szeregi liczbowe</b>	<b>12</b>
3.1	Szeregi o wyrazach dodatnich . . . . .	13
3.2	Szeregi o wyrazach dowolnych . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Przestrzenie metryczne</b>	<b>25</b>
4.1	Podstawowe definicje. Otwartość i domkniętość . . . . .	25
4.2	Przekształcenia ciągłe . . . . .	34
4.3	Zwartość . . . . .	36