

# Analízis 4 jegyzet, 2023

Kós Géza



(Utolsó módosítás: 2023. április 2., 13:45)

# I. rész

## Integráltételek

1. előadás, 2023.02.28.

Az *integráltételek* olyan azonosságok egy széles gyűjteménye, amikor egy függvény valamilyen deriváltját integráljuk egy térbeli halmazon, és ezt a határon (tehát eggyel kisebb dimenziós halmazon) vett integrállal hasonlítjuk össze.

A legegyszerűbb integráltétel az egyváltozós Newton–Leibniz formula:

$$\underbrace{\int_{[a,b]} f'(x) dx}_{f' \text{ integrálja a halmazon}} = \underbrace{f(b) - f(a)}_{f \text{ összege/integrálja a határon}}$$

... amikor egy függvénynek egy intervallumon vett integrálját a primitív függvénynek a végpontokban vett értékeivel – ha tetszik, integráljával – fejezzük ki. Ezért ezek a tételek a Newton–Leibniz formula általánosításai.

Integráltételek sokféle halmazon léteznek: görbék, feületedarabok, Jordan-mérhető halmazok. Ezeknek a határa is sokféle lehet.

Integrálból és deriváltból is sokféle létezik: Riemann-integrál, vonalintegrálok, felületi integrálok...

## 1. A Green-tétel

A vonalintegrál általánosításai. Síkvektorok keresztszorzata, irányított szöge. Egyszerű zárt görbék, Jordan-görbetétel (bizonyítás nélkül). Egyszerű zárt görbe irányítása. Green-tétel (bizonyítás normáltartományra, és a bizonyítás vázlata az általános esetben). [LTS2, 200–204. o.]

Az integráltételeinkben nem csak az eddig megismert valós vonalintegrálokra lesz szükségünk; a skaláris szorzás helyett használni fogjuk vektor és skalár szorzatát, a 3-dimenziós vektoriális és a komplex szorzást is, ezért az eddigi valós vonalintegrálfogalmunkat kiterjesztjük mindenféle, vektor- és skalárértékű szorzásra. Másfelől, mindig folytonos függvényeket fogunk integrálni, és mindig szakaszonként  $C^1$  görbéken, ezért az általános definíciót leszűkíthetjük.

## Definíció (általános vonalintegrál szakaszonként $C^1$ görbén)

Legyen

- $G \subset \mathbb{R}^p$  összefüggő, nyílt,  $\gamma : [a, b] \rightarrow G$  szakaszonként  $C^1$  görbe;
- $f : G \rightarrow \mathbb{R}^q$  folytonos függvény;
- $* : \mathbb{R}^q \times \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}^r$  bilineáris függvény, valamilyen szorzás.

Ekkor az  $\int_{\gamma} f(\mathbf{x}) * d\mathbf{x}$  vonalintegrált a következőképpen definiáljuk:

$$\int_{\gamma} f(\mathbf{x}) * d\mathbf{x} = \int_{t=a}^b \left( f(\gamma(t)) * \dot{\gamma}(t) \right) dt.$$

Ha  $r > 1$ , akkor az integrandus és integrál értéke is  $r$ -dimenziós vektor; minden szinten a szorzat megfelelő koordinátáját kell integrálni:

$$\int_{\gamma} f(\mathbf{x}) * d\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \int_{t=a}^b \left( f(\gamma(t)) * \dot{\gamma}(t) \right)_1 dt \\ \vdots \\ \int_{t=a}^b \left( f(\gamma(t)) * \dot{\gamma}(t) \right)_r dt. \end{pmatrix}$$

## Példák

- Ha  $p = q = r = 1$ ,  $\gamma(t) = t$  és  $*$  a valós számok szorzása, akkor ez éppen az egyváltozós Riemann-integrál.
- Ha  $p = q$  és  $r = 1$ , és  $*$  a vektorok skaláris szorzása, akkor ez a valós vonalintegrál.
- Ha  $p = q = r = 2$ , és  $*$  a komplex szorzás, akkor a neve az  $f$  *komplex vonalintegrálja* a  $\gamma$  görbén.
- Ha  $q = r = 1$  és  $1 \leq i \leq p$ , akkor az  $f$  függvénynek az  $x_i$  változó szerinti vonalintegrálja a  $\gamma$  görbén  $\int_{\gamma} f(x) d\mathbf{x}_i = \int_a^b f(\gamma(t)) \dot{\gamma}_i(t) dt$ .

## Megjegyzés

Mindegyik vonalintegrált átírhatjuk az egyes változók szerinti vonalintegrálok egy lineáris kombinációjára.

- Valós vonalintegrál:

$$\int_{\gamma} \langle f(\mathbf{x}), d\mathbf{x} \rangle = \sum_{i=1}^p \int_{\gamma} f_i(\mathbf{x}) dx_i$$

- Komplex vonalintegrál:

$$\int_{\gamma} f(\mathbf{x}) \cdot d\mathbf{x} = \left( \int_{\gamma} f_1(\mathbf{x}) dx_1 - \int_{\gamma} f_2(\mathbf{x}) dx_2 \right) + i \left( \int_{\gamma} f_2(\mathbf{x}) dx_1 + \int_{\gamma} f_1(\mathbf{x}) dx_2 \right)$$

## Példa

Számítsuk ki az  $f(z) = \bar{z}$  függvény komplex vonalintegrálját az egységkörvonalon.

### Megoldás.

$$\gamma(t) = (\cos t, \sin t) \quad (0 \leq t \leq 2\pi); \quad x(t) = \gamma_1(t) = \cos t, \quad y(t) = \gamma_2(t) = \sin t$$

$$\dot{\gamma}(t) = (-\sin t, \cos t); \quad dx = \dot{\gamma}_1(t) dt = -\sin t dt, \quad dy = \dot{\gamma}_2(t) dt = \cos t dt$$

$$f(x, y) = (x, -y)$$

$$\int_{\gamma} f_1(\mathbf{x}) dx = \int_{\gamma} x dx = \int_{t=0}^{2\pi} \cos t \cdot (-\sin t) dt = 0;$$

$$\int_{\gamma} f_1(\mathbf{x}) dy = \int_{\gamma} x dy = \int_{t=0}^{2\pi} \cos t \cdot \cos t dt = \pi;$$

$$\int_{\gamma} f_2(\mathbf{x}) dx = \int_{\gamma} (-y) dx = \int_{t=0}^{2\pi} (-\sin t) \cdot (-\sin t) dt = \pi;$$

$$\int_{\gamma} f_2(\mathbf{x}) dy = \int_{\gamma} (-y) dy = \int_{t=0}^{2\pi} (-\sin t) \cdot \cos t dt = 0;$$

$$\int_{\gamma} f(x, y) * (dx, dy) = \int_{\gamma} (f_1, f_2) * (dx, dy) = \int_{\gamma} (f_1 dx - f_2 dy; f_1 dy + f_2 dx)$$

$$= \left( \int_{\gamma} f_1 dx - \int_{\gamma} f_2 dy; \int_{\gamma} f_1 dy + \int_{\gamma} f_2 dx \right) = (0 - 0; \pi + \pi) = (0, 2\pi).$$

Avagy,

$$\int_{\gamma} \bar{z} dz = 2\pi i.$$

# "Keresztszorzat"

A síkbeli integráltételekhez használni fogjuk a vektoriális szorzat kétdimenziós változatát:

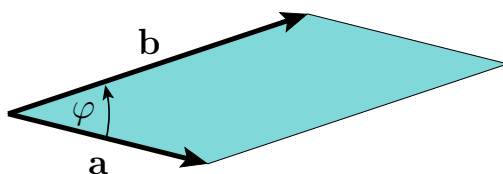
## Definíció

Az  $\mathbf{a}, \mathbf{b} \in \mathbb{R}^2$  síkvektorok *keresztiszorzata*

$$\mathbf{a} \times \mathbf{b} = a_1 b_2 - a_2 b_1 = \det \begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{pmatrix},$$

*irányított szöge* az a  $\varphi \in \mathbb{R}/2\pi\mathbb{Z}$  szög, amelyre

$$|\mathbf{a}| \cdot |\mathbf{b}| \cdot \cos \varphi = \langle \mathbf{a}, \mathbf{b} \rangle, \quad |\mathbf{a}| \cdot |\mathbf{b}| \cdot \sin \varphi = \mathbf{a} \times \mathbf{b}$$



## Megjegyzés

Síkvektoroknak most már legalább háromféle szorzatát ismerjük: a skaláris szorzás és a keresztiszorzat bilineáris  $\mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$  függvények, a komplex szorzás pedig tekinthető bilineáris  $\mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$  függvénynek.

# Görbeindex, Jordan-féle görbetétel

## Definíció

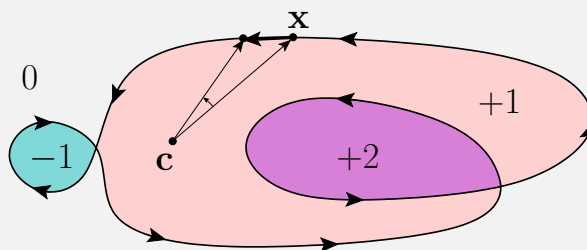
Ha  $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^2$  zárt görbe, és a  $\mathbf{c} \in \mathbb{R}^2$  pont nincs rajta a görbén, akkor  $n(\gamma, \mathbf{c}) \in \mathbb{Z}$  jelenti azt, hogy a  $\gamma$  előjelesen hányszor "kerüli meg" a  $c$  pontot. Neve: a görbe ***c*-re vonatkozó indexe**, vagy ***c* körüli körülfordulási száma**. A görbeindexet sokféle paraméteres vonalintegrállal is felírhatjuk, például

$$n(\gamma, c) = \frac{1}{2\pi} \int_{(x,y) \in \gamma} \left\langle \underbrace{\left( \frac{-(y-c_2)}{(x-c_1)^2 + (y-c_2)^2}, \frac{x-c_1}{(x-c_1)^2 + (y-c_2)^2} \right)}_{\text{grad szög}(\mathbf{x}-\mathbf{c})}; (dx, dy) \right\rangle$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_{\mathbf{x} \in \gamma} \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{c})}{|\mathbf{x} - \mathbf{c}|^2} \times d\mathbf{x}$$

vagy komplex vonalintegrállal

$$n(\gamma, \mathbf{c}) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\mathbf{z} \in \gamma} \frac{dz}{z - \mathbf{c}}.$$



A görbeindex mindig egész szám.

## Definíció (Jordan-görbe (Marie Ennemond Camille Jordan, 1838–1922))

A  $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^2$  görbe *Jordan-görbe*, ha *egyszerű*, *zárt*, vagyis folytonos,  $\gamma(a) = \gamma(b)$ , és a két végpont kivételével injektív (pl. az  $[a, b]$  intervallumra megszorítva injektív.)

### Tétel (Jordan-féle görbetétel)

Ha  $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^2$  egyszerű, zárt görbe, akkor az  $\mathbb{R}^2 \setminus \gamma([a, b])$  nyílt halmaz két összefüggő komponensből áll, az egyik komponens korlátos (a görbe *belseje*), a másik komponens nem korlátos (a görbe *külseje*), és mindkét komponens határa a  $\gamma$ .

A görbe külső pontokra vonatkozó indexe 0, a belső pontokra vonatkozó index vagy mindenhol +1, vagy mindenhol -1. Az első esetben a görbét *pozitív irányításúnak*, a második esetben *negatív irányításúnak* nevezzük.

(Erdős Pálnak az a mondása, hogy valaki a *Jordan-tételt tanulmányozza*, azt jelentette: az illető börtönben van.)

### Definíció

$K \subset \mathbb{R}^2$  *Jordan-tartomány*, ha egy egyszerű, zárt, folytonos görbe belseje. A továbbiakban a határgörbét, mindig pozitív irányítással,  $\partial K$  fogja jelölni.

## Green tétele

### Tétel (Green (George Green, 1793–1841))

Legyen  $K$  Jordan-tartomány, amelynek a határa szakaszonként  $C^1$ , legyen  $G \supset \text{cl } K$  nyílt, és  $f : G \rightarrow \mathbb{R}$  folytonosan differenciálható.

(a) Ha  $\frac{\partial f}{\partial x}$  létezik és folytonos  $\text{cl } K$ -n, akkor

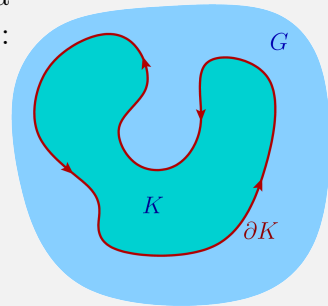
$$\int_{\partial K} f dy = \int_K \frac{\partial f}{\partial x} dx dy.$$

(b) Ha  $\frac{\partial f}{\partial y}$  létezik és folytonos  $\text{cl } K$ -n, akkor

$$\int_{\partial K} f dx = - \int_K \frac{\partial f}{\partial y} dx dy.$$

(a+b) együtt: Ha  $f$  és  $g$  folytonosan differenciálható  $\text{cl } K$ -n, akkor

$$\int_{\partial K} (f dx + g dy) = \int_K \left( - \frac{\partial f}{\partial y} + \frac{\partial g}{\partial x} \right) dx dy.$$



**Bizonyítás.** (b1). Ha  $K$  normáltartomány: a bizonyítás lényege, hogy  $K$  minden

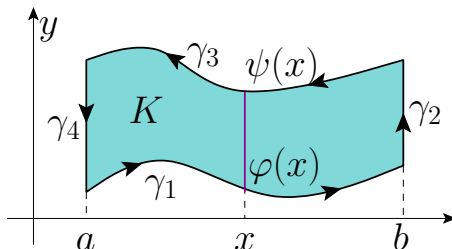


függőleges szekcióján alkalmazzuk az egyváltozós Newton-Leibniz formulát.

Tegyük fel, hogy

$$K = \{(x, y) : x \in [a, b], \varphi(x) \leq y \leq \psi(x)\},$$

valamilyen  $[a, b]$  intervallummal és szakaszonként differenciálható  $\varphi, \psi : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $\varphi \leq \psi$  függvényekkel. A két függvénygrafikon tehát  $(x, \varphi(x))$  és  $(x, \psi(x))$ .

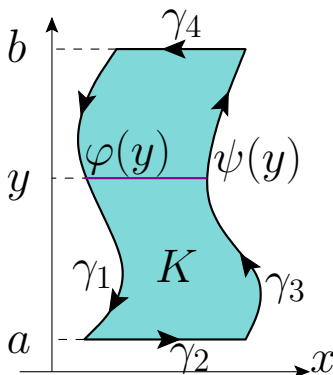


A  $\partial K$  határ négy részre vágható: a felső és az alsó határoló grafikon  $\gamma_1$  és  $\gamma_3$ , és két függőleges szakasz  $\gamma_2$  és  $\gamma_4$ . A felső függvénygrafikonon jobbról balra kell végigmennünk.

A függőleges szakaszokon az  $x$  szerinti vonalintegrál 0.

$$\begin{aligned} \int_K \frac{\partial f}{\partial y} dx dy &= \int_{x=a}^b \left( \int_{y=\varphi(x)}^{\psi(x)} \frac{\partial f}{\partial y} dy \right) dx = \int_{x=a}^b \left( f(x, \psi(x)) - f(x, \varphi(x)) \right) dx = \\ &= - \int_{\gamma_1} f dx - \int_{\gamma_3} f dx = - \int_{\partial K} f dx. \end{aligned}$$

(a1) Ha  $K$  egy tükrözött normáltartomány, akkor hasonlóan bizonyítunk, az  $x$  és  $y$  felcserélésével. Ez a tükrözés megfordítja a határ irányítását, ezért azt vissza kell fordítanunk; itt jön be még egy negatív előjel.



$$\int_K \frac{\partial f}{\partial x} dx dy = \int_{y=a}^b \left( \int_{x=\varphi(y)}^{\psi(y)} \frac{\partial f}{\partial x} dx \right) dy = \int_{y=a}^b \left( f(y, \psi(y)) - f(y, \varphi(y)) \right) dy$$

$$= \int_{\gamma_3} f(x, y) dy + \int_{\gamma_1} f(x, y) dy = \int_{\partial K} f(x, y) dy.$$

Általában:

- A fentiek bizonyítanak például konvex sokszögekre.
- Átlókkal vagy akár párhuzamos szakaszokkal szétvágva-összeragasztva megkapjuk az állítást tetszőleges zárt töröttvonalra.
- Az általános esetben a határgörbét belülről közelítjük töröttvonalakkal, majd határátmenet.

### Következmény (Jordan-tartomány területe)

Ha  $K$  Jordan-tartomány, a határa szakaszonként  $C^1$ , akkor

$$t(K) = \int_{\partial K} x dy = - \int_{\partial K} y dx = \frac{1}{2} \int_{\partial K} \mathbf{x} \times d\mathbf{x}.$$

**Bizonyítás.** Green-tétel az  $f(x, y) = x$ , illetve  $f(x, y) = -y$  függvényekre vagy a kettő összegére:

$$\begin{aligned} \int_{\partial K} x dy &= \int_K \frac{\partial x}{\partial x} dx dy = \int_K 1 dx dy = t(K). \\ - \int_{\partial K} y dx &= \int_K \frac{\partial y}{\partial y} dx dy = \int_K 1 dx dy = t(K). \end{aligned}$$

### Példa

Próbáljuk ki a fenti területképletet az origó középpontú,  $r$  sugarú körre.

A határgörbe:

$$\gamma(t) = (r \cos t, r \sin t) \quad (0 \leq t \leq 2\pi), \quad d\mathbf{x} = \dot{\gamma}(t)dt = (-r \sin t, r \cos t)dt.$$

$$\begin{aligned} t(B(0, r)) &= \frac{1}{2} \int_{\partial K} \mathbf{x} \times d\mathbf{x} = \frac{1}{2} \int_{t=0}^{2\pi} (r \cos t, r \sin t) \times (-r \sin t, r \cos t) dt \\ &= \frac{1}{2} \int_{t=0}^{2\pi} r^2 dt = r^2 \pi. \end{aligned}$$

### Következmény

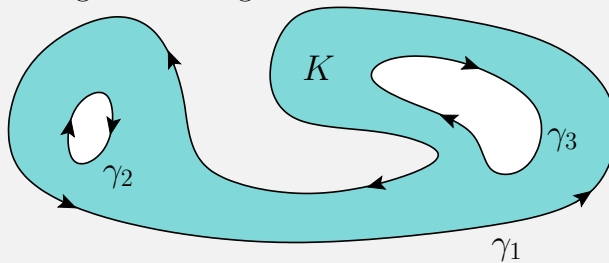
Szakaszonként  $C^1$  Jordan-görbén, aminek a belsejében rotációmentes egy vektormező, a vonalintegrál 0.

**Bizonyítás.** Ezt már megcsináltuk sokkal általánosabban a Goursat-lemmával, de a Green-tétel is működik:

$$\begin{aligned} \int_{\partial K} \langle f, d\mathbf{x} \rangle &= \int_{\partial K} f_1 dx + \int_{\partial K} f_2 dy = \\ &= - \int_K \frac{\partial f_1}{\partial y} dx dy + \int_K \frac{\partial f_2}{\partial x} dx dy = \\ &= \int_K \left( \frac{\partial f_2}{\partial x} - \frac{\partial f_1}{\partial y} \right) dx dy = 0. \end{aligned}$$

### Megjegyzés

A fentiek elmondhatók olyan tartományokra is, amelyeket egynél több zárt görbe határol, ha a görbét megfelelően irányítjuk. Legyen  $K \subset G$  olyan halmaz, amelynek határa véges sok, diszjunkt, egyszerű zárt, szakaszonként  $C^1$  görbéből áll (a továbbiakban: krumpli), akkor  $K$  határgörbét lehetséges úgy irányítani, hogy az  $K$  külső pontjaikra vonatkozó indexe 0, a belső pontokra az indexösszeg +1 legyen. A továbbiakban  $\partial K$  (a krumpli héja) ezeknek az irányított határgörbéknek a halmazát fogja jelenteni, és az  $\int_{\partial K}$  a görbéken vett integrálok összegét.



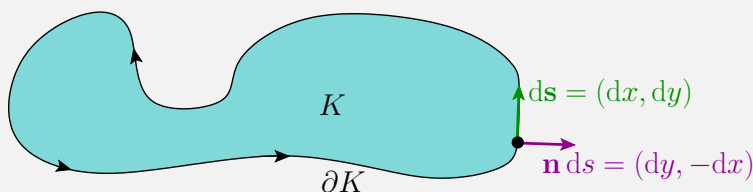
Az összeragasztós-approximálás módszer ezekre is működik, így a Green-tétel és fenti következményei az ilyenekre is kiterjeszthetők.

## 2. Integráltételek síkban

2. előadás, 2023.03.02.

Külső normális egyszerű zárt görbe mentén. Newton-Leibniz formula síkban. Mese a kertünkben felőró talajvíz forrásereőségéről és -sűrűségéről. Divergencia (magasabb dimenzióban is). Gauss-Osztrogradszkij tétel 2-dimenzióban. Mese vektormező örvényereőségéről és -sűrűségéről. Rotáció 2-dimenzióban. Stokes-tétel 2-dimenzióban.

### Definíció



A  $\gamma(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix}$  szakaszonként  $C^1$  görbe *sebességvektora* a  $t$  időpontban  $\dot{\gamma}(t) = \begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \end{pmatrix}$ . Ha ez nem a nullvektor, akkor az *érintővektor*  $\mathbf{t} = \frac{\dot{\gamma}(t)}{|\dot{\gamma}(t)|} = \frac{(\dot{x}, \dot{y})}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}$ . Ennek  $(-90^\circ)$ -kal elforgatottja a *külső normális*:  $\mathbf{n} = \frac{(\dot{y}, -\dot{x})}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}$ . Az ívhossz szerinti integráloknál használni fogjuk a  $ds = |d\mathbf{x}|$  és a terület szerinti integráloknál az  $dA = dx dy$  jelöléseket. A szokásos helyettesítésekkel a görbén

$$\mathbf{t} ds = \begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix}, \quad \mathbf{n} ds = \begin{pmatrix} dy \\ -dx \end{pmatrix}.$$

**Tétel (Newton–Leibniz formula (Isaac Newton, 1642–1727; Gottfried Wilhelm Leibniz, 1646–1716))**

Ha  $\text{cl}(K) \subset G \subset \mathbb{R}^2$  Jordan-tartomány, aminek a határa pozitív irányítású, szakaszonként folytonosan differenciálható görbe, és  $f : G \rightarrow \mathbb{R}$  folytonosan differenciálható, akkor

$$\int_K (\text{grad } f) dA = \int_{\partial K} f \mathbf{n} ds.$$

## Bizonyítás.

$$\int_{\partial K} f \mathbf{n} ds = \int_{\partial K} f \cdot \begin{pmatrix} dy \\ -dx \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \int_{\partial K} f dy \\ -\int_{\partial K} f dx \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \int_K D_x f dA \\ \int_K D_y f dA \end{pmatrix} = \int_K (\text{grad } f) dA.$$

### Megjegyzés

Elmondhatjuk ugyanezt egydimenzióban, egy  $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  folytonosan differenciálható függvényre. A határ két, egységnyi súlyú pontból áll: a felső végpontban a "kifelé mutató normálvektor" a  $+1$ , az alsó végpontban  $-1$ . Ezért  $\int_{[a,b]} f'(x) dx = f(a) \cdot (-1) + f(b) \cdot (+1)$ .

### Példa

A Newton–Leibniz formula segítségével írjunk fel olyan  $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$  függvényt, amelyre igaz, hogy bármely, szakaszonként differenciálható határú  $K$  krumpli súlypontja

$$S = \frac{\int_{\partial K} f(\mathbf{x}) \mathbf{n} ds}{t(K)}.$$

**Megoldás.** A súlypont a pontok terület szerinti átlaga:

$$S = \frac{\int_K \mathbf{x} dA}{t(K)}.$$

Az kellene, hogy

$$\forall K \quad \int_{\partial K} f(\mathbf{x}) \mathbf{n} ds = \int_K \mathbf{x} dA.$$

A Newton–Leibniz formula szerint

$$\int_{\partial K} f(\mathbf{x}) \mathbf{n} ds = \int_K (\text{grad } f(\mathbf{x})) dA,$$

tehát minden szép és jó, ha

$$(D_1 f(x, y), D_2 f(x, y)) = \text{grad } f(\mathbf{x}) = \mathbf{x} = (x, y).$$

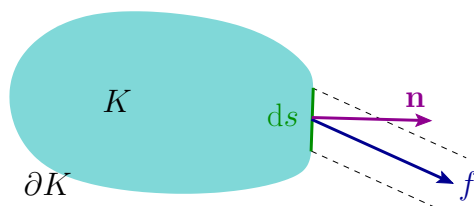
Például

$$f(x, y) = \frac{1}{2}(x^2 + y^2) = \frac{1}{2}|\mathbf{x}|^2 \quad \text{egy jó függvény.}$$

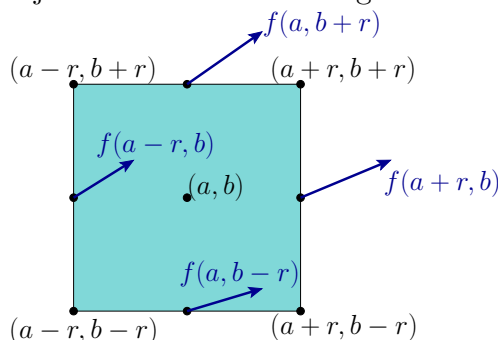
## A talajvíz forráserőssége és forrássűrűsége

Kertünk,  $K$  egy talajvízzel elárasztott  $G$  területen fekszik, a vízszint állandó. A terület bármely pontján a talajvíz feltörhet vagy elszivároghat, de a feltörő víz a  $\partial K$  kerítésen keresztül kiáramlik, illetve az elszivárgó vízmennyiség a kerítésen keresztül áramlik be. A víz tehát folyamatos mozgásban van, a sebességét az  $f : G \rightarrow \mathbb{R}^2$  vektormező adja meg.

A kertből a kerítésen át másodpercenként kifolyó vízmennyiség a kertünk *forráserőssége*. Egy  $ds$  hosszú kerítésdarabon, amelynek kifelé mutató normálvektora  $\mathbf{n}$ , másodpercenként  $\langle f, \mathbf{n} ds \rangle$  víz folyik ki; a forráserősség ennek integrálja, vagyis  $\int_{\partial K} \langle f, \mathbf{n} ds \rangle$ .



Most osszuk fel kertünket kis,  $2r$  oldalú négyzetekre, és vizsgáljunk meg, hogy egy  $(a, b)$  pont körüli  $[a - r, a + r] \times [b - r, b + r]$  négyzetben mennyi víz tör fel, illetve mennyi folyik a négyzetből ki. Az  $f$  persze egy-egy oldalon sem állandó, mi az oldalak középpontjában vett értékekkel fogunk számolni.



A függőleges oldalakon kifolyó vízmennyiség csak  $f$  vízszintes komponensétől függ, a vízszintes oldalakon pedig az  $f$  függőleges komponensétől.

- A jobboldalon kifolyó vízmennyiség:  $f_1(a + r, b) \cdot 2r$
- Baloldalon:  $-f_1(a - r, b) \cdot 2r$  (a negatív irány mutat kifelé)
- Fent:  $f_2(a, b + r) \cdot 2r$
- Lent:  $-f_2(a, b - r) \cdot 2r$  (a negatív irány mutat kifelé)

Összeadva, a négyzet forrás-erőssége

$$\begin{aligned} &\approx f_1(a+r, b) \cdot 2r - f_1(a-r, b) \cdot 2r + f_2(a, b+r) \cdot 2r - f_2(a, b-r) \cdot 2r \\ &= \left( \frac{f_1(a+r, b) - f_1(a-r, b)}{2r} + \frac{f_2(a, b+r) - f_2(a, b-r)}{2r} \right) \cdot (2r)^2 \\ &\approx (D_1 f_1(a, b) + D_2 f_2(a, b)) \cdot \text{terület}. \end{aligned}$$

Mondhatjuk, hogy az  $(a, b)$  pont körül négyzetméterenként és másodpercenként  $D_1 f_1(a, b) + D_2 f_2(a, b)$  egységnyi talajvíz tör fel. A *forrássűrűség az  $(a, b)$  pontban:  $D_1 f_1(a, b) + D_2 f_2(a, b)$ .*

A kertben másodpercenként feltörő összes vízmennyiség, vagyis a kert forrás-erőssége a forrássűrűség terület szerinti integrálja, vagyis  $\int_K (D_1 f_1 + D_2 f_2) dA$ .

Ezzel kétféle heurisztikus képletet is kitaláltunk a kertből kifolyó vízmennyiségre, és azt várjuk, hogy a kettő valóban egyenlő, és persze nem függ az önkényesen megválasztott koordináta irányainktól sem:

$$\int_K (D_1 f_1 + D_2 f_2) dA \stackrel{?}{=} \int_{\partial K} \langle f, \mathbf{n} \, ds \rangle.$$

### Definíció (vektormező divergenciája)

Legyen  $G \subset \mathbb{R}^p$  nyílt és  $\mathbf{f} : G \rightarrow \mathbb{R}^p$  differenciálható. Az  $\mathbf{f}$  vektormező *divergenciája* vagy *forrássűrűsége*

$$\operatorname{div} \mathbf{f} = D_1 f_1 + D_2 f_2 + \dots + D_p f_p = \operatorname{tr} J_{\mathbf{f}}.$$

A  $\nabla = \begin{pmatrix} D_1 \\ \vdots \\ D_p \end{pmatrix}$  jelöléssel, alternatív felírások:

$$\operatorname{div} \mathbf{f} = \langle \nabla, \mathbf{f} \rangle = \operatorname{tr} f' = \nabla^t \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_p \end{pmatrix}$$

### Tétel

A divergencia nem függ a koordinátarendszer irányától.

**Bizonyítás.** Általában, mi történik, ha a szokásos koordináta-rendszerről a  $(\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_p)$  koordináta-egységvektorokra térünk át? Az új koordináta vektorokból

egy  $T = (\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_p)$  mátrixot készíthetünk, ami ortogonális (azaz  $T^t T = T T^t = I$  avagy  $T^{-1} = T^t$ ), és pozitív irányítású (azaz  $\det T = 1$ ). Ha egy vektor koordinátái a régi rendszerben  $\mathbf{x}$ , az új rendszerben  $\mathbf{y}$ , akkor  $\mathbf{y} = T^t \mathbf{x}$ .

A  $T$  transzformáció megtartja a skaláris szorzatot: tetszőleges  $\mathbf{x}, \mathbf{y}$  vektorokra

$$\langle T^t \mathbf{x}, T^t \mathbf{y} \rangle = (T^t \mathbf{x})^t (T^t \mathbf{y}) = \mathbf{x}^t (T T^t) \mathbf{y} = \mathbf{x}^t \mathbf{y} = \langle \mathbf{x}, \mathbf{y} \rangle.$$

Az  $\mathbf{u}_i$  irányú iránymenti derivált  $D_{\mathbf{u}_i} = \mathbf{u}_i^t \nabla$ ; az új rendszerben a deriváló operátor

$$\nabla_{\text{új}} = \begin{pmatrix} D_{\mathbf{u}_1} \\ \vdots \\ D_{\mathbf{u}_p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{u}_1^t \\ \vdots \\ \mathbf{u}_p^t \end{pmatrix} \nabla = T^t \nabla.$$

Avagy, skalármező gradiensvektora az új koordináta-rendszerben

$$\text{grad}_{\text{új}} f = T^t \text{grad}_{\text{rég}} f.$$

A vektormezőket is az új koordináta-rendszerben írjuk fel, tehát  $\nabla_{\text{új}}$ -t nem az

$\mathbf{f} = \begin{pmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_p \end{pmatrix}$  függvényre, hanem az  $\mathbf{f}_{\text{új}} = T^t \mathbf{f}$  függvényre kell alkalmaznunk.

Tehát

$$\text{div}_{\text{új}} \mathbf{f}_{\text{új}} = \nabla_{\text{új}}^t \mathbf{f}_{\text{új}} = (\nabla^t T)(T^t \mathbf{f}) = \nabla^t (T T^t) \mathbf{f} = \nabla^t \mathbf{f} = \text{div } \mathbf{f}.$$

**Tétel (2-dimenziós Gauss-Osztrogradskij tétel, divergenciatétel (Carl Friedrich Gauß, 1777–1855; Михаил Васильевич Остроградский, 1801–1862))**

Ha  $\text{cl}(K) \subset G \subset \mathbb{R}^2$  Jordan-tartomány, aminek a határa pozitív irányítású, szakaszonként folytonosan differenciálható görbe, és  $\mathbf{f} : G \rightarrow \mathbb{R}^2$  folytonosan differenciálható vektormező, akkor

$$\int_K (\text{div } \mathbf{f}) \, dA = \int_{\partial K} \langle \mathbf{f}, \mathbf{nds} \rangle.$$

**Bizonyítás.**

$$\begin{aligned} \int_{\partial K} \langle \mathbf{f}, \mathbf{nds} \rangle &= \int_{\partial K} (f_1 dy + f_2(-dx)) = \int_{\partial K} f_1 dy - \int_{\partial K} f_2 dx = \\ &= \int_K (D_1 f_1) dA + \int_K (D_2 f_2) dA = \int_K (\text{div } \mathbf{f}) \, dA. \end{aligned}$$



## Megjegyzés

A Gauss-Osztrogradszkij tétel lehetőséget ad a divergencia egy koordináta-független definíciójára, egy pontra összehúzódó krumplikkal:

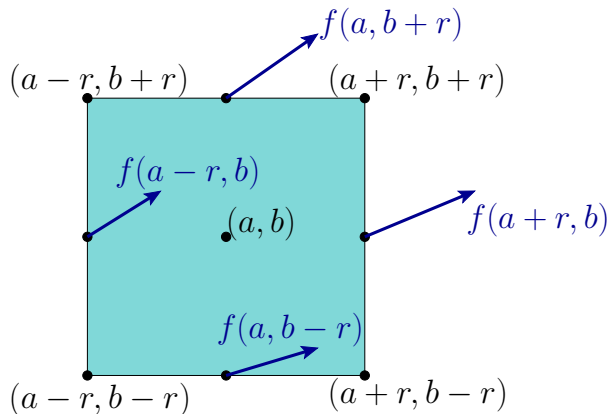
$$\operatorname{div} f(\mathbf{a}) = \lim_{r \rightarrow +0} \left( \frac{1}{2\pi r} \int_{|\mathbf{x}-\mathbf{a}|=r} \langle f(\mathbf{x}), \mathbf{n}ds \rangle \right).$$

## Vektormező örvényerőssége és örvénysűrűsége

Kertünkben most az örvénylést fogjuk mérni. Csónakunkra a kert minden pontjában valamekkora  $f$  erő hat a víz sodrása miatt. A kert határán az *örvényerősség* azt jelenti, hogy pozitív irányban körbe haladva a sodrás mekkora munkát végez. Ezt persze a szokásos valós vonalintegrál adja meg:  $W = \int_{\partial K} \langle f, d\mathbf{x} \rangle = \int_{\partial K} (f_1 dx + f_2 dy)$ .

Ismét osszuk fel kertünket kis,  $2r$  oldalú négyzetekre, és vizsgáljunk meg az örvényerősséget az  $(a, b)$  pont körüli  $[a-r, a+r] \times [b-r, b+r]$  négyzet határán. Ismét csak az oldalközéppontokban vett erőkkel számolva, a végzett munka a jobb-, a bal-, a felső és az alsó oldalon rendre  $f_2(a+r, b) \cdot 2r$ ,  $f_2(a-r, b) \cdot (-2r)$ ,  $f_1(a, b+r) \cdot (-2r)$ , illetve  $f_1(a, b-r) \cdot 2r$ , összesen

$$(f_2(a+r, b) - f_2(a-r, b) - f_1(a, b+r) + f_1(a, b-r)) \cdot 2r \approx (D_1 f_2 - D_2 f_1) \cdot (2r)^2.$$



Ha ezt az összes kis négyzetre összeadjuk, akkor a belső határokon vett munkák kiesnek, és csak a kert határa mentén végzett munka marad meg. Tehát azt várjuk, hogy  $W = \int_K (D_1 f_2 - D_2 f_1) dA$ . Az integrandust, a  $D_1 f_2 - D_2 f_1$  függvényt nevezhetjük az  $f$  vektormező *örvényerősségének*.

## Definíció (vektormező rotációja 2-dimenzióban)

Két dimenzióban az  $f$  vektormező *rotációja* vagy *örvénysűrűsége*

$$\operatorname{rot} \mathbf{f} = D_1 f_2 - D_2 f_1 = \nabla \times \mathbf{f} = \det(\nabla, \mathbf{f})$$

Angol nyelvű tankönyvekben, cikkekben a rotációt *curl*nek nevezik, és  $\operatorname{curl} \mathbf{f}$ -fel jelölik.

### Tétel

A rotáció nem függ a koordináta-rendszer irányától.

**Bizonyítás.** Blokkmátrixokkal

$$\operatorname{rot}_{\tilde{u}_j} \tilde{\mathbf{f}}_{\tilde{u}_j} = \det(\nabla_{\tilde{u}_j}, \tilde{\mathbf{f}}_{\tilde{u}_j}) = \det(T^t \nabla, T^t \mathbf{f}) = \det(T^t \cdot (\nabla, \mathbf{f})) = \det T^t \cdot \det(\nabla, \mathbf{f}) = 1 \cdot \operatorname{rot} \mathbf{f}.$$

## Tétel (2-dimenziós Stokes-tétel (George Gabriel Stokes, 1819–1903))

Ha  $\operatorname{cl}(K) \subset G \subset \mathbb{R}^2$  Jordan-tartomány, aminek a határa pozitív irányítású, szakaszonként folytonosan differenciálható görbe, és  $\mathbf{f} : G \rightarrow \mathbb{R}^2$  folytonosan differenciálható vektormező, akkor

$$\int_K (\operatorname{rot} \mathbf{f}) \, dA = \int_{\partial K} \langle \mathbf{f}, d\mathbf{x} \rangle = - \int_{\partial K} \mathbf{f} \times (\mathbf{n} ds).$$

**Bizonyítás.** A második két integrál ugyanaz, mert

$$-\mathbf{f} \times (\mathbf{n} ds) = -(f_1, f_2) \times (dy, -dx) = f_1 dx + f_2 dy = \langle \mathbf{f}, d\mathbf{x} \rangle.$$

Ezután a Green-tételt kétszer alkalmazva,

$$\int_{\partial K} \langle \mathbf{f}, d\mathbf{x} \rangle = \int_{\partial K} (f_1 dx + f_2 dy) = \int_K \left( -D_2 f_1 + D_1 f_2 \right) dA = \int_K (\operatorname{rot} \mathbf{f}) \, dA.$$

### Megjegyzés

A Stokes-tétel lehetőséget ad a rotáció koordinátafüggetlen definíciójára, egy pontra összehúzódó krumplikkal:

$$\operatorname{rot} \mathbf{f}(\mathbf{a}) = - \lim_{r \rightarrow +0} \frac{1}{2\pi} \int_{|\mathbf{x}-\mathbf{a}|=r} \mathbf{f} \times \mathbf{n} ds.$$

### 3. Integráltételek három dimenzióban

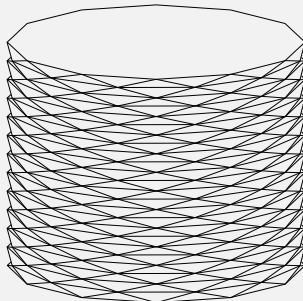
Folytonosan differenciálható paraméteres felületek. Felszín, normálvektor. Felszín szerinti és felületi integrálok. Függvénygrafikon mint paraméteres felület normálvektora. A Green-tétel térbeli megfelelője. 3-dimenziós Newton-Leibniz formula. Zárt felületeken a területvektor integrálja 0. Gauss-Osztrogradszkij tétel. Rotáció. Stokes-tétel. Kelvin-Stokes tétel (bizonyítás nélkül). Kapcsolat a Maxwell-egyenletek differenciális és integrális alakjai között. [LTS2, 211–221. o.]

#### Definíció

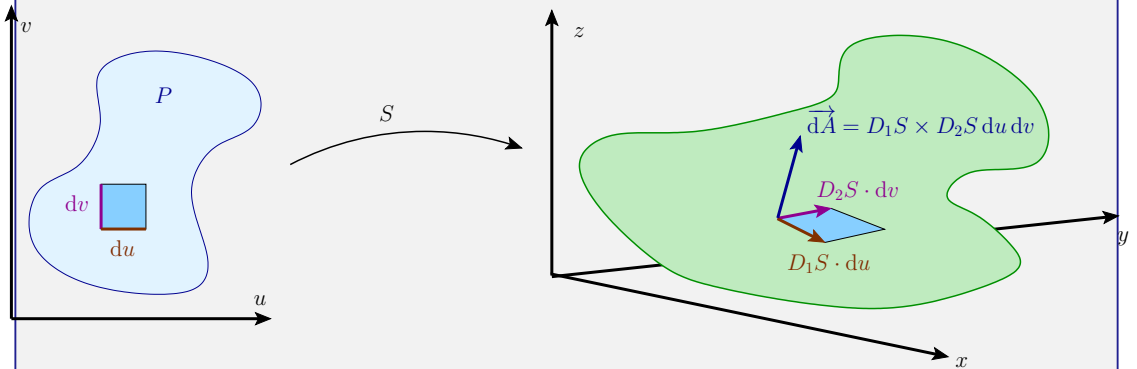
Ha  $P \in \mathcal{J}(\mathbb{R}^2)$ , akkor a  $P \rightarrow \mathbb{R}^3$  függvényeket fogjuk *paraméteres felületnek* hívni. Beszélhetünk folytonos, differenciálható, folytonosan differenciálható, darabonként folytonosan differenciálható felületekről is.

#### Megjegyzés

A felszín nem lehet — a görbék ívhosszának mintájára — a beírt poligonok felszínének szuprémumaként definiálni (ld. hengerbe beírt lampion).



## Definíció



Ha  $S : P \rightarrow \mathbb{R}^3$  darabonként folytonosan differenciálható felület, akkor

$$\vec{dA} = (D_1S \times D_2S) dudv, \quad |dA| = |\vec{dA}|, \quad \mathbf{n} = \frac{\vec{dA}}{|dA|} = \frac{D_1S \times D_2S}{|D_1S \times D_2S|}$$

(*felületelem, felszínelem, illetve irányított normálvektor*).

Az  $S$  felület *felszíne*

$$A = \int_{u,v \in P} |D_1S \times D_2S| dudv; \quad \text{ennek egyfajta rövidítése, jele: } \int_S |dA|.$$

## Definíció

Legyen  $P \in \mathcal{J}(\mathbb{R})$  kompakt, és legyen  $S : P \rightarrow \mathbb{R}^3$  darabonként folytonosan differenciálható felület.

Ha  $f$  valamilyen skalár- vagy vektormező, akkor  $f$  *felszín szerinti integrálja* az  $S$  felületen

$$\int_{(u,v) \in P} f(S(u,v)) |D_1S \times D_2S| \, dudv; \quad \text{jele: } \int_S f |dA|.$$

Ha  $*$  valamilyen szorzás (bilineáris függvény), akkor

$$\int_{(u,v) \in P} f(S(u,v)) * (D_1S \times D_2S) \, dudv; \quad \text{jele: } \int_S f * \vec{dA}.$$

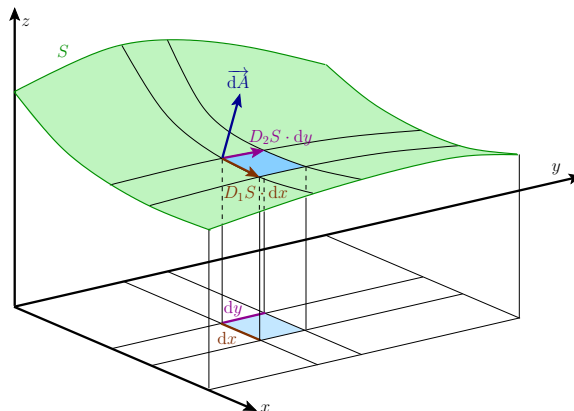
Speciálisan, ha  $*$  a skaláris szorzás, akkor  $f$  *felületi integrálja* vagy *fluxusa* az  $S$  felületen

$$\int_{(u,v) \in P} \langle f(S(u,v)), D_1S \times D_2S \rangle \, dudv; \quad \text{jele: } \int_S \langle f, \vec{dA} \rangle.$$

## Lemma

Ha  $S(u,v) = (u, v, \varphi(u,v))$  egy kétváltozós függvény grafikonja, akkor

$$\vec{dA} = \begin{pmatrix} -D_u\varphi \\ -D_v\varphi \\ 1 \end{pmatrix} \, dudv.$$



**Bizonyítás.**  $D_1S = (1, 0, D_u\varphi(u,v))$  és  $D_2S = (0, 1, D_v\varphi(u,v))$ , a "felfelé"

mutató területvektor tehát

$$\vec{dA} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ D_u\varphi \end{pmatrix} du \times \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ D_v\varphi \end{pmatrix} dv = \begin{pmatrix} -D_u\varphi \\ -D_v\varphi \\ 1 \end{pmatrix} dudv.$$

### Következmény

A grafikon felszíne

$$A = \int_{(u,v) \in P} \sqrt{(D_u\varphi)^2 + (D_v\varphi)^2 + 1} dudv.$$

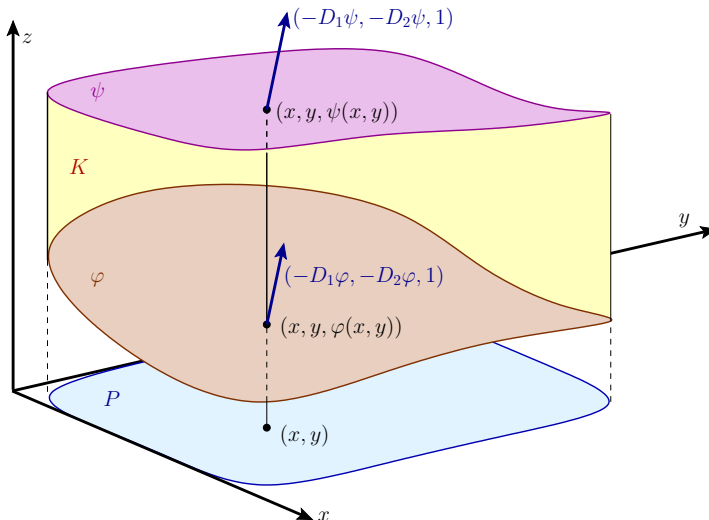
(Kb. ezt is várjuk.)

### Lemma (a Green-tétel három-dimenziós változata)

Ha  $G \subset \mathbb{R}^3$  nyílt,  $K \subset G$  korlátos, zárt krumpli, aminek a  $\partial K$  határa darabonként folytonosan differenciálható felület, és ezeken az irányított normálvektor mindig kifelé mutat, továbbá  $f : G \rightarrow \mathbb{R}$  folytonosan differenciálható, végül  $i \in \{1, 2, 3\}$ , akkor

$$\int_K (D_i f) dV = \int_{\partial K} f \cdot \vec{dA}_i.$$

( $dV = dx dy dz$  a térfogatelem;  $\vec{dA}_i$  a  $\vec{dA}$  területvektor  $i$ -edik koordinátája.)



**Bizonyítás (csak szép normáltartományokra).** A  $z$ -koordinátára bizonyítunk, vagyis  $i = 3$ , és feltesszük, hogy  $K$  normáltartomány a  $P$  szép paramé-

tertartomány fölött. A alsó és a felső grafikon legyen most is  $\varphi(x, y)$  és  $\psi(x, y)$ , tehát  $K = \{(x, y, z) : (x, y) \in P, \varphi(x, y) \leq z \leq \psi(x, y)\}$ . A határ függőleges darbjain  $\vec{dA}_3 = 0$ , tehát a  $z$  szerinti integrál 0. Az alsó grafikonon a lefelé mutató normálvektort kell használnunk.

$$\begin{aligned} \int_{\partial K} f \vec{dA}_3 &= \int_{(x,y) \in P} f(x, y, \psi(x, y)) \begin{pmatrix} -D_1\psi(x, y) \\ -D_2\psi(x, y) \\ 1 \end{pmatrix}_3 dx dy \\ &+ \int_{(x,y) \in P} f(x, y, \varphi(x, y)) \begin{pmatrix} D_1\varphi(x, y) \\ D_2\varphi(x, y) \\ -1 \end{pmatrix}_3 dx dy = \\ &= \int_{(x,y) \in P} (f(x, y, \psi(x, y)) - f(x, y, \varphi(x, y))) dx dy \\ &= \int_{(x,y) \in P} \left( \int_{\varphi(x,y)}^{\psi(x,y)} D_3 f(x, y, z) dz \right) dx dy = \int_K D_3 f dV. \end{aligned}$$

### Tétel (Newton–Leibniz formula)

Ha  $G \subset \mathbb{R}^3$  nyílt,  $K \subset G$  korlátos, zárt krumpli, aminek a  $\partial K$  határa darabként folytonosan differenciálható felület, és ezeken az irányított normálvektor mindig kifelé mutat, továbbá  $f : G \rightarrow \mathbb{R}$  folytonosan differenciálható, akkor

$$\int_K (\text{grad } f) dV = \int_{\partial K} f \cdot \vec{dA}.$$

**Bizonyítás.** A Lemmát mindhárom koordinátára alkalmazva,

$$\int_K (\text{grad } f) dV = \int_K \begin{pmatrix} D_1 f dV \\ D_2 f dV \\ D_3 f dV \end{pmatrix} = \int_{\partial K} \begin{pmatrix} f \vec{dA}_1 \\ f \vec{dA}_2 \\ f \vec{dA}_3 \end{pmatrix} = \int_{\partial K} f \vec{dA}.$$

**Következmény.**

$$\int_{\partial K} \vec{dA} = \mathbf{0}.$$

**Bizonyítás.** Newton–Leibniz formula a konstans 1 függvényre.

### Tétel (3-dimenziós Gauss-Osztrogradskij tétel, divergenciatétel)

Ha  $G \subset \mathbb{R}^3$  nyílt,  $K \subset G$  korlátos, zárt krumplics, aminek a  $\partial K$  határa darabonként folytonosan differenciálható felület, és ezeken az irányított normálvektor mindig kifelé mutat, továbbá  $\mathbf{f} : G \rightarrow \mathbb{R}^3$  folytonosan differenciálható, akkor

$$\int_K (\operatorname{div} \mathbf{f}) \, dV = \int_{\partial K} \langle \mathbf{f}, \overrightarrow{d\mathbf{A}} \rangle.$$

**Bizonyítás.**

$$\begin{aligned} \int_K (\operatorname{div} \mathbf{f}) \, dV &= \int_K \left( D_1 f_1 \, dV + D_2 f_2 \, dV + D_3 f_3 \, dV \right) = \\ &= \int_{\partial K} \left( f_1 \overrightarrow{d\mathbf{A}}_1 + f_2 \overrightarrow{d\mathbf{A}}_2 + f_3 \overrightarrow{d\mathbf{A}}_3 \right) = \int_{\partial K} \langle \mathbf{f}, \overrightarrow{d\mathbf{A}} \rangle. \end{aligned}$$

### Definíció (vektormező rotációja 3-dimenzióban)

Az  $\mathbf{f} : G \rightarrow \mathbb{R}^3$  vektormező rotációja

$$\operatorname{rot} \mathbf{f} = \nabla \times \mathbf{f} = \begin{pmatrix} D_2 f_3 - D_3 f_2 \\ D_3 f_1 - D_1 f_3 \\ D_1 f_2 - D_2 f_1 \end{pmatrix}.$$

### Megjegyzés

A rotáció most is örvénysűrűséget jelent, de az örvények különböző síkokban fehetnek. Ha egy kis körvonal területvektora  $\mathbf{v}$ , akkor a körvonalon az örvényerősség  $\langle \operatorname{rot} \mathbf{f}, \mathbf{v} \rangle$ . Ilyen értelemben a rotáció egy  $\mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$  lineáris függvény.

### Tétel

A rotáció nem függ a koordinátarendszer irányától.

**Bizonyítás.** Megint vegyük a  $T$  transzformációt; azt fogjuk megmutatni, hogy bármilyen  $\mathbf{v}$  vektorra

$$\langle \operatorname{rot}_{új} \mathbf{f}_{új}, \mathbf{v}_{új} \rangle = \langle \operatorname{rot} \mathbf{f}, \mathbf{v} \rangle.$$

És valóban,

$$\begin{aligned} \langle \operatorname{rot}_{új} \mathbf{f}_{új}, \mathbf{v}_{új} \rangle &= \det(\nabla_{új}, \mathbf{f}_{új}, \mathbf{v}_{új}) = \det(T^t \nabla, T^t \mathbf{f}, T^t \mathbf{v}) = \\ &= \det(T^t \cdot (\nabla, \mathbf{f}, \mathbf{v})) = \det(\nabla, \mathbf{f}, \mathbf{v}) = \langle \operatorname{rot} \mathbf{f}, \mathbf{v} \rangle. \end{aligned}$$



## Tétel (Stokes)

Ha  $G \subset \mathbb{R}^3$  nyílt,  $K \subset G$  korlátos, zárt krumplics, aminek a  $\partial K$  határa darabonként folytonosan differenciálható felület, és ezeken az irányított normálvektor mindig kifelé mutat, továbbá  $\mathbf{f} : G \rightarrow \mathbb{R}^3$  folytonosan differenciálható, akkor

$$\int_K (\operatorname{rot} \mathbf{f}) \, dV = - \int_{\partial K} \mathbf{f} \times \overrightarrow{d\mathbf{A}}.$$

**Bizonyítás.**

$$\begin{aligned} \int_K (\operatorname{rot} \mathbf{f}) \, dV &= \begin{pmatrix} \int_K D_2 f_3 \, dV - \int_K D_3 f_2 \, dV \\ \int_K D_3 f_1 \, dV - \int_K D_1 f_3 \, dV \\ \int_K D_1 f_2 \, dV - \int_K D_2 f_1 \, dV \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} \int_{\partial K} f_3 \overrightarrow{dA}_2 - \int_{\partial K} f_2 \overrightarrow{dA}_3 \\ \int_{\partial K} f_1 \overrightarrow{dA}_3 - \int_{\partial K} f_3 \overrightarrow{dA}_1 \\ \int_{\partial K} f_2 \overrightarrow{dA}_1 - \int_{\partial K} f_1 \overrightarrow{dA}_2 \end{pmatrix} = \int_{\partial K} (-\mathbf{f} \times \overrightarrow{d\mathbf{A}}). \end{aligned}$$

## Általános Stokes-tétel

Érdekes összehasonlítani az integráltételeinket:

Green-tétel	$\int_K D_i f \, dV = \int_{\partial K} f \cdot \overrightarrow{d\mathbf{A}}_i$
Newton–Leibniz formula	$\int_K (\operatorname{grad} f) \, dV = \int_{\partial K} f \cdot \overrightarrow{d\mathbf{A}}$
Gauss–Ostrogradszkij tétel	$\int_K (\operatorname{div} \mathbf{f}) \, dV = \int_{\partial K} \langle \mathbf{f}, \overrightarrow{d\mathbf{A}} \rangle$
Stokes-tétel	$\int_K (\operatorname{rot} \mathbf{f}) \, dV = - \int_{\partial K} \mathbf{f} \times \overrightarrow{d\mathbf{A}}$

Ezeknek egy közös általánosítása a következő:

### Tétel (általánosabb Stokes-tétel)

Legyenek  $q, r$  pozitív egészek, és legyen  $*$  :  $\mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^q \rightarrow \mathbb{R}^r$  valamilyen szorzás (bilineáris leképezés). Legyen  $G \subset \mathbb{R}^3$  nyílt,  $K \subset G$  korlátos, zárt krumplics, aminek a  $\partial K$  határa darabonként folytonosan differenciálható felület, és ezeken az irányított normálvektor mindig kifelé mutat, és legyen  $\mathbf{f} : G \rightarrow \mathbb{R}^q$  folytonosan differenciálható. Ekkor

$$\int_K (\nabla * \mathbf{f}) \, dV = \int_{\partial K} \overrightarrow{d\mathbf{A}} * \mathbf{f}.$$

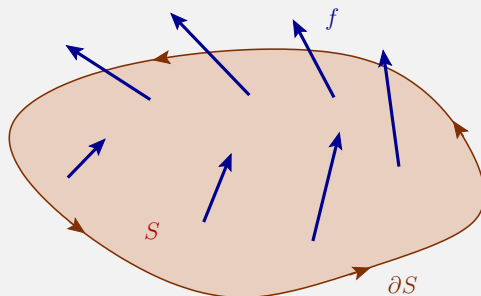
A tételt könnyen bebizonyíthatjuk az előbbi példák alapján. Magasabb dimenzióban a  $\overrightarrow{dA}$  felületelemet kell értelmeznünk, ehhez a vektorális szorzást kell kiterjesztenünk  $(p - 1)$  darab,  $p$ -dimenziós vektorra.

A Newton–Leibniz formula esetében  $q = 1$ , tehát  $f$  skalármező,  $r = 3$  és  $*$  vektor szorzása skalárral. A Gauss–Osztrogradszkij tételben  $q = 3$ ,  $r = 1$  és  $*$  a vektorok skaláris szorzata. A Stokes-tételben pedig  $q = r = 3$ , és  $*$  a vektorális szorzás.

A Maxwell-egyenletekben a divergenciatételén kívül a következő integráltétel is szerepel:

### Tétel (Kelvin–Stokes (Lord Kelvin = William Thomson, 1824–1907))

Ha  $S \subset G$  egy irányított, peremes felület, ami mondjuk darabonként folytonosan differenciálható, a határa pedig szakaszonként  $C^1$ , valamint  $\mathbf{f} : G \rightarrow \mathbb{R}^3$  folytonosan differenciálható vektormező, akkor  $\int_S \langle \text{rot } \mathbf{f}, \overrightarrow{dA} \rangle = \int_{\partial S} \langle \mathbf{f}, d\mathbf{x} \rangle$ .



Jól felismerhető, hogy ez valójában a kétdimenziós Stokes-tétel egy kiterjesztése felületdarabokra.

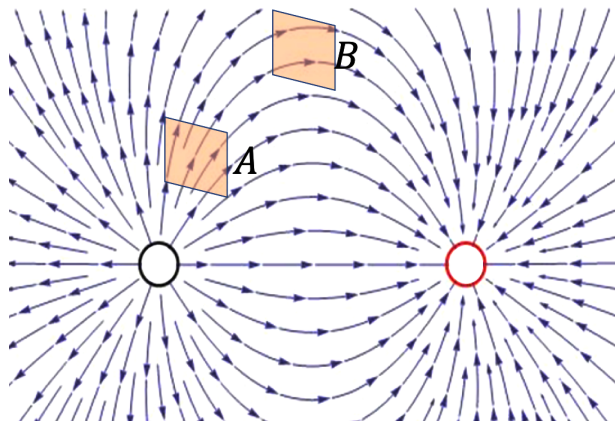
# Maxwell-egyenletek

Sorszám, név	Differenciális alak	Integrális alak
I. (Gauss-törvény)	$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$	$\oint_A \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \int_V \frac{\rho}{\varepsilon_0} \cdot dV = \frac{Q}{\varepsilon_0}$
II. (Faraday-Lenz törvény)	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$
III. (Gauss mágneses törvénye)	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\oint_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$
IV. (Ampère-törvény)	$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$	$\oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \int_A \mathbf{J} \cdot d\mathbf{A} + \frac{1}{c^2} \frac{d}{dt} \int_A \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A}$

Az I. és III. egyenletnél a Gauss-Osztrogradszkij tétel, a II. és IV. egyenletnél a Kelvin-Stokes tétel a kapcsolat a differenciális és az integrális alakok között.

## Erővonalak és divergenciamentesség

Az elektromos, mágneses és a gravitációs mezőket is szeretjük "erővonalakkal" szemléltetni. Az erővonalak iránya megegyezik a térerősség irányával, az erővonalak sűrűsége pedig a térerősség nagyságával. Egy irányított felületdarabon a mező fluxusa a felületet átdőő erővonalak száma.



(Forrás: <http://www.physicsbootcamp.org/Flux-of-Electric-Field.html>)

Az erővonalas szemléltetés akkor jogos, ha a forrásmentes, tehát 0 töltésű/tömegű térrészek fluxusa 0, vagyis ha a vektormező divergenciamentes. Ezért sem szoktunk töltött testek belsejében erővonalakat rajzolni.

# Körülfordulási szám és változatai

A Gauss-Osztrogradszkij tétel szerint divergenciamentes vektormezőnek minden szép krumplics határán nulla a felületi integrálja. Ez lehetőséget ad a primitív függvényről szóló fejezet általánosítására: meg lehetne csinálni a Goursat-lemma felületi integrálokról szóló variánsát, és bebizonyítani, hogy minden nullhomotóp zárt felületen (vagy akár csak poliéderen) nulla a felületi integrál. Ezzel az eszközzel be tudjuk bizonyítani például azt, hogy  $\mathbb{R}^3 \setminus \{(0, 0, 0)\}$  nem homeomorf  $\mathbb{R}^3$ -bel.

Két dimenzióban a  $\gamma$  görbének az  $\mathbf{a}$  pont körüli körülfordulási számát a következő alakba is írhatjuk:

$$n(\gamma, c) = \frac{1}{2\pi} \int_{\mathbf{x} \in \gamma} \left\langle \frac{\mathbf{x} - \mathbf{a}}{|\mathbf{x} - \mathbf{a}|^2}; \overrightarrow{d\mathbf{A}} \right\rangle$$

ahol az integrál előtt álló  $2\pi$  az egységkör kerülete.

Ennek mintájára, ha  $\mathcal{S}$  darabonként folytonosan differenciálható, irányított zárt felület  $\mathbb{R}^3$ -ban, amely nem megy át a  $\mathbf{a}$  ponton, akkor az

$$\frac{1}{4\pi} \int_{\mathbf{x} \in \mathcal{S}} \left\langle \frac{\mathbf{x} - \mathbf{a}}{|\mathbf{x} - \mathbf{a}|^3}; \overrightarrow{d\mathbf{A}} \right\rangle$$

felületi integrál azt számolja meg, hogy az  $S$  felület hányszor "kerüli meg" az  $\mathbf{a}$  pontot.

(A  $\frac{\mathbf{x}-\mathbf{a}}{|\mathbf{x}-\mathbf{a}|^3}$  vektormező divergenciamentes; a origó középpontú gömbökön a fluxusa  $4\pi$ , ami az egységgömb felszíne.)

Érdeemes összehasonlítani az előbbi képleteket a Gauss-féle összehurkolódási számmal.

- $\mathbb{R}^2$ -ben az  $\mathbf{a}$  pontot a  $\gamma$  zárt görbe ennyiszor kerüli meg:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{\mathbf{x} \in \gamma} \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{c})}{|\mathbf{x} - \mathbf{c}|^2} \times d\mathbf{x} = \frac{1}{2\pi} \int_{\mathbf{x} \in \gamma} \left\langle \frac{\mathbf{x} - \mathbf{a}}{|\mathbf{x} - \mathbf{a}|^2}; \mathbf{n} ds \right\rangle$$

- $\mathbb{R}^3$ -ban az  $\mathbf{a}$  pontot az  $\mathcal{S}$  zárt felület ennyiszor kerüli meg:

$$\frac{1}{4\pi} \int_{\mathbf{x} \in \mathcal{S}} \left\langle \frac{\mathbf{x} - \mathbf{a}}{|\mathbf{x} - \mathbf{a}|^3}; \overrightarrow{d\mathbf{A}} \right\rangle$$

- $\mathbb{R}^3$ -ban a  $\gamma_1$  zárt görbén a  $\gamma_2$  zárt görbe ennyiszor bújik át:

$$\frac{1}{4\pi} \int_{\mathbf{x} \in \gamma_1} \int_{\mathbf{y} \in \gamma_2} \left\langle \frac{\mathbf{x} - \mathbf{y}}{|\mathbf{x} - \mathbf{y}|^3}; d\mathbf{x} \times d\mathbf{y} \right\rangle$$

- Ezeknek közös általánosítása az általánosított összekapcsolódási szám.

## II. rész

# Mértékek

4. előadás, 2023.03.09.

## 4. Halmazstruktúrák, Borel-halmazok

Nem létezik pozitív, eltolásinvariáns, normált,  $\sigma$ -additív függvény  $\mathcal{P}(\mathbb{R}^p)$ -n.

Halmazrendszerek, megszorítás. Halmazalgebra, gyűrű, modulus, félgűrű,  $\sigma$ -algebra,  $\sigma$ -gyűrű. Generált struktúrák. Halmazstruktúrák megszorításai. Borel-halmazok top. terekben. Mérfető tér. Halmazfüggvények. Monoton, additív,  $\sigma$ -additív és  $\sigma$ -szubadditív halmazfüggvények. Mérték. Ha  $A_1 \subset A_2 \subset \dots$ , akkor  $\mu(\cup A_n) = \lim \mu(A_n)$ . Ha  $A_1 \supset A_2 \supset \dots$  és  $\mu(A_1) < \infty$ , akkor  $\mu(\cap A_n) = \lim \mu(A_n)$ . [Petruska, 51–52, 55, 81–82. o.]

Az eddigi Jordan-mértéket és a többváltozós Riemann-integrált szeretnénk kiterjeszteni minél többféle halmazra és függvényre. A Jordan-mérhető halmazok rendszerét  $\mathcal{J}$  vagy  $\mathcal{J}(\mathbb{R}^p)$  fogja jelölni; az  $A \subset \mathbb{R}^p$  halmaz Jordan-mértékét pedig (ha van)  $t(A)$ , a külső és belső mértékét  $\bar{t}(A)$ , illetve  $\underline{t}(A)$ . (A  $k$  és  $b$  betűkkel takarékoskodunk.)

### Rózsaszínű álom

Szeretnénk a Jordan-mértéket a tér minden részhalmazára kiterjeszteni; olyan  $\mu : \mathcal{P}(\mathbb{R}^p) \rightarrow [0, \infty]$  függvényt, ami additív, sőt  $\sigma$ -additív, normált és eltolásinvariáns.

$\sigma$ -additív tulajdonság: ha  $A_1, A_2, \dots \subset \mathbb{R}^p$  páronként diszjunktak, akkor

$$\mu\left(\bigsqcup_{k=1}^{\infty} A_k\right) = \sum_{k=1}^{\infty} \mu(A_k).$$

A  $\sigma$ -additivitás nagyon lényeges tulajdonság lesz többféle matematikai területen, például valószínűségszámításban: ha  $A_1, A_2, \dots$  egymást kizáró események egy sorozata, akkor elvárjuk, hogy

$$P(A_1 \vee A_2 \vee \dots) = P(A_1) + P(A_2) + \dots$$

teljesüljön.

Az első, kézenfekvő lehetőség, hogy a külső Jordan-mérték definíciójában végtelen sok halmazzal való fedéseket is megengedünk. Az így kapott függvény, amely  $\mathbb{R}^p$  részhalmazaihoz rendel  $[0, \infty]$ -beli értékeket, a Lebesgue-féle külső mérték:

**Definíció (Lebesgue-féle külső mérték (Henri Léon Lebesgue, 1875–1941))**

Bármely  $A \subset \mathbb{R}^p$  halmaz *Lebesgue-féle külső mértéke*

$$\bar{\lambda}(A) = \inf \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} t(R_k) : R_1, R_2, \dots \text{ tengelypárhuzamos téglák, } A \subset \bigcup_{k=1}^{\infty} R_k \right\}.$$

- $\bar{\lambda}$  egy  $\mathcal{P}(\mathbb{R}^p) \rightarrow [0, \infty]$  függvény. Korlátos halmazokra  $\bar{\lambda}(A) \leq \bar{t}(A)$ .
- Végtelen sok belső téglát nem ad új belső mérték-fogalmat.
- Rossz hír: Sajnos  $\bar{\lambda}$  nem additív; az egységkockát fel lehet bontani két diszjunkt halmazzal, amelyek külső mértékének összege nagyobb, mint 1.
- A Jordan-mértékhez hasonlóan csak bizonyos halmazokat fogunk *Lebesgue-mérhetőnek* hívni. Ezekre megszorítva a *Lebesgue-mérték* normált,  $\sigma$ -additív és eltolásinvariáns lesz.
- A Lebesgue-féle külső mérték többféle halmazzal ad egy használható mérték-fogalmat, mint a Jordan-mérték, például az összes megszámlálható halmaz nullmértékű, és minden nyílt és minden zárt halmaz mérhető lesz (v.ö. a kövér Cantor halmazok nem Jordan-mérhetőek).
- Probálkozhatnánk más módokon, az egész  $\mathcal{P}(\mathbb{R}^p)$  halmazon értelmes függvényt konstruálni (hajrá), de erre nincs sok esélyünk, mert...

**Tétel (álomgyilkos tétel)**

Nem létezik normált, eltolásinvariáns,  $\sigma$ -additív  $\mu : \mathcal{P}(\mathbb{R}^p) \rightarrow [0, \infty]$  függvény.

**Bizonyítás (Vitali-konstrukció).**

† Tegyük fel, hogy mégis létezik egy ilyen  $\mu$  függvény.

Először is jegyezzük meg, hogy tetszőleges  $A \subset B \subset \mathbb{R}^p$  esetén

$$\mu(A) \leq \mu(A) + \mu(B \setminus A) = \mu(A \cup (B \setminus A)) = \mu(B).$$

Legyen  $H \subset [0, \frac{1}{2}]^p$  olyan halmaz, amely minden  $\mathbb{Q}^p$  minden eltoltjából pontosan egy elemet tartalmaz. Bármely  $r, s \in \mathbb{Q}^p$ ,  $r \neq s$  esetén  $H + r$  és  $H + s$  diszjunkt, és az eltolásinvariancia miatt  $\mu(H + r) = \mu(H + s) = \mu(H)$ . Ezen kívül bármely  $r \in \mathbb{Q}^p \cap [0, \frac{1}{2}]^p$  esetén  $H + r \subset [0, 1]^p$ .

Vegyük a  $\mathbb{Q}^p \cap [0, \frac{1}{2}]^p$  halmaz egy  $r_1, r_2, \dots$  felsorolását: ekkor

$$\sum_{k=1}^{\infty} \mu(H) = \sum_{k=1}^{\infty} \mu(H + r_k) = \mu\left(\bigsqcup_{k=1}^{\infty} (H + r_k)\right) \leq \mu([0, 1]^p) = 1,$$

ami csak úgy lehetséges, ha  $\mu(H) = 0$ .

Most vegyük a  $\mathbb{Q}^p$  egy  $s_1, s_2, \dots$  felsorolását. Ekkor

$$\mathbb{R}^p = \bigsqcup_{k=1}^{\infty} (H + s_k),$$

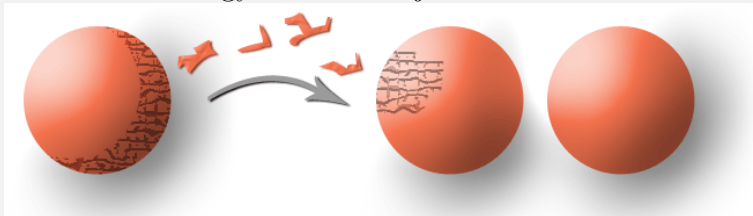
és

$$1 = \mu([0, 1]^p) \leq \mu(\mathbb{R}^p) = \mu\left(\bigsqcup_{k=1}^{\infty} (H + s_k)\right) = \sum_{k=1}^{\infty} \mu(H + s_k) = \sum_{k=1}^{\infty} \mu(H) = \sum_{k=1}^{\infty} 0 = 0. \quad \text{!}$$

Ez ellentmondás, így nincs ilyen  $\mu$ .

### Tétel (Banach–Tarski paradoxon (Stefan Banach, 1892–1945; Alfred Tarski, 1901–1983))

A kiválasztási axióma segítségével,  $\mathbb{R}^3$ -ben a zárt egységgömb felbontható véges sok, páronként diszjunkt ponthalmaz uniójára úgy, hogy ezekkel egybevágó halmazokból két zárt egységgömböt lehet összerakni úgy, hogy mindegyik darabot csak egyszer használjuk.



<https://hu.wikipedia.org/wiki/Banach-Tarski-paradoxon>

### Következmény

Az  $\mathbb{R}^3$  korlátos részhalmazain nem létezik nemnegatív, additív, egybevágóság-invariáns, normált függvény.

# Halmazstruktúrák és mérhető terek

Mindig lesz egy nemüres alaphalmazunk (többnyire  $X$ , esetleg  $\mathbb{R}^p$ ). Az  $X$ -et és részhalmazait nyomtatott nagy betűkkel fogjuk jelölni, halmazrendszereket írott nagy betűvel pl.  $\mathcal{P}(X)$ . Általában a különböző halmazrendszereknek mindig eleme lesz az üres halmaz. A valós/komplex értékű halmazfüggvényeket, amelyek  $X$  bizonyos részhalmazaihoz rendelnek valós vagy komplex számokat, kis görög betűvel fogjuk jelölni.

## Definíció (halmazgyűrű)

Az  $\mathcal{R} \subset \mathcal{P}(X)$  halmazrendszer egy *(halmaz)gyűrű*, ha

- $\emptyset \in \mathcal{R}$ ,
- Bármely  $A, B \in \mathcal{R}$  esetén  $(A \cup B) \in \mathcal{R}$ ,  $(A \cap B) \in \mathcal{R}$  és  $(A \setminus B) \in \mathcal{R}$ .

Például  $\mathcal{J}(\mathbb{R}^p)$  egy halmazgyűrű  $\mathbb{R}^p$ -ben. De bármely  $X$  esetén gyűrű a teljes  $\mathcal{P}(X)$  hatványhalmaz vagy a  $\{\emptyset\}$  elemű gyűrű is.

A szimmetrikus differenciával, mint összeadással és a metszettel, mint szorzással, a halmazgyűrű egyben algebrai gyűrű is. Ez az algebrai gyűrű akkor egységletes, ha gyűrűbeli halmazok uniója is gyűrűelem.

## Definíció (halmazalgebra)

Az  $\mathcal{A} \subset \mathcal{P}(X)$  halmazrendszer egy *(halmaz)algebra*, ha olyan gyűrű, ami zárt a komplementerképzésre is:

- $\emptyset \in \mathcal{A}$  és  $X \in \mathcal{A}$ ;
- Bármely  $A, B \in \mathcal{A}$  esetén  $(A \cup B) \in \mathcal{A}$ ,  $(A \cap B) \in \mathcal{A}$ ,  $(A \setminus B) \in \mathcal{A}$  és  $(X \setminus A) \in \mathcal{A}$ .

**Triviális**  példák a  $\mathcal{P}(X)$  hatványhalmaz, az  $\{\emptyset, X\}$  kételemű algebra.

A  $\mathcal{P}(X)$  hatványhalmaz a szimmetrikus differenciával és a metszettel pontosan ugyanaz, mint  $\mathbb{F}_2^X$ : az  $X$  minden eleméhez vesszük a kételemű test egy példányát, és ezek direkt szorzatát.



### Definíció ( $\sigma$ -gyűrű)

Az  $\mathcal{R} \subset \mathcal{P}(X)$  halmazrendszer egy  $\sigma$ -gyűrű, ha olyan gyűrű, ami a megszámlálható unióra is zárt: bármely  $A_1, A_2, \dots \in \mathcal{R}$  esetén  $\bigcup_{k=1}^{\infty} A_k \in \mathcal{R}$ .

### Megjegyzés

A  $\sigma$ -gyűrűk a megszámlálható metszetre is zártak, mert bármely  $A_1, A_2, \dots \in \mathcal{R}$  esetén

$$\bigcap_{k=1}^{\infty} A_k = A_1 \setminus \left( \bigcup_{k=2}^{\infty} (A_1 \setminus A_k) \right).$$

### Definíció ( $\sigma$ -algebra)

Az  $\mathcal{A} \subset \mathcal{P}(X)$  halmazrendszer egy  $\sigma$ -algebra, ha olyan algebra, ami a megszámlálható unióra is zárt: bármely  $A_1, A_2, \dots \in \mathcal{A}$  esetén  $\bigcup_{k=1}^{\infty} A_k \in \mathcal{A}$ .

### Megjegyzés

Az előző számolással ellentétben most felhasználhatjuk az  $X$  halmazt is, és az  $A_k$  halmazok komplementereit:

$$\bigcap_{k=1}^{\infty} A_k = X \setminus \left( \bigcup_{k=1}^{\infty} (X \setminus A_k) \right).$$

Általában olyan halmazfüggvényekkel fogunk foglalkozni, amelyek valamilyen  $\sigma$ -algebra, esetleg  $\sigma$ -gyűrű elemeihez rendelnek számokat. Az ilyen mértékjellegű függvények kiterjesztésekor fogjuk használni a következőket:

### Definíció (halmazmodulus)

Az  $\mathcal{M} \subset \mathcal{P}(X)$  halmazrendszer egy (halmaz)modulus, ha

- $\emptyset \in \mathcal{M}$ ,
- Bármely  $A, B \in \mathcal{M}$  esetén  $(A \cap B) \in \mathcal{M}$  és  $(A \setminus B) \in \mathcal{M}$ .

## Megjegyzés

A metszetet nem lenne muszáj kikötni, mert kifejezhető a különbséggel:

$$A \cap B = (A \setminus (A \setminus B)).$$

A modulusok használatát teljesen ki fogjuk kerülni; a teljesség kedvéért írtam le.

## Definíció (halmazfélgűrű)

Az  $\mathcal{F} \subset \mathcal{P}(X)$  halmazrendszer egy *(halmaz)félgűrű*, ha

- $\emptyset \in \mathcal{F}$ ;
- Bármely  $A, B \in \mathcal{F}$  esetén  $(A \cap B) \in \mathcal{F}$ ;
- Bármely  $A, B \in \mathcal{F}$  esetén az  $A \setminus B$  különbség felírható véges sok félgűrűelem diszjunkt uniójaként, tehát létezik olyan  $n$  pozitív egész és páronként diszjunkt  $C_1, \dots, C_n \in \mathcal{F}$ , hogy  $A \setminus B = C_1 \sqcup \dots \sqcup C_n$ .

Félgűrűre a legfontosabb példa a számegegyenes  $[a, b)$  alakú, balról zárt, jobbról nyílt intervallumainak rendszere (természetesen kiegészítve az üres halmazzal, mint elemmel). Magasabb dimenzióban,  $\mathbb{R}^p$ -ben pedig az  $[a_1, b_1) \times \dots \times [a_p, b_p)$  alakú félig nyílt téglák.

Általában a mértékeinket előbb valamilyen félgűrűn fogjuk definiálni, majd a félgűrűről fogjuk kiterjeszteni a halmazfüggvényt – vagy előbb a generált modulusra, vagy közvetlenül – a generált gyűrűre,  $\sigma$ -gyűrűre vagy  $\sigma$ -algebrára.

Nyugodtan gondolhatunk a félgűrűre, mint valamiféle tégláknak a rendszerére: a halmazfüggvényeink kiterjesztése mindig úgy fog történni, hogy a különböző halmazokat lefedjük megszámlálható sok téglával. (Ezért is jelölöm inkább  $\mathcal{F}$ -fel:  $\mathcal{F}$  mint  $\mathcal{F}$ élgűrű, aminek az elemeivel  $\mathcal{F}$ edni fogunk halmazokat.)

#### 4.1 Lemma (lem.fgyatrend)

- (a) Legyen  $\mathcal{F} \subset \mathcal{P}(X)$  félgyűrű és  $B, A_1, A_2, \dots, A_k \in \mathcal{F}$ . Ekkor léteznek olyan  $C_1, \dots, C_n \in \mathcal{F}$  diszjunkt halmazok, hogy

$$B \setminus (A_1 \cup \dots \cup A_k) = C_1 \sqcup \dots \sqcup C_n.$$

- (b) Bármely  $A_1, A_2, \dots \in \mathcal{F}$  sorozat uniója átrendezhető diszjunkt halmazok uniójára: léteznek olyan páronként diszjunkt  $B_1, B_2, \dots \in \mathcal{F}$  halmazok és olyan  $1 \leq k_1 < k_2 < \dots$  indexsorozat, hogy bármely  $n$ -re

$$A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n = B_1 \sqcup B_2 \sqcup \dots \sqcup B_{k_n}.$$

**Bizonyítás.** (a) Indukció  $k$  szerint.

(b) Minden  $i \geq 2$ -re vegyünk olyan  $C_{i,1}, \dots, C_{i,m_i} \in \mathcal{F}$  gyűrűelemeket, amelyekre  $A_i \setminus (A_1 \cup \dots \cup A_{i-1}) = C_{i,1} \sqcup \dots \sqcup C_{i,m_i}$ , majd legyen

$$(B_1, B_2, B_3, \dots) = (A_1, C_{1,1}, \dots, C_{1,m_1}, C_{2,1}, \dots, C_{2,m_2}, \dots).$$

#### Tétel (generált halmazstruktúrák)

Bármely  $\mathcal{A} \subset \mathcal{P}(X)$  halmazrendszerhez létezik legszűkebb  $\mathcal{A}$ -t tartalmazó halmazalgebra,  $\sigma$ -algebra, gyűrű,  $\sigma$ -gyűrű, illetve modulus.

**Bizonyítás.** Halmazalgebrák,  $\sigma$ -algebrák, gyűrűk,  $\sigma$ -gyűrűk, illetve modulusok metszete is halmazalgebra,  $\sigma$ -algebra, gyűrű,  $\sigma$ -gyűrű, illetve modulus. Vegyük az  $\mathcal{A}$ -t tartalmazó halmazalgebrák,  $\sigma$ -algebrák, gyűrűk,  $\sigma$ -gyűrűk, illetve modulusok metszetét. (A metszetnek biztosan van legalább egy tagja: a  $\mathcal{P}(X)$  hatványhalmaz.)

#### Megjegyzés

Generált félgyűrű többnyire nincs, mert könnyen elhagyhatunk elemeket úgy, hogy a struktúra még mindig félgyűrű maradjon. (A félgyűrű nem algebrai struktúra.)

#### Definíció (halmazrendszer megszorítása)

Az  $\mathcal{A} \subset \mathcal{P}(X)$  megszorítása a  $H \subset X$  halmazra

$$\mathcal{A}|_H = \{A \cap H : A \in \mathcal{A}\}.$$

Algebra, gyűrű, modulus, félgűrű megszorítása is algebra, gyűrű, modulus, illetve félgűrű.

## Borel-halmazok

**Definíció (Borel-halmazok (Félix Edouard Justin Émile Borel, 1871–1956))**

- Ha  $(X, \mathcal{T})$  topologikus tér (tehát  $\mathcal{T} \subset \mathcal{P}(X)$  a nyílt halmazok rendszere), akkor a  $\mathcal{T}$  által generált  $\sigma$ -algebra elemei a tér *Borel-halmazai*. A generált  $\sigma$ -algebrát  $\mathcal{B}(X)$  vagy egyszerűen  $\mathcal{B}$  fogja jelölni.

- Ezen belül fontos halmaz kategóriák:

$$- \mathcal{G}_\delta(X) = \left\{ \bigcap_{k=1}^{\infty} A_k : A_1, A_2, \dots \text{ nyíltak} \right\}:$$

a megszámlálható sok nyílt halmaz metszeteként előálló halmazok;

$$- \mathcal{F}_\sigma(X) = \left\{ \bigcup_{k=1}^{\infty} A_k : A_1, A_2, \dots \text{ zártak} \right\}:$$

a megszámlálható sok zárt halmaz uniójaként előálló halmazok;

$$- \mathcal{G}_{\delta\sigma}(X) = \left\{ \bigcup_{k=1}^{\infty} A_k : A_1, A_2, \dots \in \mathcal{G}_\delta \right\}:$$

a megszámlálható sok  $\mathcal{G}_\delta$  halmaz uniójaként előálló halmazok;

$$- \mathcal{F}_{\sigma\delta}(X) = \left\{ \bigcap_{k=1}^{\infty} A_k : A_1, A_2, \dots \in \mathcal{F}_\sigma \right\}:$$

a megszámlálható sok  $\mathcal{F}_\sigma$  halmaz metszeteként előálló halmazok;

$$- \mathcal{G}_{\delta\sigma\delta}(X) = \left\{ \bigcap_{k=1}^{\infty} A_k : A_1, A_2, \dots \in \mathcal{G}_{\delta\sigma} \right\}:$$

a megszámlálható sok  $\mathcal{G}_{\delta\sigma}$  halmaz metszeteként előálló halmazok;

$$- \mathcal{F}_{\sigma\delta\sigma}(X) = \left\{ \bigcup_{k=1}^{\infty} A_k : A_1, A_2, \dots \in \mathcal{F}_{\sigma\delta} \right\}:$$

a megszámlálható sok  $\mathcal{F}_{\sigma\delta}$  halmaz uniójaként előálló halmazok;

- ...

## Példák

- A valós számegegyenesen  $\mathcal{G}_\delta$  az összes intervallum és minden zárt halmaz.
- Minden megszámlálható halmaz  $\mathcal{F}_\sigma$ , mert megszámlálható sok egy-pontú zárt halmaz uniója.
- $\mathbb{Q} \in \mathcal{F}_\sigma(\mathbb{R})$ , de  $\mathbb{Q} \notin \mathcal{G}_\delta(\mathbb{R})$ . (Jó gyakorlat a Cantor-axiómára és a Baire-kategóriatételre.)
- A  $\mathcal{B}$  generálásához nincs szükség minden nyílt halmazra. Például a számegegyenesen a racionális végpontú,  $(q, \infty)$  félegyenesek vagy a racionális gömbök generálják az összes nyílt halmazt.

## Hány Borel-halmaz van?

Jó kérdés, hogy a  $\mathcal{G}_\delta, \mathcal{G}_{\delta\sigma}, \mathcal{G}_{\delta\sigma\delta}, \dots$  sorozat mikor, melyik rendszámnál stabilizálódik, mikor kapunk először  $\sigma$ -algebrát; onnan kezdve már nem kapunk új Borel-halmazokat.

### Tétel

$|\mathcal{B}(\mathbb{R}^p)| = \mathfrak{c} = 2^{\aleph_0}$ , avagy az  $\mathbb{R}^p$  térben kontinuum sok Borel-halmaz van.

**Bizonyítás.** Az egypontú halmazok is Borelek, tehát legalább kontinuum sok Borel-halmaz van; a kérdés a felső becslés.


Kicsit formálisabban, defináljuk transzfinit rekurzióval a következő sorozatot:

- $\mathcal{B}_0$  a nyílt téglák halmaza;
- Bármely  $\alpha$  rendszámra legyen  $\mathcal{B}_{\alpha+1}$  az olyan halmazok rendszere, amelyek előállnak  $\mathcal{B}_\alpha$ -beli halmazok komplementere, különbsége, véges metszete vagy megszámlálható uniójaként.
- Bármely  $\alpha$  limeszrendszámra legyen  $\mathcal{B}_\alpha = \bigcup_{\beta < \alpha} \mathcal{B}_\beta$ .

Vegyük észre, hogy a sorozat monoton nő,  $\mathcal{B}_\alpha \subset \mathcal{B}_{\alpha+1}$ .

Az állítjuk, hogy a  $\mathcal{B}_{\omega_1}$  rendszer már  $\sigma$ -algebra; ( $\omega_1$  az első nem megszámlálható rendszám). Ezt most csak a megszámlálható unióra ellenőrizzük.

Legyen  $A_1, A_2, \dots \in \mathcal{B}_{\omega_1}$ ; azt kell ellenőriznünk, hogy ezek uniója is  $\mathcal{B}_{\omega_1}$ -ben van. Az  $\omega_1$  egy limeszrendszám, tehát mindegyik  $A_i$  benne van egy korábbi  $\mathcal{B}_{\alpha_i}$  osztályban. Legyen  $\beta = \sup \alpha_i = \bigcup \alpha_i$ ; ekkor  $A_1, A_2, \dots$  mind  $\mathcal{B}_\beta$ -beli, az uniójuk  $\mathcal{B}_{\beta+1}$ -beli. A  $\beta$  megszámlálható sok megszámlálható rendszám uniója, maga is megszámlálható, ezért  $\beta+1 < \omega_1$ , tehát  $\bigcup A_i \in \mathcal{B}_{\beta+1} \subset \mathcal{B}_{\omega_1}$ . Ezzel megvan, hogy  $\mathcal{B}_{\omega_1}$  zárt a megszámlálható unióra.

A  $\mathcal{B}$  generátorrendszer kontinuum számosságú. Tudjuk, hogy kontinuum sok kontinuum számosságú halmaz uniója is kontinuum számosságú, illetve egy kontinuum számosságú halmaz elemeiből álló sorozatok halmaza is kontinuum. Ennek felhasználásával **triviális**  transzfinit indukcióval igazolhatjuk, hogy mindegyik  $\mathcal{B}_\alpha$  osztály kontinuum számosságú.

## 5. Halmazfüggvények, mértékek

### Definíció

Jelölés:  $\overline{\mathbb{R}} = \mathbb{R} \cup \{\infty, -\infty\}$ .

### Definíció (monoton halmazfüggvény)

Legyen  $\mathcal{A} \subset \mathcal{P}(X)$  halmazrendszer,  $\emptyset \in \mathcal{A}$ , és  $\alpha : \mathcal{A} \rightarrow [0, \infty]$ .

Az  $\alpha$  halmazfüggvény *monoton*, ha bármely  $A, B \in \mathcal{A}$ ,  $A \subset B$  esetén  $\alpha(A) \leq \alpha(B)$ .

### Definíció (additív és $\sigma$ -additív halmazfüggvények)

Legyen  $\mathcal{A} \subset \mathcal{P}(X)$  halmazrendszer,  $\emptyset \in \mathcal{A}$ ,  $\alpha : \mathcal{A} \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$  vagy  $\alpha : \mathcal{A} \rightarrow \mathbb{C}$ , és  $\alpha(\emptyset) = 0$ .

- Az  $\alpha$  halmazfüggvény *(végesen) additív*, ha bármely olyan, páronként diszjunkt  $A_1, \dots, A_n \in \mathcal{A}$  halmazokra, amelyekre  $A_1 \sqcup \dots \sqcup A_n \in \mathcal{A}$ ,

$$\alpha\left(\bigsqcup_{i=1}^n A_i\right) = \sum_{i=1}^n \alpha(A_i).$$

Ebbe beleértjük, hogy *az összeg mindig létezik*, tehát a tagok között nem szerepelhet a  $-\infty$  és a  $+\infty$  érték is.

Ha  $\mathcal{A}$  gyűrű, akkor az additivitást elég  $n = 2$ -re megkövetelni.

- Az  $\alpha$  halmazfüggvény  *$\sigma$ -additív*, ha bármely olyan, páronként diszjunkt  $A_1, A_2, \dots \in \mathcal{A}$  halmazokra, amelyekre  $A_1 \sqcup A_2 \sqcup \dots \in \mathcal{A}$ ,

$$\alpha\left(\bigsqcup_{i=1}^{\infty} A_i\right) = \sum_{i=1}^{\infty} \alpha(A_i).$$

Ebbe beleértjük, hogy *az összeg mindig létezik, és sorrendfüggetlen* is.

## Trivialitás

A  $\sigma$ -additivitásból következik az additivitás, mert a véges unióhoz hozzávehetünk végtelen sok üres halmazt.

## Definíció (szubadditív és $\sigma$ -szubadditív halmazfüggvények)

Legyen  $\mathcal{A} \subset \mathcal{P}(X)$  halmazrendszer,  $\emptyset \in \mathcal{A}$ ,  $\alpha : \mathcal{A} \rightarrow [0, \infty]$ ,  $\alpha(\emptyset) = 0$ .

- Az  $\alpha$  halmazfüggvény *szubadditív*, ha bármely olyan  $A_1, \dots, A_n, B \in \mathcal{A}$  halmazokra, amelyekre  $B \subset (A_1 \cup \dots \cup A_n)$ ,

$$\alpha(B) \leq \sum_{i=1}^n \alpha(A_i).$$

- Az  $\alpha$  halmazfüggvény  *$\sigma$ -szubadditív*, ha bármely olyan  $B, A_1, A_2, \dots \in \mathcal{A}$  halmazokra, amelyekre  $B \subset (A_1 \cup A_2 \cup \dots)$ ,

$$\alpha(B) \leq \sum_{i=1}^{\infty} \alpha(A_i).$$

## Trivialitás

A  $\sigma$ -szubadditivitásból következik a szubadditivitás, mert a véges unióhoz hozzávehetünk végtelen sok üres halmazt.

## Definíció (Mérhető tér)

*Mérhető tér:*  $(X, \mathcal{M})$ , ahol  $X \neq \emptyset$  a tér alaphalmaza,  $\mathcal{M} \subset \mathcal{P}(X)$  egy  $\sigma$ -algebra, a "mérhető" halmazok rendszere.

Majd a mérhető tereken értelmezni fogunk többféle "mértéket"...



### Definíció (mérték)

Legyen  $(X, \mathcal{M})$  mérhető tér.

- A  $\sigma$ -additív  $\mu : \mathcal{M} \rightarrow [0, \infty]$  függvényeket ( $\mu(\emptyset) = 0$ ) *mértékeknek* nevezzük.
- A  $\sigma$ -additív  $\vartheta : \mathcal{M} \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$  függvények ( $\vartheta(\emptyset) = 0$ ) az *előjeles mértékek*.
- A  $\sigma$ -additív  $\vartheta : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{C}$  függvények ( $\vartheta(\emptyset) = 0$ ) a *komplex mértékek*. Csak véges értékeik lehetnek.

### Definíció (mértéktér)

- $(X, \mathcal{M}, \mu)$  *mértéktér*, ha  $(X, \mathcal{M})$  mérhető tér, és  $\mu : \mathcal{M} \rightarrow [0, \infty]$  mérték.
- $(X, \mathcal{M}, \vartheta)$  *előjeles mértéktér*, ha  $(X, \mathcal{M})$  mérhető tér, és  $\vartheta : \mathcal{M} \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$  előjeles mérték.
- $(X, \mathcal{M}, \vartheta)$  *komplex mértéktér*, ha  $(X, \mathcal{M})$  mérhető tér, és  $\vartheta : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{C}$  komplex mérték.

## Példák

- Konstans nulla mérték:

$$\mu \equiv 0$$

- Konstans  $\infty$ :

$$\mu(A) = \begin{cases} 0 & \text{ha } A = \emptyset \\ \infty & \text{ha } A \neq \emptyset \end{cases}$$

- Tetszőleges  $X$  alaphalmaz esetén a  $\mu : \mathcal{P}(X) \rightarrow [0, \infty]$  függvény *számlálómérték* vagy *számosság mérték*, ha  $A \subseteq X$  esetén

$$\mu(A) = \begin{cases} |A| & \text{ha } |A| \text{ véges} \\ \infty & \text{ha } |A| \text{ végtelen} \end{cases}$$

- Tetszőleges  $X$  alaphalmaz és  $x_0 \in X$  esetén  $\mu : \mathcal{P}(X) \rightarrow [0, \infty]$  *Dirac-mérték* vagy  *$x_0$ -ra koncentrált mérték*, ha  $A \subseteq X$  esetén

$$\mu(A) = \begin{cases} 1 & \text{ha } x_0 \in A \\ 0 & \text{ha } x_0 \notin A \end{cases}$$

(Paul Adrien Maurice Dirac, 1902–1984)

## Lemma

Legyen  $\mu$  előjeles vagy komplex mérték.

- $\mu$  additív: ha  $A_1, \dots, A_n$  páronként diszjunkt mérhető, akkor 
$$\mu\left(\bigsqcup_{i=1}^n A_i\right) = \sum_{i=1}^n \mu(A_i).$$
- Ha  $\mu$  mérték, akkor monoton: ha  $A \subset B$  mérhető halmazok, akkor  $\mu(A) \leq \mu(B)$ .
- Ha  $A \subset B$  és  $|\mu(A)| < \infty$  vagy  $|\mu(B)| < \infty$ , akkor  $\mu(B \setminus A) = \mu(B) - \mu(A)$ .

**Bizonyítás.** (a) A  $\sigma$ -additivitásból következik az additivitás.

(b) Ha  $A \subset B$ , akkor

$$\mu(A) \leq \mu(A) + \mu(B \setminus A) = \mu(A \sqcup (B \setminus A)) = \mu(B).$$

(c) Az additivitás miatt  $\mu(B) = \mu(B \setminus A) + \mu(A)$ . Ha  $\mu(A)$  véges, akkor ki tudjuk vonni mindkét oldalból. Ha  $\mu(B)$  véges, az csak úgy lehet, ha a jobboldalon mindkét tag véges.

### Lemma (a mértékek folytonossága)

Legyen  $\mu$  előjeles vagy komplex mérték.

- Ha  $A_1 \subset A_2 \subset \dots$  mérhető halmazok, akkor  $\mu\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(A_n)$ .
- Ha  $A_1 \supset A_2 \supset \dots$  mérhető halmazok, és  $|\mu(A_1)| < \infty$ , akkor  $\mu\left(\bigcap_{n=1}^{\infty} A_n\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(A_n)$ .

### Megjegyzés

Egy  $A_1, A_2, \dots$  halmzsorozat *limesz inferiora* és *limesz superiora*

$$\underline{\lim} A_n = \bigcup_{k=1}^{\infty} \left( \bigcap_{n=k}^{\infty} A_n \right) = \left\{ x : \text{véges sok } n \text{ kivételével } x \in A_n \right\}, \text{ illetve}$$

$$\overline{\lim} A_n = \bigcap_{k=1}^{\infty} \left( \bigcup_{n=k}^{\infty} A_n \right) = \left\{ x : \text{végtelen sok } n\text{-re } x \in A_n \right\}.$$

Például ha a sorozat növekvő vagy csökkenő, akkor ezek megegyeznek, és a tétel azt állítja, hogy

$$\mu(\lim A_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(A_n).$$

**Bizonyítás.** (a) Legyen  $A_0 = \emptyset$  és  $B_n = A_n \setminus A_{n-1}$ , szóval  $A_n = B_1 \sqcup \dots \sqcup B_n$ .

$$\begin{aligned} \mu\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n\right) &= \mu\left(\bigsqcup_{n=1}^{\infty} B_n\right) = \sum_{n=1}^{\infty} \mu(B_n) = \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N \mu(B_n) = \lim_{N \rightarrow \infty} \mu\left(\bigcup_{n=1}^N B_n\right) = \lim_{N \rightarrow \infty} \mu(A_N). \end{aligned}$$

(b) Legyen  $B_n = A_1 \setminus A_n$ ; ekkor  $\emptyset = B_1 \subset B_2 \subset \dots$

$$\begin{aligned} \mu\left(\bigcap_{n=1}^{\infty} A_n\right) &= \mu\left(\bigcap_{n=1}^{\infty} (A_1 \setminus B_n)\right) = \mu\left(A_1 \setminus \bigcup_{n=1}^{\infty} B_n\right) = \mu(A_1) - \mu\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} B_n\right) = \\ &= \mu(A_1) - \lim_{N \rightarrow \infty} \mu(B_n) = \lim_{N \rightarrow \infty} (\mu(A_1) - \mu(B_n)) = \lim_{N \rightarrow \infty} (\mu(A_1 \setminus B_n)) = \lim_{N \rightarrow \infty} (\mu(A_N)). \end{aligned}$$

## Példa

A második állításnál lényeges, hogy legyen legalább egy véges mértékű halmaz a sorozatban.

Ha  $A_n = (n, \infty)$ , és mondjuk  $\mu$  a számosságmérték vagy az 1-dimenziós Lebesgue-mérték vagy a konstans  $\infty$  mérték, akkor  $\mu(\bigcap A_n) = \mu(\emptyset) = 0$ , de  $\mu(A_n) = \infty \rightarrow 0$ .

## 6. Lebesgue-mérték

A Lebesgue-féle külső mérték, kétféle ekvivalens definíció. Monotonitás. Kompakt halmazok és Jordan-mérhető halmazok külső mértéke. Egybevágóság és hasonlóság hatása.  $\sigma$ -szubadditivitás. A belső mérték lehetséges definíciója. Mérhetőség. A Lebesgue-mérhető halmazok  $\sigma$ -algebrát alkotnak, és ezen  $\bar{\lambda}$  mérték (bizonyítás nélkül). A Jordan-mérhető halmazok Lebesgue-mérhetőek is (bizonyítás nélkül). Nullmértékű halmazok.  $\mathbb{R}^p$ -ben. Minden pozitív külső mértékű halmaz tartalmaz nem mérhető részhalmazt. [Petruska, 69–70, 81–82. o.]

### Definíció (Lebesgue-féle külső mérték)

Bármely  $A \subset \mathbb{R}^p$  halmaz *Lebesgue-féle külső mértéke*

$$\bar{\lambda}(A) = \inf \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} t(R_k) : R_1, R_2, \dots \text{ tengelypárhuzamos téglák, } A \subset \bigcup_{k=1}^{\infty} R_k. \right\}.$$

Változatok:

- csak nyílt téglák
- csak  $[a_1, b_1) \times \dots \times [a_p, b_p)$  alakú félig nyílt téglák
- bármilyen téglák

Ezek ugyanazt az infimumot adják, mert bármilyen fedésben megnövelhetjük a téglákat úgy, hogy már az előírt osztályba tartozzanak, és az  $i$ -edik téglá mértékét legfeljebb  $\frac{\varepsilon}{2^i}$ -vel, összesen legfeljebb  $\varepsilon$ -nal növeljük meg.

### Definíció (Lebesgue-féle külső mérték, alternatív definíció)

Bármely  $A \subset \mathbb{R}^p$  halmaz *Lebesgue-féle külső mértéke*

$$\bar{\lambda}(A) = \inf \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} t(M_k) : M_1, M_2, \dots \in \mathcal{J}(\mathbb{R}^p), A \subset \bigcup_{k=1}^{\infty} M_k. \right\}.$$

### Állítás

A kétféle definíció tényleg ugyanaz.

**Bizonyítás.** Legyen  $A \subset \mathbb{R}^p$  tetszőleges, és a kétféle infimum

$$r = \inf \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} t(R_k) : R_1, R_2, \dots \text{ tengelypárhuzamos téglák, } A \subset \bigcup_{k=1}^{\infty} R_k. \right\}$$

$$m = \inf \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} t(M_k) : M_1, M_2, \dots \in \mathcal{J}(\mathbb{R}^p), A \subset \bigcup_{k=1}^{\infty} M_k. \right\}.$$

Bizonyítás arra, hogy  $m \leq r$ : ha  $r = \infty$ , akkor **triviális** 🙄; mostantól  $r$  véges.

Vegyünk egy tetszőleges  $\varepsilon > 0$ -t. Ehhez van az  $A$ -nak olyan  $\bigcup R_k$  fedése téglákkal, amelyekre  $\sum t(R_k) < r + \varepsilon$ .

Minden téglát Jordan-mérhető, így ugyanez az összeg szerepel a második halmazban is. Ezért

$$m \leq \sum t(R_k) < r + \varepsilon.$$

Most a  $\varepsilon \rightarrow +0$  határátmenetből  $m \leq r$ .

Bizonyítás arra, hogy  $r \leq m$ : ha  $m = \infty$ , akkor **triviális** 🙄; mostantól  $m$  véges.

Vegyünk egy tetszőleges  $\varepsilon > 0$ -t. Ehhez van az  $A$ -nak olyan  $\bigcup M_k$  fedése Jordan-mérhető halmazokkal, amelyekre  $\sum t(M_k) < m + \varepsilon$ .

Minden egyes  $M_k$  Jordan-mérhető halmazt lefedhetünk néhány téglával, mondjuk  $R_{k,1}, \dots, R_{k,n_k}$ -val úgy, hogy  $t(R_{k,1}) + \dots + t(R_{k,n_k}) < t(M_k) + \frac{\varepsilon}{2^k}$  legyen. Az összes ilyen téglát együttesen lefedi  $A$ -t, ezért

$$r \leq \sum_{k=1}^{\infty} \left( \sum_{i=1}^{n_k} t(R_{k,i}) \right) \leq \sum_{k=1}^{\infty} \left( t(M_k) + \frac{\varepsilon}{2^k} \right) = \sum_{k=1}^{\infty} t(M_k) + \varepsilon < (m + \varepsilon) + \varepsilon.$$

Ismét  $\varepsilon \rightarrow +0$ -ból  $r \leq m$ .

### Tétel

- $\bar{\lambda}(\emptyset) = 0$ .
- $\bar{\lambda}$  monoton.
- $\bar{\lambda}$  egybevágóságinvariáns.
- $\bar{\lambda}(c \cdot A) = |c|^p \cdot \bar{\lambda}(A)$ .
- Ha  $M \in \text{Hom}(\mathbb{R}^p, \mathbb{R}^p)$  lineáris transzformáció, akkor  $\bar{\lambda}(M(A)) = |\det M| \cdot \bar{\lambda}(A)$ .
- A  $\bar{\lambda}$  függvény szubadditív.
- A  $\bar{\lambda}$  függvény  $\sigma$ -szubadditív.

## Bizonyítás.

- Az üres fedés is fedi az üres halmazt.
- Ha  $A \subset B$ , akkor  $B$  minden fedése  $A$ -nak is fedése, ezért  $\bar{\lambda}(A)$  egy bővebb halmaz infimuma.
- Ha  $A \subset \mathbb{R}^p$  és  $B \subset \mathbb{R}^p$  egybevágó, és azt a definíciót használjuk, amikor Jordan-mérhető hamazokkal fedünk, akkor a fedések is egybevágók.
- Ugyanez volt a képlet téglákra.
- Ugyanez volt a képlet Jordan-mérhető fedő halmazokra.
- A szubadditivitás következik a  $\sigma$ -szubadditivitásból.
- Állítás: a  $\bar{\lambda}$  függvény  $\sigma$ -szubadditív.

– Tegyük fel, hogy  $B \subset \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n$ ; az kell, hogy  $\bar{\lambda}(B) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \bar{\lambda}(A_n)$ .

– Ha valamelyik  $\bar{\lambda}(A_n) = \infty$  akkor az állítás **triviális** 🙈.

– Vegyünk egy tetszőleges  $\varepsilon > 0$ -t.

– Mindegyik  $A_n$ -et fedjük le  $R_{n1}, R_{n2}, \dots$  téglákkal úgy, hogy  $\sum_{k=1}^{\infty} t(R_{nk}) < \bar{\lambda}(A_n) + \frac{\varepsilon}{2^n}$ .

– A fedések együtt lefedik  $B$ -t:

$$B \subset \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n \subset \bigcup_{n=1}^{\infty} \left( \bigcup_{k=1}^{\infty} R_{nk} \right)$$

ezért a  $\bar{\lambda}(B)$  definíciójából

$$\bar{\lambda}(B) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \left( \sum_{k=1}^{\infty} t(R_{nk}) \right) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \left( \bar{\lambda}(A_n) + \frac{\varepsilon}{2^n} \right) = \sum_{n=1}^{\infty} \bar{\lambda}(A_n) + \varepsilon.$$

– Az  $\varepsilon \rightarrow +0$  határátmenetből kapjuk, hogy

$$\bar{\lambda}(B) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \bar{\lambda}(A_n).$$

## Tétel

- $\bar{\lambda} \leq \bar{t}$ .
- Ha  $K$  kompakt, akkor  $\bar{\lambda}(K) = \bar{t}(K)$ .
- Ha  $A$  Jordan-mérhető, akkor  $\bar{\lambda}(A) = t(A)$ .

### Bizonyítás.

- A külső Jordan-mérték definíciójában a véges fedéseket kiegészíthetjük végtelen sok üres halmazzal.
- Ha  $K$  kompakt, akkor vegyük a külső Lebesgue- és a külső Jordan-mértéknek azt a definícióját, amikor nyílt téglákkal fedünk. Minden fedésből kiválasztható véges fedés, ezért a  $K$  külső Lebesgue- és a külső Jordan-mértéke ugyanaz.
- Ha  $A$  Jordan-mérhető, akkor

$$0 \leq \bar{\lambda}(\partial A) \leq \bar{t}(\partial A) = 0, \quad \text{tehát} \quad \bar{\lambda}(\partial A) = 0,$$

$$t(A) = \bar{t}(\text{cl } A) = \bar{\lambda}(\text{cl } A) \leq \bar{\lambda}(A) + \bar{\lambda}(\partial A) = \bar{\lambda}(A) \leq \bar{t}(A) = t(A).$$

## Lebesgue-mérhetőség

### Definíció (Lebesgue-féle belső mérték)

A Lebesgue-féle belső mérték lehetne akár ez is: ha  $A \subset [0, 1]^p$ , akkor

$$\underline{\lambda}(A) = 1 - \bar{\lambda}([0, 1]^p \setminus A)$$

Általában

$$\underline{\lambda}(A) = \sum_{(a_1, \dots, a_p) \in \mathbb{Z}^p} \left( 1 - \bar{\lambda}([a_1, a_1 + 1) \times \dots \times [a_p, a_p + 1) \setminus A) \right)$$

(V.ö. Ha  $J$  Jordan-mérhető és  $A \subset J$ , akkor  $\underline{t}(A) = t(J) - \bar{t}(J \setminus A)$ .)



## Megjegyzés

A mérhetőséget a külső és a belső mértékek egyenlőségével is lehetne definiálni, de inkább mélyen hallgatni fogunk a belső mértékről. A mérhetőség definíciójához csak a külső mértéket fogjuk használni.

## Definíció (Lebesgue-mérhetőség)

$A \subset \mathbb{R}^p$  *Lebesgue-mérhető*, ha bármely  $H \subset \mathbb{R}^p$  esetén

$$\bar{\lambda}(H) = \bar{\lambda}(H \cap A) + \bar{\lambda}(H \setminus A).$$

(A szubadditivitás miatt  $\leq$  automatikus; a kérdés az, hogy  $=$  vagy  $<$ .)

## Feladat

Jó gyakorlat bebizonyítani, hogy bármely *korlátos*  $A \subset \mathbb{R}^p$  halmaz akkor és csak akkor Jordan-mérhető, ha bármely *korlátos*  $H \subset \mathbb{R}^p$  halmaz esetén  $\bar{t}(H) = \bar{t}(H \cap A) + \bar{t}(H \setminus A)$ .

## Tétel

A Lebesgue-mérhető halmazok  $\sigma$ -algebrát alkotnak, és ezen a külső Lebesgue-mérték  $\sigma$ -additív. (Bizonyítás a következő fejezetben).

A Lebesgue-mérhető halmazok  $\sigma$ -algebráját  $\mathcal{L}$  vagy  $\mathcal{L}_p$  jelöli; magát a mértéket  $\lambda(\dots)$  vagy  $\lambda_p(\dots)$ .

## Tétel

- Minden Jordan-mérhető halmaz egyben Lebesgue-mérhető is, tehát a Lebesgue-mérték tényleg kiterjesztése a Jordan-mértéknek. (Bizonyítás a következő fejezetben).
- Minden Borel-halmaz Lebesgue-mérhető, tehát  $\mathcal{B} \subset \mathcal{L}$ .

## Nullmértékű halmazok

### Definíció (nullmértékű halmaz)

$A \subset \mathbb{R}^p$  *nullmértékű* vagy *Lebesgue-nullmértékű*, ha  $\bar{\lambda}(A) = 0$ .

### Tétel

Minden nullmértékű halmaz mérhető.

**Bizonyítás.** Ha  $N$  nullmértékű, vagyis  $\bar{\lambda}(N) = 0$  és  $H \subset \mathbb{R}^p$  tetszőleges, akkor

$$\bar{\lambda}(H) \leq \bar{\lambda}(H \cap N) + \bar{\lambda}(H \setminus N) \leq \bar{\lambda}(H) + \bar{\lambda}(N) = \bar{\lambda}(H),$$

tehát  $N$  jól vágja ketté a  $H$  halmazt.

### Tétel

A nullmértékű halmazok  $\mathcal{N}$  rendszere egy  $\sigma$ -ideál:

- $\emptyset \in \mathcal{N}$ ;
- $\mathcal{N}$  minden elemének minden részhalmaza is  $\mathcal{N}$ -beli;
- $\mathcal{N}$  zárt a megszámlálható unióra.

### Tétel

$\mathcal{B} \neq \mathcal{L}$ .

**Bizonyítás.** Vegyünk egy kontinuum számosságú, nullmértékű halmazt, például a Cantor-halmazt. Ennek minden részhalmaza nullmértékű, tehát Lebesgue-mérhető. De ilyen részhalmazból  $2^c = 2^{2^{\aleph_0}}$  van; több, mint Borel-halmaz összesen.

**Példa.**  $\mathbb{Q}$  Lebesgue-mérhető, de nem Jordan-mérhető.

6. előadás, 2023.03.16.

### Tétel

Minden pozitív külső mértékű halmaz tartalmaz nem mérhető halmazt.

**Bizonyítás.** (A Vitali-konstrukció módosítása)

Ha  $A$  nem mérhető, akkor ő maga egy saját nem mérhető részhalmaza.

Legyen  $A \in \mathcal{L}$  pozitív mértékű és mérhető. Feltehető, hogy  $A$  korlátos, mert ha  $A$ -nak minden korlátos részhalmaza nullmértékű, akkor minden  $n$ -re  $B(0, n) \cap A$  is, így a mérték folytonossága miatt  $\lambda(A \cap \mathbb{R}^p) = \lambda(A) = 0$ . Így  $A$ -nak van pozitív mértékű korlátos részhalmaza.

Legyen  $V \subset A$  olyan, hogy  $\mathbb{Q}^p$  eltoltjából legfeljebb egy elemet tartalmaz, és akkor nem tartalmaz belőle elemet, ha  $A$  diszjunkt attól az eltolt halmaztól. (Más szóval, minden  $r \in \mathbb{R}^p$  vektorra, ha a  $(\mathbb{Q}^p + r) \cap A$  metszet nem üres,

akkor kiválasztunk belőle egyetlen elemet.) Ekkor létezik  $Q^p$ -nek olyan korlátos  $Q$  részhalmaza, hogy  $V + Q$  lefedti  $A$ -t és  $Q$  végtelen.

Ha  $V$  mérhető, és  $\lambda(V) > 0$ , akkor  $\lambda(V+Q) = \infty$ , ami nem lehet, mert korlátos halmazok összege korlátos, és  $\lambda$  monotonitása miatt minden korlátos halmaz véges mértékű.

Ha  $\lambda(V + Q) = 0$ , akkor  $\lambda(A) = 0$ , ami szintén nem lehet. Így  $V \notin \mathcal{L}$ .

## 7. Relatív külső mértékek

Relatív külső mértékből származtó külső mérték. Nemnegatív halmazfüggvényhez asszociált külső mérték. A mérhető halmazok. A mérhető halmazok  $\sigma$ -algebrát alkotnak. A Lebesgue-mérhető halmazok  $\sigma$ -algebrát alkotnak. [Petruska, 61–63. o.]

### Definíció (relatív külső mérték)

Legyen  $X \neq \emptyset$  tetszőleges alaphalmaz,  $\mathcal{A} \subset \mathcal{P}(X)$ ,  $\emptyset \in \mathcal{A}$  és  $\varphi : \mathcal{A} \rightarrow [0, \infty]$ .

- A  $\varphi$  függvény *relatív külső mérték*, ha  $\sigma$ -szubadditív és  $\varphi(\emptyset) = 0$ .
- Ha  $\varphi$  relatív külső mérték és  $\mathcal{A} = \mathcal{P}(X)$ , akkor  $\varphi$  *külső mérték*.

### Példák

- $\mathcal{A} = \mathcal{P}(X)$ ,  $\varphi(H) = \begin{cases} 1 & \text{ha } H \neq \emptyset \\ 0 & \text{ha } H = \emptyset \end{cases}$ ,
- $\mathcal{A}$  a Jordan-mérhető halmazok gyűrűje,  $\varphi$  a Jordan-térfogat. (Ehhez szükség van arra, hogy a Jordan-térfogat  $\sigma$ -szubadditív.)

### Trivialitás

Minden relatív külső mérték monoton és szubadditív.

**Bizonyítás.** Ha  $\varphi$  relatív külső mérték,  $A, B_1, \dots, B_n \in \mathcal{M}$  és  $A \subset B_1 \cup \dots \cup B_n$ , akkor

$$A \subset B_1 \cup \dots \cup B_n \cup \emptyset \cup \emptyset \dots,$$

a  $\sigma$ -szubadditivitás miatt

$$\varphi(A) \leq \varphi(B_1) + \dots + \varphi(B_n) + \underbrace{\varphi(\emptyset) + \varphi(\emptyset) + \dots}_0,$$

tehát  $\varphi$  végesen szubadditív.

Az  $n = 1$  esetben ez éppen a monotonitás.

### Állítás

Minden mérték relatív külső mérték.

**Bizonyítás.** Legyen  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  mértéktér,  $H, A_1, A_2, \dots \in \mathcal{M}$ , hogy  $H \subset \bigcup A_k$ .  
A  $B_1 = A_1, B_n = A_n \setminus (A_1 \cup \dots \cup A_{n-1})$  halmazokkal

$$\mu(H) \leq \mu\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n\right) = \mu\left(\bigsqcup_{n=1}^{\infty} B_n\right) = \sum_{n=1}^{\infty} \mu(B_n) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \mu(A_n).$$

### Definíció (asszociált külső mérték)

Tegyük fel hogy  $X \neq \emptyset$  tetszőleges alaphalmaz,  $\mathcal{A} \subset \mathcal{P}(X)$ ,  $\emptyset \in \mathcal{A}$ , és  $\alpha : \mathcal{A} \rightarrow [0, \infty]$  olyan, hogy  $\alpha(\emptyset) = 0$ .

Legyen  $H \subset X$  esetén

$$\varphi_{\alpha}(H) = \inf \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} \alpha(A_k) : A_k \in \mathcal{A}, H \subset \bigcup_{k=1}^{\infty} A_k \right\};$$

ha  $H$  nem fedhető le megszámlálható sok  $\mathcal{A}$ -beli halmazzal, akkor  $\varphi_{\alpha}(H) = \infty$  (mert  $\inf \emptyset = +\infty$ ).

Az így definiált  $\varphi_{\alpha} : \mathcal{P}(X) \rightarrow [0, \infty]$  függvény *az  $\alpha$ -hoz asszociált külső mérték*.

### Példák

- $\mathcal{A} = \mathcal{P}(X)$ ,  $\alpha(H) = \begin{cases} 1 & \text{ha } H \neq \emptyset \\ 0 & \text{ha } H = \emptyset \end{cases}$ . Ekkor  $\varphi_{\alpha} = \alpha$ .
- $\mathcal{A}$  a  $p$ -dimenziós téglák rendszere, és  $\alpha$  a térfogat. Ekkor  $\varphi_{\alpha}$  a külső Lebesgue-mérték.
- $\mathcal{A}$  a Jordan-mérhető halmazok gyűrűje,  $\alpha$  a Jordan-térfogat. Ekkor is  $\varphi_{\alpha}$  a külső Lebesgue-mérték.

### Állítás

$\varphi_{\alpha}$  külső mérték.

**Bizonyítás.**  $\varphi_{\alpha}(\emptyset) = 0$  **triviális** 🙄; a  $\sigma$ -szubadditivitást kell bizonyítani.

Tegyük fel, hogy  $H, F_1, F_2, \dots \subset X$  és  $H \subset \bigcup_{n=1}^{\infty} F_n$ ; Azt kell ellenőriznünk, hogy

$$\varphi_{\alpha}(H) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_{\alpha}(F_n).$$

Ha  $\sum_{n=1}^{\infty} \varphi_{\alpha}(F_n) = \infty$ , akkor az egyenlőtlenség **triviális** 🙄; a továbbiakban felteesszük, hogy  $\sum_{n=1}^{\infty} \varphi_{\alpha}(F_n)$  véges, ekkor persze mindegyik  $\varphi_{\alpha}(F_n)$  véges.

Vegyünk egy tetszőleges  $\varepsilon > 0$ -t. Mindegyik  $F_n$ -et fedjük le  $\mathcal{A}$ -beli halmazokkal  $\frac{\varepsilon}{2^n}$  pontossággal, vagyis vegyünk olyan  $A_{n1}, A_{n2}, A_{n3}, \dots \in \mathcal{A}$  halmazokat, amelyekre  $F_n \subset \bigcup_{k=1}^{\infty} A_{nk}$  és  $\sum_{k=1}^{\infty} \alpha(A_{nk}) < \varphi_{\alpha}(F_n) + \frac{\varepsilon}{2^n}$ . Az  $A_{nk}$  halmazok együttesen a  $H$ -t is lefedik, ezért

$$\varphi_{\alpha}(H) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \left( \sum_{k=1}^{\infty} \alpha(A_{nk}) \right) < \sum_{n=1}^{\infty} \left( \varphi_{\alpha}(F_n) + \frac{\varepsilon}{2^n} \right) = \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_{\alpha}(F_n) + \varepsilon.$$

A  $\varepsilon \rightarrow +0$  határátmenettel kész vagyunk.

### 7.1 Lemma

Ha  $\varphi$  relatív külső mérték valamilyen  $\mathcal{B} \supset \mathcal{A}$  halmazrendszeren, amire  $A \in \mathcal{A}$  esetén  $\varphi(A) \leq \alpha(A)$ , akkor bármely  $H \in \mathcal{B}$  halmazra  $\varphi(H) \leq \varphi_{\alpha}(H)$ .  
Vagyis, az  $\alpha$ -nál nem nagyobb relatív külső mértékek között  $\varphi_{\alpha}$  maximális.

**Bizonyítás.** Vegyünk egy tetszőleges  $H \in \mathcal{B}$  halmazt; azt kell igazolnunk, hogy  $\varphi(H) \leq \varphi_{\alpha}(H)$ . Ha  $\varphi_{\alpha}(H) = \infty$ , akkor ez **triviális** 🙄. A továbbiakban feltesszük, hogy  $\varphi_{\alpha}(H)$  véges.

Bármely  $\varepsilon$ -hoz vannak olyan  $A_1, A_2, \dots \in \mathcal{A}$  halmazok, hogy  $H \subset \bigcup A_n$  és  $\sum \alpha(A_n) < \varphi_{\alpha}(H) + \varepsilon$ ; ekkor

$$\varphi(H) \stackrel{\varphi \text{ } \sigma\text{-szubadd.}}{\leq} \sum \varphi(A_n) \stackrel{\varphi \leq \alpha}{\leq} \sum \alpha(A_n) < \varphi_{\alpha}(H) + \varepsilon;$$

Az  $\varepsilon \rightarrow +0$  határátmenttel megapjuk, hogy  $\varphi(H) \leq \varphi_{\alpha}(H)$

### Példák

Az előbbi példákban az asszociált külső mértékek: ő maga, illetve a külső Lebesgue-mérték.

### Definíció (Külső mérték szerint mérhető halmaz)

Legyen  $\varphi$  külső mérték az  $X$  alaphalmazon. Az  $A \subset X$  halmaz  $\varphi$  szerint *mérhető* vagy  $\varphi$ -*mérhető* vagy csak *mérhető*, ha


$$\forall H \subset X \quad \varphi(H) = \varphi(H \cap A) + \varphi(H \setminus A).$$

A  $\varphi$ -mérhető halmazok rendszere  $\mathcal{M}_{\varphi}$ .

## Megjegyzés

A szubadditivitás miatt elég azt előírni, hogy

$$\varphi(H) \geq \varphi(H \cap A) + \varphi(H \setminus A).$$

Ez **triviális**  akkor, ha  $\varphi(H) = \infty$ , tehát elég véges külső mértékű  $H$ -ra ellenőrizni.

## Tétel

- A fenti jelölésekkel  $\mathcal{M}_\varphi$   $\sigma$ -algebra, és  $(X, \mathcal{M}_\varphi, \varphi|_{\mathcal{M}_\varphi})$  mértéktér.
- Sőt, tetszőleges  $Y \subset X$  halmazra  $\varphi$  mérték az  $\mathcal{M}_\varphi|_Y$   $\sigma$ -algebrán is.

**Bizonyítás.** *1. állítás: Az  $X$  és  $\emptyset$  mérhető, avagy  $X, \emptyset \in \mathcal{M}_\varphi$ .*

Bármely  $H \subset X$  halmazra

$$\begin{aligned}\varphi(H \cap \emptyset) + \varphi(H \setminus \emptyset) &= \varphi(\emptyset) + \varphi(H) = 0 + \varphi(H) = \varphi(H); \\ \varphi(H \cap X) + \varphi(H \setminus X) &= \varphi(H) + \varphi(\emptyset) = \varphi(H) + 0 = \varphi(H).\end{aligned}$$

(Most használtuk, hogy  $\varphi(\emptyset) = 0$ .)

*2. állítás: Az  $\mathcal{M}_\varphi$  algebra, azaz ha  $A, B$  mérhető, akkor  $A \cup B$ ,  $A \cap B$  és  $A \setminus B$  is mérhető.*

Legyen  $H \subset X$  tetszőleges; azt akarjuk ellenőrizni, hogy a  $H$ -t az  $A \cup B$ , az  $A \cap B$  és az  $A \setminus B$  is jól vágja ketté.

Az  $A, B$  halmazok a  $H$ -t négy részre osztják:  $H = H_0 \cup H_a \cup H_b \cup H_{ab}$  (az indexek azt jelzik, hogy az adott részhalmaz az  $A$  és  $B$  közül melyiknek része:  $H_0 = H \setminus (A \cup B)$ ,  $H_a = (H \cap A) \setminus B$ ,  $H_b = (H \cap B) \setminus A$ ,  $H_{ab} = H \cap A \cap B$ ). Az  $A$  és  $B$  mérhetősége miatt

$$\begin{aligned}\varphi(H) &= \varphi(H \cap A) + \varphi(H \setminus A) = \\ &= \left( \varphi((H \cap A) \cap B) + \varphi((H \cap A) \setminus B) \right) + \left( \varphi((H \setminus A) \cap B) + \varphi((H \setminus A) \setminus B) \right) = \\ &= \left( \varphi(H_{ab}) + \varphi(H_a) \right) + \left( \varphi(H_b) + \varphi(H_0) \right).\end{aligned}$$

Átcsoportosítva és a szubaditivitást felhasználva

$$\begin{aligned}
 \varphi(H) &\leq \varphi(H \cap (A \cup B)) + \varphi(H \setminus (A \cup B)) \leq \\
 &\leq \left( \varphi(H_{ab}) + \varphi(H_a) + \varphi(H_b) \right) + \varphi(H_0) = \varphi(H); \\
 \varphi(H) &\leq \varphi(H \cap (A \cap B)) + \varphi(H \setminus (A \cap B)) \leq \\
 &\leq \varphi(H_{ab}) + \left( \varphi(H_a) + \varphi(H_b) + \varphi(H_0) \right) = \varphi(H); \\
 \varphi(H) &\leq \varphi(H \cap (A \setminus B)) + \varphi(H \setminus (A \setminus B)) \leq \\
 &\leq \varphi(H_a) + \left( \varphi(H_b) + \varphi(H_{ab}) + \varphi(H_0) \right) = \varphi(H).
 \end{aligned}$$

Látjuk, hogy mindenhol egyenlőség van, tehát  $A \cup B$ ,  $A \cap B$  és  $A \setminus B$  is jól vágja ketté a  $H$  halmazt.

*3. állítás: Bármely  $Y \subset X$  esetén  $\varphi$  additív  $\mathcal{M}_\varphi|_Y$ -n.*

Ha  $A, B$  mérhető, és  $A \cap Y$  és  $B \cap Y$  diszjunktak, akkor  $A$ -val vágjuk ketté az  $(A \cup B) \cap Y$  halmazt:

$$\varphi((A \cup B) \cap Y) = \varphi(((A \cup B) \cap Y) \cap A) + \varphi(((A \cup B) \cap Y) \setminus A) = \varphi(A \cap Y) + \varphi(B \cap Y).$$

Indukcióval akárhány halmazra is igaz.

*4. állítás:  $\mathcal{M}_\varphi$   $\sigma$ -algebra.*

A megszámlálható sok halmaz unióját kicserélhetjük páronként diszjunkt halmazok uniójára: legyen  $B_i = A_i \setminus \bigcup_{j < i} A_j$ , ekkor  $\bigcup_{i=1}^{\infty} A_i = \bigsqcup_{i=1}^{\infty} B_i$ .

Legyen  $U_n = B_1 \sqcup \dots \sqcup B_n$  és  $U_\infty = \bigsqcup_{i=1}^{\infty} B_i = \bigcup_{i=1}^{\infty} A_i$ ; azt akarjuk igazolni, hogy  $U_\infty$  mérhető.

$$\begin{aligned}
 \varphi(H) &\stackrel{U_n \text{ mérhető}}{=} \varphi(H \cap U_n) + \varphi(H \setminus U_n) \stackrel{\varphi \text{ monoton}}{\geq} \varphi(H \cap U_n) + \varphi(H \setminus U_\infty) \stackrel{U_n = \sqcup B_i}{=} \\
 &= \varphi\left(\bigsqcup_{i=1}^n (H \cap B_i)\right) + \varphi(H \setminus U_\infty) \stackrel{\varphi \text{ additív } \mathcal{M}_\varphi|_{H-n}}{=} \sum_{i=1}^n \varphi(H \cap B_i) + \varphi(H \setminus U_\infty).
 \end{aligned}$$

Most  $n \rightarrow \infty$ , majd  $\sigma$ -szubaditivás:

$$\begin{aligned}
 \varphi(H) &\geq \sum_{i=1}^{\infty} \varphi(H \cap B_i) + \varphi(H \setminus U_\infty) \stackrel{\varphi \text{ } \sigma\text{-szubaditív}}{\geq} \\
 &\geq \varphi\left(\bigsqcup_{i=1}^{\infty} (H \cap B_i)\right) + \varphi(H \setminus U_\infty) = \varphi(H \cap U_\infty) + \varphi(H \setminus U_\infty).
 \end{aligned}$$

Tehát  $U_\infty$  jól vágja ketté  $H$ -t.



5. állítás:  $\varphi$   $\sigma$ -additív  $\mathcal{M}_\varphi|_Y$ -n.

Tegyük fel, hogy  $A_1, A_2, \dots \in \mathcal{M}_\varphi$ , és az  $A_i \cap Y$  halmazok diszjunktak.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \varphi(A_i \cap Y) &\stackrel{\varphi \text{ additív } \mathcal{M}_\varphi|_Y\text{-on}}{=} \varphi\left(\bigsqcup_{i=1}^n (A_i \cap Y)\right) \stackrel{\varphi \text{ monoton}}{\leq} \\ &\leq \varphi\left(\bigsqcup_{i=1}^{\infty} (A_i \cap Y)\right) \stackrel{\sigma\text{-szubadditív}}{\leq} \sum_{i=1}^{\infty} \varphi(A_i \cap Y). \end{aligned}$$

Most  $n \rightarrow \infty$ :

$$\sum_{i=1}^{\infty} \varphi(A_i \cap Y) \leq \varphi\left(\bigsqcup_{i=1}^{\infty} (A_i \cap Y)\right) \leq \sum_{i=1}^{\infty} \varphi(A_i \cap Y).$$

Tehát  $\varphi\left(\bigsqcup_{i=1}^{\infty} (A_i \cap Y)\right) = \sum_{i=1}^{\infty} \varphi(A_i \cap Y)$ .

## 8. Teljes mértékterek

### Definíció (nullmértékű halmaz)

Legyen  $\varphi$  külső mérték az  $X$  alaphalmazon. Az  $N \subset X$  halmaz  $\varphi$ -*nullmértékű*, ha  $\varphi(N) = 0$ .

### Állítás

A  $\varphi$ -nullmértékű halmazok  $\varphi$ -mérhetőek, avagy  $\varphi(N) = 0$  esetén  $N \in \mathcal{M}_\varphi$ .

**Bizonyítás.** Bármely  $H \subset X$ -re

$$\varphi(H \cap N) + \varphi(H \setminus N) \leq 0 + \varphi(H).$$

### Definíció (teljes mértéktér)

Az  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  mértéktér *teljes*, ha a  $\mu$ -nullmértékű halmazok részhalmazai is mérhetőek, tehát bármely  $N \in \mathcal{M}$ ,  $\mu(N) = 0$ ,  $Z \subset N$ , esetén  $Z \in \mathcal{M}$ . (A monotonitás miatt **triviális** 🤖, hogy  $\mu(Z) = 0$ .)

### Következmény

Bármely  $Y \subset X$  halmazra  $(Y, \mathcal{M}_\varphi|_Y, \varphi|_{\mathcal{M}_\varphi|_Y})$  teljes mértéktér.

## Következmény

A Lebesgue-mérhető halmazok  $\sigma$ -algebrát alkotnak, és ezen a  $\bar{\lambda}$  egy teljes mérték.

7. előadás, 2023.03.21.

## Tétel

Minden mértéktér teljessé tehető, vagyis:

Ha  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  mértéktér, akkor

- létezik egy egyértelmű minimális  $\mathcal{M}^* \subset \mathcal{P}(X)$   $\sigma$ -algebra
- és egy szintén egyértelmű  $\mu^* : \mathcal{M}^* \rightarrow [0, \infty]$  mérték
- úgy hogy  $\mathcal{M} \subset \mathcal{M}^*$ ,  $\mu|_{\mathcal{M}} = \mu$  és  $(X, \mathcal{M}^*, \mu^*)$  teljes.

**Bizonyítás. 1.** Legyen

$$\mathcal{M}^* = \{A = M \cup Z : M \in \mathcal{M}; \exists N \in \mathcal{M} \mu(N) = 0, Z \subset N\},$$

tehát azon  $A$ -k halmaza, amelyek előállnak mint egy  $M$  mérhető halmaz plusz valami, nullmértékű halmazzal lefedhető "zaj". Az ilyen  $A$  halmazoknak mindenképpen benne kell lennie a keresett  $\sigma$ -algebrában.

A bizonyítás során  $M, M_i$  mindig mérhető,  $N$  és  $N_i$  nullmértékű mérhető,  $Z$  és  $Z_i$  az  $N$ , illetve az  $N_i$  valamilyen részhalmazát fogja jelenteni,  $A = M \cup Z$ , és  $A_i = M_i \cup Z_i$ .

A  $\mathcal{M}^*$  rendszer egy  $\sigma$ -algebra, mert

- $\emptyset, X \in \mathcal{M} \subset \mathcal{M}^*$ ;
- zárt a komplementumképzésre:  $X \setminus (M \cup Z) = (X \setminus (M \cup N)) \cup (N \setminus M \setminus Z) \in \mathcal{M}^*$ ;
- zárt a megszámlálható unióra: ha  $M_1, M_2, \dots \in \mathcal{M}$  mérhető,  $N_1, N_2, \dots \in \mathcal{M}$  nullmértékűek, és  $Z_i \subset N_i$ , akkor  $\bigcup (M_i \cup Z_i) = \left( \bigcup M_i \right) \cup \left( \bigcup Z_i \right) \in \mathcal{M}^*$ ; itt  $\bigcup M_i$  mérhető, és  $\bigcup Z_i$  része a nullmértékű  $\bigcup N_i$ -nek.

**2.** Legyen  $\mu^*(M \cup Z) = \mu(M)$ ; csak ez a függvény lehetséges, mert

$$\mu(M) = \mu^*(M) \leq \mu^*(M \cup Z) \leq \mu^*(M \cup N) \leq \mu^*(M) + \mu^*(N) = \mu(M) + \mu(N) = \mu(M).$$

Szükséges az, hogy ez az érték jóldefiniált legyen. Legyen  $A \in \mathcal{M}^*$ ,  $M_1, N_1, Z_1$  és  $M_2, N_2, Z_2$  a definíció szerinti halmazok, hogy  $M_1 \cup Z_1 = M_2 \cup Z_2 = A$ . Ekkor

$$M_1 \setminus M_2 \subset A \setminus M_2 \subset Z_2 \subset N_2, \quad \text{ezért} \quad \mu(M_1 \setminus M_2) = 0;$$

$$M_1 \cap M_2 \subset M_1 = (M_1 \cap M_2) \sqcup (M_1 \setminus M_2)$$

$$\mu(M_1 \cap M_2) \leq \mu(M_1) \leq \mu(M_1 \cap M_2) + \underbrace{\mu(M_1 \setminus M_2)}_0,$$

amiből  $\mu(M_1) = \mu(M_1 \cap M_2)$ .

Ugyanígy,  $\mu(M_2) = \mu(M_1 \cap M_2)$ , tehát  $\mu(M_1) = \mu(M_2)$ .

**3.** A  $\mu^*$  függvény  $\sigma$ -additív: Legyenek  $A_1 = M_1 \cup Z_1, A_2 = M_2 \cup Z_2, \dots \in \mathcal{M}^*$  páronként diszjunkt halmazok, ahol  $M_i \in \mathcal{M}$  és  $Z_i$  lefedhető valamilyen  $N_i \in \mathcal{M}$  nullmértékű halmazzal. Az  $\bigcup Z_i$  halmazt lefedi a nullmértékű  $\bigcup N_i$ , ezért

$$\mu^*\left(\bigsqcup A_i\right) = \mu^*\left(\left(\bigsqcup M_i\right) \cup \left(\bigcup Z_i\right)\right) = \mu\left(\bigsqcup M_i\right) = \sum \mu(M_i) = \sum \mu^*(A_i).$$

Most már tudjuk, hogy  $(X, \mathcal{M}^*, \mu^*)$  mértéktér.

**4.** A  $(X, \mathcal{M}^*, \mu^*)$  mértéktér teljes: Tegyük fel, hogy  $A = M \cup Z \in \mathcal{M}^*$  és  $\mu^*(A) = 0$ , tehát  $A$  egy  $\mu^*$ -nullmértékű halmaz, és  $B \subset A$ . Az kell, hogy  $B \in \mathcal{M}^*$ .

Vegyük észre, hogy  $\mu(M) = \mu^*(A) = 0$ , tehát  $B$  felírható  $B = \emptyset \cup B$  alakban, ahol  $\emptyset \in \mathcal{M}$  és  $B$  lefedhető a  $\mu$ -nullmértékű  $(M \cup N)$  halmazzal, tehát  $B \in \mathcal{M}^*$ .

## 9. A mértékkiterjesztési tétel

Félgyűrűn additív relatív külső mérték kiterjeszhető a generált gyűrűre. Példa arra, hogy a kiterjesztés nem mindig egyértelmű. Mértékkiterjesztési tétel. A kiterjesztés egyértelműsége  $\sigma$  térben. [Petruska, 64-66. o.]

### Kérdés

- Igaz-e, hogy  $\mathbb{R}^p$ -ben minden Jordan-mérhető halmaz Lebesgue-mérhető, és a Lebesgue-mértékük ugyanaz, mint a Jordan-mértékük?
- Általában, igaz-e, hogy ha  $\alpha$  relatív külső mérték az  $\mathcal{A}$  rendszeren, akkor  $\mathcal{A}$  elemei mérhetőek  $\varphi_\alpha$  szerint, vagyis  $\mathcal{A} \subset \mathcal{M}_{\varphi_\alpha}$ , és bármely  $A \in \mathcal{A}$  halmazra  $\varphi_\alpha(A) = \alpha(A)$ ?

Az, hogy  $\varphi_\alpha(A) = \alpha(A)$ , következik abból, hogy az  $\alpha$  függvény relatív külső mérték.

### Példa

- $\mathcal{A} = \mathcal{P}(X)$ ,  $\alpha(H) = \begin{cases} 1 & \text{ha } H \neq \emptyset \\ 0 & \text{ha } H = \emptyset, \end{cases}$
- $\varphi_\alpha = \alpha$ .
- Ha  $a \in A$  és  $b \notin A$ , akkor
  - $A$  rosszul vágja ketté a  $H = \{a, b\}$  halmazt:
$$\alpha(H) = 1, \quad \alpha(H \cap A) + \alpha(H \setminus A) = 1 + 1.$$
  - Az alaphalmazt is rosszul vágja ketté:
$$\alpha(X) = 1, \quad \alpha(X \cap A) + \alpha(X \setminus A) = 1 + 1.$$
- Csak  $\emptyset$  és  $X$  mérhető.
- Hiányzik az additivitás.
- *Kössük ki, hogy  $\alpha$  additív a  $\mathcal{A}$  rendszeren.*

## Példa

$X = \mathbb{R}$ ,  $\mathcal{A} = \{\emptyset\} \cup \{(c, \infty) : c \in \mathbb{R}\}$ ,  $\alpha(\emptyset) = 0$ ;  $\alpha((c, \infty)) = 1$ .

•

$$\varphi_\alpha(A) = \begin{cases} 0 & \text{ha } A = \emptyset \\ 1 & \text{ha } A \neq \emptyset, \text{ de alulról korlátos} \\ \infty & \text{ha } A \text{ nem korlátos alulról} \end{cases}$$

- Ha  $a \in A$  és  $b \in X \setminus A$ , akkor  $A$  rosszul vágja ketté a  $H = \{a, b\}$  halmazt:

$$\varphi_\alpha(H) = 1, \quad \varphi_\alpha(H \cap A) + \varphi_\alpha(H \setminus A) = 1 + 1.$$

- Most is csak két mérhető halmaz van.
- Az additivitás igaz, csak semmitmondó: nincsenek nemüres, diszjunkt halmazaink.
- Van additivitás, de az  $\mathcal{A}$  halmazrendszer túl sovány.
- *Ki fogjuk kötni, hogy a fedésre használt  $\mathcal{A}$  halmazrendszer félgyűrű, és ezen az  $\alpha$  függvény additív.*

## Tétel

Legyen  $\mathcal{A} \subset \mathcal{P}(X)$  félgyűrű,  $\alpha : \mathcal{A} \rightarrow [0, \infty]$ ,

- $\alpha$  relatív külső mérték, továbbá
- $\alpha$  még additív is.

Ekkor  $\mathcal{A} \subset \mathcal{M}_{\varphi_\alpha}$  és  $\varphi_\alpha|_{\mathcal{A}} = \alpha$ , vagyis

- Minden  $\mathcal{A}$ -beli halmaz mérhető  $\varphi_\alpha$  szerint, és
- Bármely  $A \in \mathcal{A}$  halmazra  $\varphi_\alpha(A) = \alpha(A)$ .

**Bizonyítás.** A  $\sigma$ -szubbadditivitás miatt **triviális** 🙄, hogy  $\varphi_\alpha|_{\mathcal{A}} = \alpha$ ; azt kell igazolni, hogy minden  $A \in \mathcal{A}$  mérhető. Legyen tehát  $A \in \mathcal{A}$  és  $H \subset X$  tetszőleges; a célunk  $\varphi_\alpha(H \cap A) + \varphi_\alpha(H \setminus A) \leq \varphi_\alpha(H)$ . Ha  $\varphi_\alpha(H) = \infty$ , akkor ez **triviális** 🙄; feltehetjük tehát, hogy  $\varphi_\alpha(H)$  véges.

Vegyünk egy tetszőleges  $\varepsilon$ -t, és ehhez olyan  $B_1, B_2 \dots \in \mathcal{A}$  halmazokat, amelyek úgy fedik  $H$ -t, hogy  $\sum \alpha(B_n) < \varphi_\alpha(H) + \varepsilon$ .

Mindegyik  $B_n$ -re  $B_n \cap A \in \mathcal{A}$ , és a  $B_n \setminus A$  halmaz felbomlik páronként diszjunkt  $C_{n1}, \dots, C_{n,k_n} \in \mathcal{A}$  elemek uniójára:  $B_n = (B_n \cap A) \sqcup \underbrace{C_{n1} \sqcup \dots \sqcup C_{n,k_n}}_{B_n \setminus A}$ . Az additivitás miatt

$$\begin{aligned} \alpha(B_n \cap A) + \sum_{i=1}^{k_n} \alpha(C_{ni}) &\stackrel{\alpha \text{ additív}}{=} \alpha(B_n), \\ \varphi_\alpha(H \cap A) &\stackrel{\varphi_\alpha \text{ def}}{\leq} \sum_{n=1}^{\infty} \alpha(B_n \cap A), \\ \varphi_\alpha(H \setminus A) &\stackrel{\varphi_\alpha \text{ } \sigma\text{-szubadd}}{\leq} \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_\alpha(B_n \setminus A) \stackrel{\varphi_\alpha \text{ def}}{\leq} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \sum_{i=1}^{k_n} \alpha(C_{ni}) + \alpha(\emptyset) + \alpha(\emptyset) + \dots \right), \\ \varphi_\alpha(H \cap A) + \varphi_\alpha(H \setminus A) &\leq \sum_{n=1}^{\infty} \left( \alpha(B_n \cap A) + \sum_{i=1}^{k_n} \alpha(C_{ni}) \right) = \sum_{n=1}^{\infty} \alpha(B_n) < \varphi_\alpha(H) + \varepsilon. \end{aligned}$$

Végül  $\varepsilon \rightarrow 0$  és kész.

### Kérdés

A fenti tétel kiterjeszti az  $\alpha$  halmazfüggvényt mértékként egy, az  $\mathcal{A}$ -t tartalmazó  $\sigma$ -algebrára. Igaz-e, hogy a kiterjesztés egyértelmű?

Általában nem igaz:

### Példa

Álljon  $\mathcal{A}$  az  $\mathbb{R}$  félig nyílt intervallumaiból, és legyen  $\alpha(A) = \infty$  ha  $A$  nem üres. Ekkor  $\alpha$  kiterjeszthető a  $\mathcal{P}(\mathbb{R})$  halmazrendszerre, de a kiterjesztés nem egyértelmű. Lehetséges kiterjesztés például a konstans  $\infty$  és a számlálómérték is.

Viszont ha az  $\alpha$  nem túl nagy, az egész tér felbomlik megszámlálható sok, véges mértékű darabra (mint ahogy  $\mathbb{R}^p$  felbomlik megszámlálható sok korlátos téglára), akkor már a kiterjesztés egyértelmű.

## Definíció ( $\sigma$ -végeesség)

- Legyen  $X$  tetszőleges alaphalmaz,  $\mathcal{A} \subset \mathcal{P}(X)$  és  $\alpha : \mathcal{A} \rightarrow [0, \infty]$  relatív külső mérték. Azt mondjuk, hogy a  $H \subset X$  halmaz  $\sigma$ -véges az  $\alpha$  szerint, ha léteznek olyan  $A_1, A_2, \dots \in \mathcal{A}$  halmazok, amelyekre mindegyik  $\alpha(A_n)$  véges, és

$$H \subseteq \bigcup_{k=1}^{\infty} A_k.$$

- Az  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  mértéktér, illetve a  $\mu$  mérték  $\sigma$ -véges, ha  $X$  a  $\mu$  szerint  $\sigma$ -véges, avagy felbontató megszámlálható sok véges mértékű halmazra.

## Példák

- $\mathbb{R}^p$   $\sigma$ -véges a Jordan-mérték szerint.
- $\mathbb{R}$  nem  $\sigma$ -véges a számosság-mérték szerint. A számosság-mérték szerint  $\sigma$ -véges halmazok a megszámlálható halmazok.

## 9.1 Tétel

Legyen  $\mathcal{A} \subset \mathcal{P}(X)$  félgyűrű,  $\alpha : \mathcal{A} \rightarrow [0, \infty]$  relatív külső mérték, ami még additív is, és tegyük fel, hogy  $X$   $\sigma$ -véges.

Ekkor bármely  $\mathcal{M}$  olyan  $\sigma$ -algebrára, amelyre  $\mathcal{A} \subset \mathcal{M} \subset \mathcal{M}_{\varphi_{\alpha}}$ , az  $\alpha$  egyértelműen terjeszthető ki  $\mathcal{M}$ -re, azaz ha  $\mu$  mérték  $\mathcal{M}$ -en és  $\mu|_{\mathcal{A}} = \alpha$ , akkor  $\mu = \varphi_{\alpha}|_{\mathcal{M}}$ .

**Bizonyítás.** Az  $X$  olyan  $A_1, A_2, \dots \in \mathcal{A}$  halmazok uniója, amelyekre minden  $\alpha(A_n)$  véges. A ?? lemma miatt ezeket kicserélhetjük olyan, páronként diszjunkt  $B_1, B_2, \dots \in \mathcal{A}$  halmazokra, amelyek uniója szintén  $X$ , és mindegyik  $B_k$  részhalmaza valamelyik  $A_n$ -nek, így  $\alpha(B_k) \leq \alpha(A_n) < \infty$ .

A 7 lemma miatt  $\mu \leq \varphi_{\alpha}$ , így bármely  $H \in \mathcal{M}$  halmazra

$$\alpha(B_n) = \mu(B_n) = \mu(B_n \cap H) + \mu(B_n \setminus H) \leq \varphi_{\alpha}(B_n \cap H) + \varphi_{\alpha}(B_n \setminus H) = \varphi_{\alpha}(B_n) = \alpha(B_n),$$

és itt minden véges volt, tehát például  $\mu(H \cap B_n) = \varphi_{\alpha}(H \cap B_n)$ . Összegezve

$$\mu(H) = \sum_{n=1}^{\infty} \mu(H \cap B_n) = \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_{\alpha}(H \cap B_n) = \varphi_{\alpha}(H).$$

**Következmény (Caratheodory-féle mértékkiterjesztési tétel  
(Κωνσταντίνος Καραθεοδωρή, 1873–1950))**

Legyen  $X$  tetszőleges alaphalmaz,  $\mathcal{A}$  félgűrű  $\mathcal{P}(X)$ -en,  $\alpha : \mathcal{A} \rightarrow [0, \infty]$  additív és  $\sigma$ -szubadditív és  $\alpha(\emptyset) = 0$ . Ekkor

- Az  $\alpha$  függvény kiterjeszhető az  $\mathcal{A}$  által generált  $\sigma$ -algebrán mértékké.
- Ha  $X$   $\sigma$ -véges, akkor a kiterjesztés egyértelmű.

## A Lebesgue-mérték befejezése

Az előbbi tételeket alkalmazhatjuk a Jordan-mérhető halmazok gyűrűjére vagy a  $[a_1, b_1) \times \dots \times [a_p, b_p)$  alakú félig nyílt téglák félgűrűjére.

### Lemma

- Minden dimenzióban, a félig nyílt téglák félgűrűjén a Jordan-mérték additív relatív külső mérték.
- Minden dimenzióban, a Jordan-mérhető halmazok gyűrűjén a Jordan-térfogat additív relatív külső mérték.

**Bizonyítás.** A Jordan-mérték additivitását tudjuk.

Tegyük fel, hogy  $A, B_1, B_2, \dots \in \mathcal{J}(\mathbb{R}^p)$  és  $A \subset \bigcup_{i=1}^{\infty} B_i$ ; a  $\sigma$ -szubadditivitáshoz

azt akarjuk igazolni, hogy  $t(A) \leq \sum_{i=1}^{\infty} t(B_i)$ .

Vegyünk egy tetszőleges  $\varepsilon > 0$ -t. Elég finom kockázással az  $A$  belső kockái egy olyan  $K \subset A$  kompakthalmazt alkotnak, amelyre  $t(K) > t(A) - \varepsilon$ . Mindegyik  $B_i$ -hez vegyük a tér egy kellően finom kockázását úgy, hogy a fedő kockák összterfogaata kisebb legyen, mint  $t(B_i) + \frac{\varepsilon}{2^i}$ . A fedő kockákat kicsit meghízvalva kaphatunk olyan  $G_i$  Jordan-mérhető nyílt halmazt, amelyre  $B_i \subset G_i$  és  $t(G_i) < t(B_i) + 2\frac{\varepsilon}{2^i}$ .

A kompaktság miatt a  $K$  halmazt véges sok  $G_i$ , mondjuk az első  $n$  darab is lefedi. Ezek után a Jordan-mérték szubadditivitása miatt

$$t(A) - \varepsilon < t(K) \leq t(G_1 \cup \dots \cup G_n) \leq \sum_{i=1}^n t(G_i) < \sum_{i=1}^n \left( t(B_i) + 2\frac{\varepsilon}{2^i} \right) < \sum_{i=1}^{\infty} t(B_i) + 2\varepsilon.$$

Most  $\varepsilon \rightarrow +0$ -ból  $t(A) \leq \sum_{i=1}^{\infty} t(B_i)$ .

Téglákra a bizonyítás ugyanez, de egyszerűbb:  $A, B_1, B_2, \dots$  félig nyílt téglák;



az  $A$ -t egy nála kisebb  $K$  zárt téglára cseréljük, a  $B_i$  halmazt pedig egy nála bővebb nyílt téglára.

### Következmény

- $\mathcal{J}_p \subset \mathcal{L}_p$ , avagy a Jordan-mérhető halmazok Lebesgue-mérhetőek is.
- $\mathcal{B}(\mathbb{R}^p) \subset \mathcal{L}_p$ , avagy minden Borel-halmaz Lebesgue-mérhető. (A félig nyílt téglák Borel-halmazok, és generálják  $\mathcal{B}(\mathbb{R}^p)$ -t.)
- $t_p = \lambda_p|_{\mathcal{J}_p}$ , vagyis a Lebesgue-mérték a Jordan-mérték kiterjesztése.
- A Lebesgue-mérték teljes.
- A  $\mathcal{L}_p$   $\sigma$ -algebrán a Lebesgue-mérték az egyetlen pozitív, normált, eltolásinvariáns mérték.
- Az  $\mathbb{R}^p$ -n a Lebesgue-mérték az egyetlen pozitív, normált, eltolásinvariáns Borel-mérték.

# 10. Lebesgue–Stieltjes mértékek 1-dimenzióban

Lokálisan véges 1-dimenziós Borel-mérték eloszlásfüggvénye. Az eloszlásfüggvény balról folytonos. A különböző típusú intervallumok mértékének kifejezése az eloszlásfüggvénnyel. Additív intervallumfüggvények. Megengedett végpontok. Egydimenziós Lebesgue–Stieltjes mértékek. Minden lokálisan véges Borel-mérték egy Lebesgue–Stieltjes mérték megszorítása a Borel-mérhető halmazokra. [Petruska, 69–75. o.]

Most egy darabig egy  $I \subset \mathbb{R}$  nyílt intervallum lesz a világ (az  $I$  lehet félegyenes vagy az egész  $\mathbb{R}$  is), és a  $(I, \mathcal{B}(I), \mu)$  lokálisan véges Borel-mértékeket vizsgáljuk.

## Definíció (Borel-mérték)

Ha  $X$  topologikus tér,  $\mu : \mathcal{B}(X) \rightarrow [0, \infty]$  mérték, akkor az  $(X, \mathcal{B}, \mu)$  egy *Borel-mértéktér* és  $\mu$  egy *Borel-mérték*.

Vannak, akik a  $\mathcal{B}(X)$ -nél bővebb  $\sigma$ -algebrákon értelmezett mértékeket is "Borel-mértéknek" nevezik.

## Definíció (lokálisan véges Borel-mérték)

Az  $(\mathbb{R}^p, \mathcal{B}(\mathbb{R}^p), \mu)$  mértéktér *lokálisan véges*, ha

(a) Minden pontnak van véges mértékű környezete, azaz

$$\forall a \in \mathbb{R}^p \quad \exists r > 0 \quad B(a, r) \subset \mathbb{R}^p, \quad \mu(B(a, r)) < \infty;$$

(b) Minden kompakt  $K \subset \mathbb{R}^p$  halmaz mértéke véges.

Ez a kettő ekvívens; (b)  $\implies$  (a) **triviális** 🙄, mert minden pontnak van kompakt környezete; (a)  $\implies$  (b) azért, mert  $K$  minden pontja körül vehetünk egy-egy véges mértékű környezetet, és a kompaktság miatt ezek közül véges sok is fedi  $K$ -t.

## Definíció (intervallumfüggvény eloszlásfüggvénye)

Legyen  $\mathcal{A} = \{\emptyset\} \cup \{[a, b) : a, b \in I, a < b\}$  és  $\alpha : \mathcal{A} \rightarrow \mathbb{R}$  vagy  $\alpha : \mathcal{A} \rightarrow \mathbb{C}$ .

Az  $F : I \rightarrow \mathbb{R}$  függvény az  $\alpha$  halmazfüggvénynek *eloszlásfüggvénye*, ha bármely  $[a, b)$  esetén

$$\alpha([a, b)) = F(b) - F(a).$$

**Lemma**

- Az  $\alpha$ -nak akkor és csak akkor létezik eloszlásfüggvénye, ha additív.
- Speciálisan, minden lokálisan véges mértéknek létezik eloszlásfüggvénye.

**Bizonyítás.**

- $\Rightarrow$ : Ha van eloszlásfüggvény, és  $[x_0, x_1] \sqcup [x_1, x_2] \sqcup \dots \sqcup [x_{n-1}, x_n] = [x_0, x_n]$ , akkor

$$\sum_{i=1}^n \alpha([x_{i-1}, x_i]) = \sum_{i=1}^n (F(x_i) - F(x_{i-1})) = F(x_n) - F(x_0) = \alpha([x_0, x_n]).$$

- $\Leftarrow$ : Ha  $\alpha$  additív, akkor válasszunk egy  $x_0 \in I$  kezdőpontot, és legyen

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{ha } x = x_0 \\ \alpha([x_0, x]) & \text{ha } x > x_0 \\ -\alpha([x, x_0]) & \text{ha } x < x_0. \end{cases}$$

- Ha  $a < b < x_0$ , akkor  $\alpha([a, b]) = \alpha([a, x_0]) - \alpha([b, x_0]) = (-F(a)) - (-F(b))$ .
- Ha  $a < x_0 \leq b$ , akkor  $\alpha([a, b]) = \alpha([a, x_0]) + \alpha([x_0, b]) = (-F(a)) + F(b)$ .
- Ha  $x_0 \leq a < b$ , akkor  $\alpha([a, b]) = \alpha([x_0, b]) - \alpha([x_0, a]) = F(b) - F(a)$ .

**Lemma**

- Ha  $F$  a  $(I, \mathcal{B}(I), \mu)$  mértéknek eloszlásfüggvénye, akkor  $F$  monoton nő és balról folytonos.
- A további intervallumtípusok mértéke  $F$ -fel kifejezve

$$\begin{aligned} \mu([a, b]) &= F(b+0) - F(a) = F(b+0) - F(a-0), & \text{speciálisan} \\ \mu(\{a\}) &= F(a+0) - F(a) = F(a+0) - F(a-0); \\ \mu((a, b)) &= F(b) - F(a+0) = F(b-0) - F(a+0), \\ \mu((a, b]) &= F(b+0) - F(a+0). \end{aligned}$$

**Bizonyítás.**

- Bármely  $a < b$  esetén  $F(b) - F(a) = \mu([a, b]) \geq 0$ , tehát  $F(a) \leq F(b)$ .
- Bármely  $x_n \nearrow a$  sorozatra, az  $[x_n, a)$  intervallumok metszete  $\emptyset$ . A mérték folytonossága miatt

$$0 = \mu(\emptyset) = \mu\left(\bigcap [x_n, a)\right) = \lim \mu([x_n, a)) = \lim (F(a) - F(x_n)) = F(a) - F(a-0),$$

tehát  $F(a-0) = F(a)$ .

- Bármely  $x_n \searrow a$  sorozatra az  $[a, x_n)$  intervallumok metszete az  $\{a\}$  pont.

$$\mu(\{a\}) = \mu\left(\bigcap [a, x_n)\right) = \lim \mu([a, x_n)) = \lim (F(x_n) - F(a)) = F(a+0) - F(a).$$

- $\mu([a, b]) = \mu([a, b)) + \mu(\{b\}) = (F(b) - F(a)) + (F(b+0) - F(b)) = F(b+0) - F(a)$ .
- $\mu((a, b)) = \mu([a, b)) - \mu(\{a\}) = (F(b) - F(a)) - (F(a+0) - F(a)) = F(b) - F(a+0)$ .

### Kérdés (Megfordítás?)

Van egy monoton növekvő  $F : I \rightarrow \mathbb{R}$  függvényünk. Létezik-e olyan  $\mu$  Borel-mérték, amelynek  $F$  eloszlásfüggvénye?

- A megfordítás ezek után olyasmi lenne, hogy kapunk egy monoton növekvő  $F : I \rightarrow \mathbb{R}$  függvényt, a megváltozásából készítünk egy additív intervallumfüggvényt, és ezt az additív függvényt kiterjesztjük mértékké. Ha  $F$  nem minden pontban folytonos balról, akkor baj van. Ezen többféleképpen segíthetünk. Két fontos lehetőséget érdemes megemlíteni:
  - Kiköthetjük, hogy csak balról folytonos  $F$ -et engedünk meg. Vagy:
  - Az intervallumaink  $\mathcal{A}$  félgyűrűjében nem engedünk meg minden végpontot.
    - \* Csak az olyan végpontokat engedjük meg, ahol  $F$  balról folytonos. Vagy:
    - \* Csak az olyan végpontokat engedjük meg, ahol  $F$  folytonos.
  - Szerencsére egy monoton függvénynek legfeljebb csak megszámlálható sok szakadási pontja lehet (mert minden szakadásnál átugrik racionális számokat, és egy racionális számot legfeljebb csak egyszer ugorhat át), tehát  $F$  folytonossági pontjai sűrűn vannak  $I$ -ben.

- Mostantól kezdve  $F : I \rightarrow \mathbb{R}$  monoton növő.
- $V \subset I$  egy sűrű halmaz (a megengedett Végpontok halmaza).
- A  $V$  minden pontjában  $F$  balról folytonos.
- $\mathcal{A} = \{\emptyset\} \cup \{[a, b) : a, b \in V, a < b\}$  (ami félgyűrű),
- $\alpha(\emptyset) = 0$  és  $\alpha([a, b)) = F(b) - F(a)$ .

## Lemma

Legyen  $F : I \rightarrow \mathbb{R}$  monoton növe,  $V \subset I$  sűrű halmaz úgy, hogy  $V$  minden pontjában  $F$  balról folytonos,

$\mathcal{A} = \{\emptyset\} \cup \{[a, b) : a, b \in V, a < b\}$  a félig nyílt intervallumok félgűrűje,  $\alpha(\emptyset) = 0$  és  $\alpha([a, b)) = F(b) - F(a)$ .

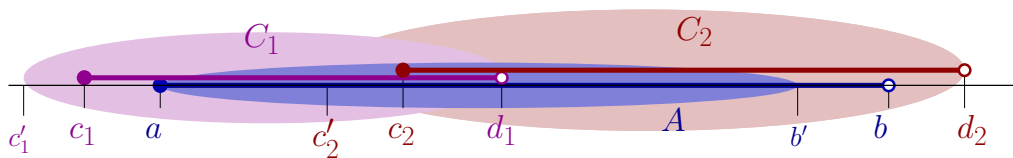
Ekkor az  $\alpha$  halmazfüggvény additív relatív külső mérték.

### Bizonyítás.

- Az trivi, hogy  $\alpha$  additív.
- Megmutatjuk, hogy  $\alpha$  szubadditív. Tegyük fel, hogy az  $A = [a, b)$  intervallumot lefedik a  $C_i = [c_i, d_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) intervallumok; az kell, hogy  $\alpha(A) \leq \sum_{i=1}^n \alpha(C_i)$ .
- Az  $A$  intervallumot a  $c_i, d_i$  pontok kis félig nyílt intervallumokra osztják:  $A = A_1 \sqcup \dots \sqcup A_k$ .
- Minden  $j = 1, 2, \dots, k$ -ra legyen  $\chi(i, j) = 1$ , ha  $A_j \subset C_i$ ; egyébként  $A_j \cap C_i = \emptyset$  és  $\chi(i, j) = 0$ .

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \alpha(C_i) &\geq \sum_{i=1}^n \alpha(C_i \cap A) = \sum_{i=1}^n \alpha\left(C_i \cap \bigsqcup_{j=1}^k A_j\right) = \sum_{i=1}^n \alpha\left(\bigsqcup_{j=1}^k (C_i \cap A_j)\right) = \\ &= \sum_{i=1}^n \left(\sum_{\substack{j=1 \\ A_j \text{ vagy } \emptyset}}^k \alpha(C_i \cap A_j)\right) = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^k \chi(i, j) \cdot \alpha(A_j)\right) = \\ &= \sum_{j=1}^k \left(\sum_{i=1}^n \chi(i, j)\right) \cdot \alpha(A_j) \geq \sum_{j=1}^k 1 \cdot \alpha(A_j) = \alpha(A). \end{aligned}$$

- Most megmutatjuk, hogy  $\alpha$   $\sigma$ -szubadditív.
- Tegyük fel, hogy az  $A = [a, b) \in \mathcal{A}$  intervallumot lefedik a  $C_i = [c_i, d_i) \in \mathcal{A}$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) intervallumok; azt kell igazolnunk, hogy  $\alpha(A) \leq \sum_{i=1}^{\infty} \alpha(C_i)$ .
- Terv: Az  $A = [a, b)$  halmazt egy picit kisebb, de kompakt  $[a, b']$  intervallumra szűkítjük, a  $C_i = [c_i, d_i)$  fedő halmazokat pedig picit bővebb  $(c'_i, d_i)$ , nyílt intervallumokra. Utána a kompaktság miatt véges sok  $C_i$  is lefed, és működik a szubadditivitás.



- Vegyünk egy  $\varepsilon > 0$ -t.
- A  $b' \in A \cap V$  megengedett végpontot úgy választjuk, hogy  $\alpha([a, b']) > \alpha([a, b]) - \varepsilon$ , vagyis  $F(b') > F(b) - \varepsilon$ ; ilyen  $b'$  létezik, mert  $F$  balról folytonos  $b$ -ben.
- A  $c'_i < c_i$  megengedett végpontot úgy választjuk, hogy  $\alpha([c'_i, d_i]) < \alpha([c_i, d_i]) + \frac{\varepsilon}{2^i}$ , vagyis  $F(c'_i) > F(c_i) - \frac{\varepsilon}{2^i}$ ; ilyen  $C'_i$  is létezik.
- Tudjuk, hogy

$$[a, b'] \subset [a, b] \subset \bigcup_{i=1}^{\infty} [c_i, d_i] \subset \bigcup_{i=1}^{\infty} (c'_i, d_i).$$

- az  $[a, b']$  intervallum kompakt, ezért lefedi az unióból véges sok nyílt  $(c'_i, d_i)$  is, mondjuk az első  $n$  darab.

$$[a, b'] \subset [a, b] \subset \bigcup_{i=1}^n (c'_i, d_i) \subset \bigcup_{i=1}^n [c'_i, d_i].$$

$$\alpha(A) - \varepsilon < \alpha([a, b']) \leq \sum_{i=1}^n \alpha([c'_i, d_i]) < \sum_{i=1}^n \left( \alpha(C_i) + \frac{\varepsilon}{2^i} \right) < \sum_{i=1}^{\infty} \alpha(C_i) + \varepsilon.$$

- Végül  $\varepsilon \rightarrow 0$ , kész.

## Következmény

Az  $\alpha$  additív és relatív külső mérték,  $I$   $\sigma$ -véges, és az  $\mathcal{A}$  által generált  $\sigma$ -algebra  $\mathcal{B}(I)$ , ezért a mértékkiterjesztési tétel szerint  $\alpha$  egyértelműen kiterjeszthető Borel-mértékké  $I$ -n.

## Definíció

- A  $\varphi_\alpha$  külső mértéket az  $F$  megváltozásából származó Lebesgue–Stieltjes külső mértéknek hívjuk. (Thomas Joannes Stieltjes 1856–1894)
- A  $\varphi_\alpha$  szerint mérhető halmazokra megszorítva ez az ( $F$  megváltozásából származó) Lebesgue–Stieltjes mérték.
- A Lebesgue–Stieltjes mértékterek teljeseek.

### Tétel

Bármely monoton növekvő  $F : I \rightarrow \mathbb{R}$  függvény megváltozása indukál egy lokálisan véges Lebesgue–Stieltjes mértéket, amelyre nézve minden Borel-halmaz mérhető.

### Tétel

Minden lokálisan véges Borel-mérték egy Lebesgue–Stieltjes mérték megszorítása a Borel-halmazokra.



# 11. Lebesgue–Stieltjes mértékek véges dimenzióban

Additív téglafüggvény. Eloszlásfüggvény. Folytonossági hipersík. A folytonossági hipersíkok halmaza megszámlálható. Lebesgue–Stieltjes mérték véges dimenzióban. [Petruska, 69–72. o.]

## Additív intervallumfüggvények

Most a világ egy nyílt  $G \subset \mathbb{R}^p$  halmaz lesz. *Téglának* vagy *intervallumnak* az  $[a_1, b_1) \times \dots \times [a_p, b_p)$  alakú félig nyílt szorzatokat fogjuk nevezni, amelyeknek *a lezártja is része  $G$ -nek*, vagyis elég kis  $\varepsilon > 0$  esetén  $(a_1 - \varepsilon, b_1 + \varepsilon) \times \dots \times (a_p - \varepsilon, b_p + \varepsilon) \subset G$ . A téglák félgűrűjét jelöljük mondjuk  $\mathcal{T}$ -vel.

A téglák félgűrűjén legyen  $\alpha$  egy additív, nemnegatív, véges függvény,  $\alpha : \mathcal{T} \rightarrow [0, \infty)$ . Ezt az *additív intervallumfüggvényt* szeretnénk kiterjeszteni mértékké.

## Eloszlásfüggvény?

Tegyük fel, hogy  $\alpha : \mathcal{T} \rightarrow [0, \infty)$  véges, additív függvény. (Kiköthetjük, hogy  $\alpha(\emptyset) = 0$ , de ez az additivitásból következik.) Milyen  $G \rightarrow \mathbb{R}$  függvényt nevezhetnénk " $\alpha$  eloszlásfüggvénynek"?

2-dimenzióban azt várjuk el, hogy bármely  $[a, b) \times [c, d)$  téglára

$$\alpha([a, b) \times [c, d)) = F(b, d) - F(a, d) - F(b, c) + F(a, c),$$

általában pedig bármely  $T = \prod_{i=1}^p [a_i, b_i)$  téglára

$$\alpha(T) = \sum_{\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_p \in \{0,1\}} (-1)^{\varepsilon_1 + \dots + \varepsilon_p} F\left(\left\{ \begin{array}{ll} b_1 & \text{ha } \varepsilon_1 = 1 \\ a_1 & \text{ha } \varepsilon_1 = 0 \end{array} \right\}, \dots, \left\{ \begin{array}{ll} b_p & \text{ha } \varepsilon_p = 1 \\ a_p & \text{ha } \varepsilon_p = 0 \end{array} \right\}\right),$$

tehát a téglá minden csúcsában vesszük az eloszlásfüggvény értékét, ezeknek sakk-táblaszerűen pozitív és negatív előjeleket adunk (a legfelső csúcs előjele pozitív), és összeadjuk.

Ha  $G$  vagy  $\alpha$  elég szép, mondjuk  $G$  az egész tér, akkor tudunk az additív téglafüggvényünkből viszonylag szép, pl. minden koordinátában monoton eloszlásfüggvényt készíteni. Például, ha  $\alpha$  a Jordan-térfogat, akkor  $F(\mathbf{x}) = x_1 \dots x_p$  egy jó eloszlásfüggvény. Ha  $G = \mathbb{R}^p$  és  $\alpha$  tetszőleges, akkor lehet  $F(\mathbf{x}) = \pm \alpha([0, x_1) \times$

$\dots \times [0, x_p])$ ), ahol a negatív  $x_i$  esetén  $[0, x_i)$  helyett az  $[x_i, 0)$  intervallumot vesszük, és az előjel attól függ, hogy az  $x_1, \dots, x_p$  koordináták között hány negatív van.

Ha viszont  $G$  bonyolult, akkor ... ööö ...

## Folytonossági hipersíkok

Inkább nem is fogunk eloszlásfüggvényekkel bíbelődni, csak veszünk egy véges, additív  $\alpha : \mathcal{T} \rightarrow [0, \infty)$  téglafüggvényt, és az eloszlásfüggvény folytonossága helyett közvetlenül az  $\alpha$  "folytonosságát" fogjuk vizsgálni.

### Definíció (Folytonossági hipersík)

Az  $x_1 = c$  hipersík az  $\alpha : \mathcal{T} \rightarrow \mathbb{R}$  intervallumfüggvénynek *folytonossági hipersíkja*, ha minden olyan  $R_n \in \mathcal{T}$  csökkenő téglasorozatra, amelyre

$$R_n = [u_n, v_n) \times [a_2, b_2) \times \dots \times [a_p, b_p), \quad u_n \nearrow c \text{ és } v_n \searrow c,$$

teljesül, hogy  $\alpha(R_n) \rightarrow 0$ .

A többi kordinátatengelyre merőlegesen hasonlóan definiáljuk az  $x_2 = c, \dots, x_p = c$  alakú folytonossági hipersíkokat.

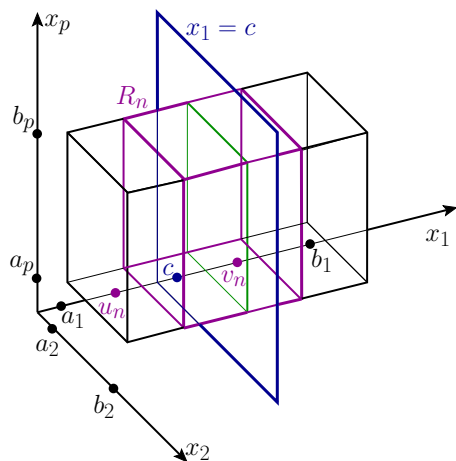
### Lemma

Megszámlálható sok kivétellel minden, a tengelyekkel párhuzamos hipersík folytonossági hipersík.

**Bizonyítás.** Nyilván elég az  $x_1 = c$  alakú síkokra.

Vizsgáljunk egy olyan *kivételes*  $c$ -t, amire  $x_1 = c$  *nem* folytonossági hipersík. A  $c$ -hez van egy  $R_n = [u_n, v_n) \times [a_2, b_2) \times \dots \times [a_p, b_p)$  csökkenő téglasorozat, amelyre  $\lim \alpha(R_n) > 0$ .

A  $(p - 1)$ -dimenziós  $[a_2, b_2) \times \dots \times [a_p, b_p)$  téglát kicsit meghízíthatjuk (ezzel a határérték nem csökken), így az  $a_2, b_2, \dots, a_p, b_p$  koordinátákat racionális számoknak is választhatjuk. Ezek után válasszunk olyan  $a_1 < c$  és  $b_1 > c$  racionális számokat is, amelyekre  $[a_1, b_1) \times \dots \times [a_p, b_p) \in \mathcal{T}$ .



Vizsgáljuk most az

$$f : [a_1, b_1] \rightarrow \mathbb{R}, \quad f(x) = \alpha\left([a_1, x] \times [a_2, b_2] \times \dots \times [a_p, b_p]\right)$$

monoton növő függvényt; erre

$$\begin{aligned} \alpha(R_n) &= \alpha([u_n, v_n] \times [a_2, b_2] \times \dots \times [a_p, b_p]) = \\ &= \alpha([a_1, v_n] \times [a_2, b_2] \times \dots \times [a_p, b_p]) \\ &\quad - \alpha([a_1, u_n] \times [a_2, b_2] \times \dots \times [a_p, b_p]) = \\ &= f(v_n) - f(u_n), \end{aligned}$$

így

$$\lim \alpha(R_n) = f(c+0) - f(c-0) > 0.$$

Végül válasszunk egy  $q \in (f(c-0), f(c+0))$  racionális számot, amelyet az  $f(x)$  függvény a  $c$  pontban átugrik. Ezzel minden kivételes  $c$ -hez rendeltünk egy racionális számokból álló  $(a_1, b_1, \dots, a_p, b_p, q)$ , sorozatot.

A sorozatból visszafelé következtetve az  $f(x)$  függvény egyértelműen meghatározott, és csak az  $x_1 = c$  pontban ugorja át a  $q$  értéket, tehát az  $(a_1, b_1, \dots, a_p, b_p, q)$  sorozat egyértelműen meghatározza  $c$ -t. Mivel racionális sorozatból csak megszámlálható sok van, így kivételes  $c$  értékből is.  $\square$

A nem folytonossági hipersíkokkal baj van, ezért ezeket a kivételes kordinát-értékeket nem fogjuk megengedni.

### Lemma

Legyen  $V \subset G$  az olyan  $(c_1, \dots, c_p)$  pontok halmaza, amelyekre mindegyik  $x_i = c_i$  sík folytonossági hipersíkja  $\alpha$ -nak, és legyen  $\mathcal{F}$  az olyan téglák félgyűrűje, amelyeknek minden csúcsa  $V$ -beli. Ekkor a  $\alpha$  függvény  $\sigma$ -szubadditív a  $\mathcal{F}$  félgyűrűn.

**Bizonyítás.** (Ugyanaz, mint az 1-dimenziós Lebesgue–Stieltjes mértéknél.)

- Először megmutatjuk, hogy  $\alpha$  szubadditív. Tegyük fel, hogy az  $A$  téglát lefedik a  $C_1, \dots, C_n$  téglák; az kell, hogy  $\alpha(A) \leq \sum_{i=1}^n \alpha(C_i)$ .
- Az  $A$  téglát a fedőtéglák lapsíkjai kisebb téglákra bontják:  $A = A_1 \sqcup \dots \sqcup A_k$ .
- Minden  $j = 1, 2, \dots, k$ -ra legyen  $\chi(i, j) = 1$ , ha  $A_j \subset C_i$ ; egyébként  $A_j \cap C_i = \emptyset$  és  $\chi(i, j) = 0$ .

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \alpha(C_i) &\geq \sum_{i=1}^n \alpha(C_i \cap A) = \sum_{i=1}^n \alpha\left(C_i \cap \bigsqcup_{j=1}^k A_j\right) = \sum_{i=1}^n \alpha\left(\bigsqcup_{j=1}^k (C_i \cap A_j)\right) = \\ &= \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^k \underbrace{\alpha(C_i \cap A_j)}_{A_j \text{ vagy } \emptyset}\right) = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^k \chi(i, j) \cdot \alpha(A_j)\right) = \\ &= \sum_{j=1}^k \left(\sum_{i=1}^n \chi(i, j)\right) \cdot \alpha(A_j) \geq \sum_{j=1}^k 1 \cdot \alpha(A_j) = \alpha(A). \end{aligned}$$

- Most megmutatjuk, hogy  $\alpha$   $\sigma$ -szubadditív.
- Tegyük fel, hogy az  $A \in \mathcal{A}$  téglát lefedik a  $C_1, C_2, \dots \in \mathcal{A}$  téglák; azt kell igazolnunk, hogy  $\alpha(A) \leq \sum_{i=1}^{\infty} \alpha(C_i)$ .
- Vegyünk egy  $\varepsilon > 0$ -t.
- Az  $A$  felső lapsíkjaiból befelé toljuk úgy, hogy a kapott  $A'$  téglára  $\text{cl } A' \subset A$ , és  $\alpha(A') > \alpha(A) - \varepsilon$  legyen. (Lehet, mert a lapsíkok folytonossági hipersíkok.)
- A  $C_i$  alsó lapsíkját lefelé (kifelé) toljuk úgy, hogy az így kapott  $C'_i$  téglára  $\text{int } C'_i \supset C_i$  és  $\alpha(C'_i) < \alpha(C_i) + \frac{\varepsilon}{2^i}$  legyen.

- Ezek után

$$\text{cl } A' \subset A \subset \bigcup_{i=1}^{\infty} C_i \subset \bigcup_{i=1}^{\infty} (\text{int } C'_i).$$

- A kompatság miatt valamilyen  $n$ -re

$$A' \subset \text{cl } A' \subset \bigcup_{i=1}^n (\text{int } C'_i) \subset \bigcup_{i=1}^n C'_i$$

$$\alpha(A) - \varepsilon < \alpha(A') \leq \sum_{i=1}^n \alpha(C'_i) < \sum_{i=1}^n \left(\alpha(C_i) + \frac{\varepsilon}{2^i}\right) < \sum_{i=1}^{\infty} \alpha(C_i) + \varepsilon.$$

- Végül  $\varepsilon \rightarrow 0$ , kész.

9. előadás, 2023.03.28.

### Következmény

Az  $\alpha$  additív és relatív külső mérték,  $G$   $\sigma$ -véges, és az  $\mathcal{A}$  által generált  $\sigma$ -algebra  $\mathcal{B}(G)$ , ezért a mértékkiterjesztési tétel szerint  $\alpha$  egyértelműen kiterjeszthető Borel-mértékké  $G$ -n.

### Definíció ( $p$ -dimenziós Lebesgue–Stieltjes mérték)

Legyen  $G \subset \mathbb{R}^p$  nyílt,  $\mathcal{T}$  azoknak a félig nyílt tégláknak a félgűrűje, amelyeknek a lezártja is része  $G$ -nek, és legyen  $\alpha : \mathcal{T} \rightarrow [0, \infty)$  additív.

Legyen  $V \subset G$  az olyan  $(c_1, \dots, c_p)$  pontok halmaza, amelyekre mindegyik  $x_i = c_i$  sík folytonossági hipersíkja  $\alpha$ -nak, és legyen  $\mathcal{F}$  az olyan téglák félgűrűje, amelyeknek minden csúcsa  $V$ -beli.

Az  $\alpha|_{\mathcal{F}}$ -hoz asszociált  $\varphi = \varphi_{\alpha|_{\mathcal{F}}}$  külső mértéket az  $\alpha$ -ból származó *Lebesgue–Stieltjes külső mérték*nek nevezzük.

A  $\varphi$ -mérhető halmazok  $\mathcal{M}$   $\sigma$ -algebrájára megszorítva,  $\mu = \varphi|_{\mathcal{M}}$  az  $\alpha$ -ból származó *Lebesgue–Stieltjes mérték*,  $(G, \mathcal{M}, \mu)$  a *Lebesgue–Stieltjes mérték-tér*.

Ha  $G = \mathbb{R}^p$  és  $\alpha$  a Jordan-terület, akkor speciális esetként a Lebesgue-mértéket kapjuk.

### Tétel

Minden lokálisan véges Borel-mérték egy Lebesgue–Stieltjes mérték megszorítása a Borel-halmazokra.

### Bizonyítás.

- Legyen  $\mu_0$  lokálisan véges Borel-mérték  $G$ -n, azaz  $\mathbb{R}^p$  Borel halmazain értelmezett mérték. Ezt szeretnénk Lebesgue–Stieltjes mértékként előállítani.
- Legyen  $\mathcal{T}$  a  $G$  belsejében fekvő, folytonossági hipersíkokkal határolt téglák félgűrűje. Ezen  $\mu_0|_{\mathcal{T}}$  egy additív,  $\sigma$ -szubadditív téglafüggvény.
- A  $G$  alaphalmaz  $\sigma$ -véges  $\mu_0|_{\mathcal{T}}$  szerint, mert felbontató megszámlálható sok folytonossági téglára uniójára.
- A mértékkiterjesztési tétel szerint  $\mu_0|_{\mathcal{T}}$  egyértelműen kiterjeszthető egy  $\mu$  Lebesgue–Stieltjes mértékké a téglák által generált  $\sigma$ -algebrára, vagyis a Borel-halmazokra.

- Az egyértelműség miatt  $\mu_0 = \mu$ .

# 12. Lokálisan véges Borel-mértékek regularitása

Mérhető halmaz közelítése nyílt, zárt, kompakt,  $G_\delta$  és  $F_\sigma$  halmazokkal. Regularitás. Mérhető halmazok "távolsága". Minden Lebesgue-mérhető halmazhoz van tetszőlegesen közeli halmaz, ami véges sok (racionális koordinátájú) téglalap uniója. [Petruska, 72–73. o.] [Petruska, 72–75., 59. o.]

## Tétel

Legyen  $X \subset \mathbb{R}^p$  nyílt,  $\mathcal{M} \subset \mathcal{P}(X)$   $\sigma$ -algebra  $X$ -en, amely tartalmazza  $\mathcal{B}(X)$ -et, és  $\mu$  lokálisan véges mérték  $\mathcal{M}$ -en.

(Speciális esetek:  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  Lebesgue–Stieltjes mértéktér, vagy éppen az  $(\mathbb{R}^p, \mathcal{L}, \lambda)$  Lebesgue-mértéktér, esetleg  $(\mathbb{R}^p, \mathcal{B}, \lambda)$ .)

Ekkor tetszőleges  $H \in \mathcal{M}$  halmazra teljesülnek a következők.

- |   |  |
|---|--|
| <p>(1a) Bármely <math>\varepsilon &gt; 0</math>-hoz van olyan <math>G \subset X</math> nyílt halmaz, amelyre <math>H \subset G</math> és <math>\mu(G \setminus H) &lt; \varepsilon</math>.</p> <p>(2a) <math>\mu(H) = \inf \{ \mu(G) : G \subset X \text{ nyílt, } H \subset G \}</math>.</p> <p>(3a) Van olyan <math>A \in \mathcal{G}_\delta(X)</math> halmaz, amelyre <math>H \subset A</math> és <math>\mu(A \setminus H) = 0</math>.</p> | <p>(1b) Bármely <math>\varepsilon &gt; 0</math>-hoz van olyan <math>F \subset H</math> zárt halmaz, amelyre <math>\mu(H \setminus F) &lt; \varepsilon</math>.</p> <p>(2b) <math>\mu(H) = \sup \{ \mu(K) : K \text{ kompakt, } K \subset H \}</math>.</p> <p>(3b) Van olyan <math>B \in \mathcal{F}_\sigma(X)</math> halmaz, amelyre <math>B \subset H</math> és <math>\mu(H \setminus B) = 0</math>.</p> |
|---|--|

A (2) tulajdonságú, a Borel-halmazokat tartalmazó  $\sigma$ -algebrán értelmezett mértékeket hívjuk *regularisnak*.

## Bizonyítás.

- (1a) – Legyen  $\mathcal{T}$  a félig zárt téglák félgűrűje,  $\alpha = \mu|_{\mathcal{T}}$ , és  $\mathcal{A}$  a folytonossági téglák félgűrűje.
- A mértékkiterjesztés egyértelmősége miatt  $\mu = \varphi_\alpha|_{\mathcal{M}}$ ; a mértéket előállíthatjuk  $\mathcal{A}$ -beli téglákkal való fedéssel.
  - Az alaphalmaz előáll, mint megszámlálható sok kompakt (pl. kockák) uniója:  $X = \bigcup K_n$ .
  - Mindegyik  $H \cap K_n$  halmaz mérhető, a mértéke véges, és tetszőleges pontossággal lefedhető folytonossági téglákkal.

– A félig nyílt fedő téglákat nyílt téglákra hízlalhatjuk. A meghízalt fedő téglák uniójaként létezik olyan  $G_n \subset X$  nyílt halmaz, amelyre  $K_n \cap H \subset G_n$  és  $\mu(G_n) < \mu(H \cap K_n) + \frac{\varepsilon}{2^n}$ .

– Legyen  $G = \bigcup G_n$ ; ekkor

$$G \setminus H = \bigcup_{i=1}^{\infty} (G_n \setminus H) \subset \bigcup_{n=1}^{\infty} (G_n \setminus (H \cap K_n))$$

$$\mu(G \setminus H) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \mu(G_n \setminus (H \cap K_n)) = \sum_{n=1}^{\infty} (\mu(G_n) - \mu(H \cap K_n)) < \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\varepsilon}{2^n} = \varepsilon.$$

(1b) A komplementerekre áttérve, létezik olyan  $F$  zárt halmaz, amelyre  $\overline{H} \subset \overline{F} \subset X$  és  $\mu(\overline{F} \setminus \overline{H}) < \varepsilon$ , vagyis  $F \subset H$  és  $\mu(H \setminus F) < \varepsilon$ .

(2a) – Ha  $H \subset G$ , akkor  $\mu(G) \geq \mu(H)$ , ezért  $\inf \{\mu(G)\} \geq \mu(H)$ .

– Az (1a)-ból  $\forall \varepsilon > 0 \quad \inf \{\mu(G)\} \leq \mu(H) + \varepsilon$ .

–  $\forall \varepsilon > 0 \quad \mu(H) \leq \inf \{\mu(G)\} \leq \mu(H) + \varepsilon; \quad \varepsilon \searrow +0$ , kész.

(2b) – (kompakt helyett zárttal ez is **triviális** 🐵 lenne...)

– Ha  $K \subset H$ , akkor  $\mu(K) \leq \mu(H)$ , ezért  $\sup \{\mu(K)\} \leq \mu(H)$ .

– Minden  $m < \mu(H)$ -hoz keresünk olyan  $K \subset H$  kompakt halmazt, amire  $\mu(K) > m$ .

– Az (1b) miatt van olyan  $F \subset H$  zárt halmaz, amelyre  $\mu(F) > m$ .

– Minden pozitív egész  $n$ -re legyen  $K_n = F \cap \overline{B}(0, n)$ . Mindegyik  $K_n$  kompakt,  $\bigcup K_n = F$ .

– A mérték folytonossága miatt  $\lim_{n \rightarrow \infty} \mu(K_n) = \mu(F) > m$ .

– Van olyan  $n$ , amelyre  $\mu(K_n) > m$ .

– Tehát  $\forall m < \mu(H) \quad m < \sup \{\mu(K)\} \leq \mu(H). \quad m \nearrow \mu(H)$ , kész.

(3a) – Minden  $n$ -re legyen  $G_n \subset X$  olyan nyílt, amelyre  $H \subset G_n$  és  $\mu(G_n \setminus H) \leq \frac{1}{n}$ .

– Legyen  $A = \bigcap G_n \in \mathcal{G}_\delta$ .

–  $H \subset A$  és minden  $n$ -re

$$\mu(A \setminus H) \leq \mu(G_n \setminus H) \leq \frac{1}{n}.$$

– Az  $n \rightarrow \infty$  határátmenetből  $\mu(A \setminus H) = 0$ .



(3b) Ugyanúgy, mint (3a), vagy áttérve komplementerekre.

### Következmény

Tetszőleges  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  Lebesgue–Stieltjes féle mértéktérben

$$\mathcal{M} = \mathcal{B}^*.$$

(Az, hogy a csillag mit jelent, attól függ, mi a mérték!)

### Bizonyítás.

- Az előző tétel (3b) szerint

$$\mathcal{M} = \{M \sqcup Z : M \in \mathcal{F}_\sigma(X), \mu(Z) = 0\}.$$

- A (3a) szerint van olyan  $N \in \mathcal{G}_\delta$ , hogy  $Z \subset N$  és  $\mu(N) = 0$ .
- $M, N \in \mathcal{B}$ ,  $\mu(N) = 0$ , tehát  $\mathcal{M} \subset \mathcal{B}^*$ .
- A Borel-halmazok mérhetőek, ezért  $\mathcal{B} \subset \mathcal{M}$ .
- A minimális,  $\mathcal{B}$ -t tartalmazó  $\sigma$ -algebra, amelyen  $\mu$  teljes, a  $\mathcal{B}^*$ . Ezért  $\mathcal{B}^* \subset \mathcal{M}$ .

### Következmény (lokálisan véges Borel-mértékek regularitása)

Tetszőleges lokálisan véges Borel-mértékre igazak a fenti (1–3) állítások ( $\mathcal{M} = \mathcal{B}$ -re).

### Megjegyzés

A lokális végeesség nem hagyható el, ezt mutatja például a számosság mérték.

### 12.1 Lemma (közelítés szép halmazokkal)

A Lebesgue–Stieltjes-, speciálisan a Lebesgue-mérhető halmazok közel vannak szép Borel-halmazokhoz: ha  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  Lebesgue–Stieltjes mértéktér,  $A \in \mathcal{M}$ , és  $\mu(A) < \infty$ , akkor bármely  $\varepsilon > 0$ -hoz van olyan  $B$  halmaz, ami véges sok, racionális sarkú téglák diszjunkt uniója, és  $\mu(A \Delta B) < \varepsilon$ .

**Bizonyítás.** Fedjük le  $A$ -t egy téglasorozattal  $\varepsilon/2$  pontossággal:

$$A \subset \bigcup R_i, \quad \sum_{i=1}^{\infty} \mu(R_i) < \mu(A) + \varepsilon/2.$$

Legyen  $n$  olyan nagy, hogy  $\sum_{i=n+1}^{\infty} \mu(R_i) < \varepsilon/2$ , és legyen

$$B = \bigcup_{i=1}^n R_i.$$

Ekkor

$$\mu(B \subset A) \leq \mu\left(\bigcup_{i=1}^{\infty} R_i \setminus A\right) < \varepsilon/2,$$

és

$$\mu(A \setminus B) \leq \mu\left(\bigcup_{i=n+1}^{\infty} R_i\right) < \varepsilon/2.$$

### Megjegyzés

Lehetne a mérhető halmazok között egyfajta félmérikát csinálni: az  $A$  és  $B$  halmazok távolsága  $\lambda(A \triangle B)$ .

A fenti tétel azt is mondja, hogy a Lebesgue–Stieltjes mérhető halmazok majdnem ugyanazok, mint a Borel-halmazok: minden mérhető halmaz egy Borel-halmaz (vagy csak  $\mathcal{F}_\sigma$  halmaz) plusz nullmértékű zaj. A lemma szerint pedig minden véges mértékű mérhető halmaz néhány téglá uniója, plusz-mínusz  $\varepsilon$ -nyi zaj...

## III. rész

# Mérték szerinti integrál

## 13. Mérhető függvények

Mérhető függvények, a mérhetőség különböző ekvivalens feltételei félegyenesek össképeivel. Mérhetőség és műveletek (min, max, alapl műveletek, határérték, kompozíció), megszámlálható sok mérhető függvény pontonkénti szuprémuma, infimuma, liminfje, limszupja, a konvergenciahalmaz mérhetősége. Luzin tétele.

Emlékszünk, egy  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  függvény akkor és csak akkor folytonos, ha bármely  $H \subset \mathbb{R}$  nyílt (zárt) halmazra a  $H$  ősképe,  $f^{-1}(H)$  nyílt (zárt). Az  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  függvény akkor és csak akkor monoton, ha minden (véges vagy végtelen)  $I \subset \mathbb{R}$  intervallum ősképe,  $f^{-1}(I)$  is intervallum. A folytonosság és a monotonitás is nagyon fontos tulajdonság a Riemann-integrálhatóság vizsgálata során, de ezek a tulajdonságok törékenyek, egészen egyszerű műveletek elrontják őket.

Ugyanakkor az ősképképzés egy nagyon kényelmes operáció, felcserélhető az összes halmazművelettel: (véges vagy végtelen) unió ősképe az ősképek uniója, metszet ősképe az ősképek metszete, komplementum ősképe az ősképek komplementuma stb.

A mérték szerinti integrálok bevezetése előtt a folytonosság és a monotonitás egy közös általánosítását tárgyaljuk meg.

### Definíció

Legyen  $(X, \mathcal{M})$  és  $(Y, \mathcal{N})$  mérhető terek és  $f : X \rightarrow Y$ .

Az  $f$  leképezés  $(\mathcal{M}, \mathcal{N})$ -mérhető, ha minden  $A \in \mathcal{N}$ -re  $f^{-1}(A) \in \mathcal{M}$ .

Ha  $\mathcal{N} = \mathcal{B}$ , akkor  $\mathcal{M}$ -mérhető vagy csak mérhető.

Ha  $X, Y$  topologikus terek,  $\mathcal{M} = \mathcal{B}(X)$  és  $\mathcal{N} = \mathcal{B}(Y)$ , akkor Borel-mérhető.

Ha  $\mathcal{M} = \mathcal{L}(\mathbb{R}^p)$  és  $\mathcal{N} = \mathcal{B}(Y)$ , akkor Lebesgue-mérhető.

Sokszor nem a  $\sigma$ -algebrával, hanem a mértékkel fejezzük ki:  $\mu$ -mérhető.

## Lemma

Legyen  $(X, \mathcal{M})$ , mérhető tér,  $Y$  valamilyen halmaz és  $f : X \rightarrow Y$ . Ekkor

$$\mathcal{N} = \{A \subset Y : f^{-1}(A) \in \mathcal{M}\}$$

$\sigma$ -algebra  $Y$ -on.

### Bizonyítás.

- $\emptyset \in \mathcal{N}$ , mert  $f^{-1}(\emptyset) = \emptyset \in \mathcal{M}$ .
- $Y \in \mathcal{N}$ , mert  $f^{-1}(Y) = X \in \mathcal{M}$ .
- $\mathcal{N}$  zárt a komplementumképzésre: ha  $A \in \mathcal{N}$ , akkor  $f^{-1}(A) \in \mathcal{M}$ , így  $f^{-1}(Y \setminus A) = X \setminus f^{-1}(A) \in \mathcal{M}$ , tehát  $(Y \setminus A) \in \mathcal{N}$ .
- $\mathcal{N}$  zárt a megszámlálható unióra: ha  $A_1, A_2, \dots \in \mathcal{N}$ , akkor minden  $k$  indexre  $f^{-1}(A_k) \in \mathcal{M}$ , így  $f^{-1}(\bigcup A_k) = \bigcup f^{-1}(A_k) \in \mathcal{M}$ , tehát  $(\bigcup A_k) \in \mathcal{N}$ .

**Megjegyzés.** A Lemma alapján a mérhetőséget elég az  $\mathcal{N}$  egy generátorrendszerére ellenőrizni. Például a Borel-halmazokat generálják a  $[-\infty, c)$  vagy a  $[-\infty, c]$  stb. félegyenesek, és a  $c$  végpontokat elég egy sűrű halmazból választani.

## Tétel

Legyen  $(X, \mathcal{M})$  mérhető tér,  $f : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ ,  $S \subset \mathbb{R}$  sűrű. Ezek ekvivalensek:

- a  $f$  függvény Borel-mérhető.
- minden  $c \in S$ -re  $f^{-1}([-\infty, c)) = \{x : f(x) < c\} \in \mathcal{M}$ ;
- minden  $c \in S$ -re  $f^{-1}([-\infty, c]) = \{x : f(x) \leq c\} \in \mathcal{M}$ ;
- minden  $c \in S$ -re  $f^{-1}((c, \infty]) = \{x : f(x) > c\} \in \mathcal{M}$ ;
- minden  $c \in S$ -re  $f^{-1}([c, \infty]) = \{x : f(x) \geq c\} \in \mathcal{M}$ .
- minden  $G \subset \overline{\mathbb{R}}$  nyílt halmazra  $f^{-1}(G) = \{x : f(x) \in G\} \in \mathcal{M}$ .
- minden  $I \subset \overline{\mathbb{R}}$  intervallumra  $f^{-1}(I) = \{x : f(x) \in I\} \in \mathcal{M}$ .

## Következmény

Speciálisan, minden folytonos  $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  függvény Borel-mérhető, és minden monoton  $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  függvény mérhető.

## Mérhetőség és műveletek

### Lemma

Mérhető függvények kompozíciója mérhető: ha  $g : (X, \mathcal{M}) \rightarrow (Y, \mathcal{N})$  és  $f : (Y, \mathcal{N}) \rightarrow (Z, \mathcal{K})$  mérhető, akkor  $f \circ g : (X, \mathcal{M}) \rightarrow (Z, \mathcal{K})$  is mérhető. Speciálisan, ha  $g$  mérhető és  $f$  folytonos, akkor  $f \circ g$  mérhető.

### Bizonyítás.

- Bármely  $A \subset Z$  halmazra  $(f \circ g)^{-1}(A) = g^{-1}(f^{-1}(A))$ .
- Ha  $A \in \mathcal{K}$ , akkor  $f^{-1}(A) \in \mathcal{N}$ , de akkor  $g^{-1}(f^{-1}(A)) \in \mathcal{M}$ .

### Állítás

Ha  $f, g : X \rightarrow \mathbb{R}$  mérhető, akkor  $cf$ ,  $f + g$ ,  $|f|$ ,  $\max(f, g)$ ,  $\min(f, g)$ ,  $f^2$ ,  $1/f$ ,  $fg$ ,  $f/g$  is mérhető.

### Bizonyítás.

- $c \cdot f$ ,  $|f|$  és  $f^2$  egy-egy mérhető és egy folytonos függvény kompozíciója.

- 

$$\{x : f(x) + g(x) < c\} = \bigcup_{\substack{p, q \in \mathbb{Q} \\ p+q < c}} (\{x : f(x) < p\} \cap \{x : g(x) < q\}).$$

- 

$$\max(f, g) = \frac{f + g + |f - g|}{2}, \quad \min(f, g) = \frac{f + g - |f - g|}{2}.$$

- 

$$fg = \frac{(f + g)^2 - (f - g)^2}{4}.$$

- $1/x$  mérhető;  $1/f$  két mérhető függvény kompozíciója.

### Állítás

Ha  $f_1, f_2, \dots : X \rightarrow \mathbb{R}$  mérhető, akkor

(1)  $\sup f_n$  és  $\inf f_n$  mérhető.

(2)  $\limsup f_n$  és  $\liminf f_n$  mérhető.

(3) Azon pontok halmaza, ahol  $\lim f_n$  létezik, mérhető, és a  $\lim f_n$  függvény is mérhető.

## Bizonyítás.

$$\begin{aligned}\{x : \sup_n f_n(x) \leq c\} &= \bigcap_n \{x : f_n(x) \leq c\}; \\ \{x : \inf_n f_n(x) < c\} &= \bigcup_n \{x : f_n(x) < c\}.\end{aligned}\tag{1}$$

$$\limsup f_n = \inf_n \left( \sup_{m \geq n} f_m \right); \quad \liminf f_n = \sup_n \left( \inf_{m \geq n} f_m \right).\tag{2}$$

$$\begin{aligned}&\{x : \liminf f_n(x) < \limsup f_n(x)\} = \\ &= \bigcup_{\substack{p, q \in \mathbb{Q} \\ p < q}} \left( \{x : \liminf f_n(x) < p\} \cap \{x : \limsup f_n(x) > q\} \right)\end{aligned}\tag{3}$$

### Állítás

Ha  $f_1, f_2, \dots : X \rightarrow \mathbb{R}$  mérhető és  $X$  az  $A_1, A_2, \dots$  mérhető halmazok uniója, akkor az

$$f(x) = \begin{cases} f_1(x) & \text{ha } x \in A_1 \\ f_2(x) & \text{ha } x \in A_2 \\ \vdots & \end{cases}$$

függvény is mérhető.

**Bizonyítás.** Bármely  $B \in \mathcal{B}(\mathbb{R})$  Borel-halmazra  $f^{-1}(B) = \bigcup_n (f_n^{-1}(B) \cap A_n)$ .

### Kérdés

- Az alapvető építőköveink, az összes elemi függvény Borel-mérhető; az alpműveletek, beleértve az esetszétválasztást és a pontonkénti határértéket, nem vezetnek ki a Borel-halmazok és Borel-mérhető függvények köréből.
- Egyáltalán tudunk nem Borel-mérhető  $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  függvényt *konstruálni*?

### Tétel (Luzin (Николай Николаевич Лузин, 1883–1950))

Ha  $(\mathbb{R}^p, \mathcal{M}, \mu)$  Lebesgue–Stieltjes-mérték,  $f : \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}$  mérhető és  $\varepsilon > 0$ , akkor létezik olyan folytonos  $g : \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}$  függvény, hogy

$$\mu(\{x \in \mathbb{R}^p : f(x) \neq g(x)\}) < \varepsilon.$$

Avagy, a Lebesgue–Stieltjes mérhető függvények "közel" vannak a folytonos függvényekhez.

**Bizonyítás.** Az  $f$ -et komponálhatjuk egy olyan függvénnyel, amely folytonos bijekció  $\mathbb{R}$  és  $(0, 1)$  között (például  $y \mapsto \frac{\arctg y}{\pi} + \frac{1}{2}$ ), ezért elég az állítást  $\mathbb{R}^p \rightarrow (0, 1)$  függvényekre igazolni.

Minden  $n$ -re és  $0 \leq k < n$  esetén legyen

$$A_{n,k} = \left\{ x \in \mathbb{R}^p : \frac{k}{n} \leq f(x) < \frac{k+1}{n} \right\} \quad \text{és} \quad f_n(x) = \sum_{k=0}^{n-1} \frac{k}{n} \cdot \chi_{A_{n,k}};$$

ekkor tehát  $\left| f(x) - f_n(x) \right| < \frac{1}{n}$ , és  $f_n(x) \rightarrow f(x)$  egyenletesen.

A  $\mu$  regularitása miatt minden  $n$ -re és  $k$ -ra léteznek olyan  $Z_{n,k} \subset A_{n,k}$  zárt halmazok, amelyekre  $\mu(A_{n,k} \setminus Z_{n,k}) < \frac{\varepsilon}{2^n \cdot n}$ ; legyen

$$Z_n = \bigcup_{k=0}^{n-1} Z_{n,k} \quad \text{és} \quad Z = \bigcap_{n=1}^{\infty} Z_n.$$

A  $Z_n$  halmazok és a  $Z$  halmaz is zárt.

Mindegyik  $n$ -re a  $f_n(x)$  egy olyan egyszerű függvény, amely a  $Z_{n,0}, \dots, Z_{n,n-1}$  diszjunkt zárt halmazok mindegyikén konstans, tehát  $f_n(x)$  folytonos ezek unióján,  $Z_n$ -en. A  $Z_n$ -nek a  $Z$  is része, tehát az összes  $f_n(x)$  függvény folytonos  $Z$ -n. Az egyenletes konvergencia miatt  $f = \lim f_n$  is folytonos  $Z$ -n.

A Tietze féle kiterjesztési tétel szerint a zárt  $Z$ -n folytonos  $f|_Z$  függvény kiterjeszthető egy  $\mathbb{R}^p$ -n folytonos  $g$  függvénnyé. Végül,

$$\{x \in \mathbb{R}^p : f(x) \neq g(x)\} \subset X \setminus Z = \bigcup_{n=1}^{\infty} (X \setminus Z_n) = \bigcup_{n=1}^{\infty} \bigcup_{k=0}^{n-1} (A_{n,k} \setminus Z_n) = \bigcup_{n=1}^{\infty} \bigcup_{k=0}^{n-1} (A_{n,k} \setminus Z_{n,k}),$$

$$\mu(\{x \in \mathbb{R}^p : f(x) \neq g(x)\}) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{n-1} \mu(A_{n,k} \setminus Z_{n,k}) < \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\varepsilon}{2^n \cdot n} = \varepsilon.$$

# 14. Nemnegatív függvények integrálja

Egyszerű függvények. Nemnegatív mérhető függvény mint egyszerű függvények monoton növekvő limesze. Egyszerű függvény integrálja. Nemnegatív mérhető függvény integrálja. Műveletek. [Petruska, 52–57. o.]

Ebben a fejezetben lesz egy közös, rögzített  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  mértéktér; minden függvény az  $X$ -en vagy egy részhalmazán értelmes, és  $\mathbb{R}$ -be képez. Szeretnénk az eddigi integrálfogalmakat kiterjeszteni mértékterekre.

## Definíció

Megállapodás: most, és a továbbiakban is

$$0 \cdot \infty = \infty \cdot 0 = 0.$$

## Alsó és felső integrálközelítő összegek?

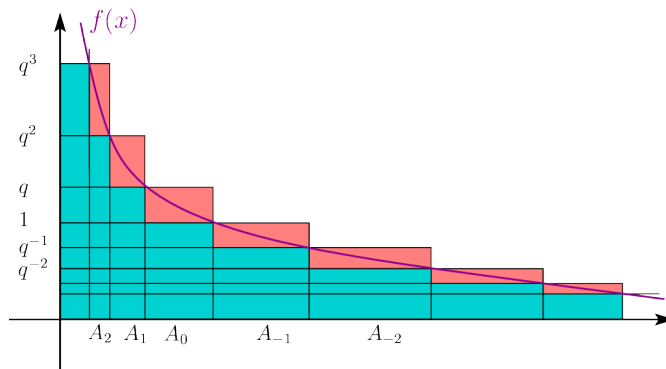
Most is próbálkozhatnánk azzal, hogy az integrált alsó és felső összegekkel definiáljuk. Az  $X$  halmaz felosztása azt jelentené, hogy az  $X$ -et felbontjuk megszámlálható sok diszjunkt mérhető halmazzá:  $X = \bigsqcup A_i$ . A felosztáshoz tartozó alsó és felső összeg  $s = \sum_{i=1}^{\infty} (\inf_{A_i} f) \cdot \mu(A_i)$ , illetve  $S = \sum_{i=1}^{\infty} (\sup_{A_i} f) \cdot \mu(A_i)$ .

Ha a függvény pozitív és negatív értékeket is felvehet, akkor az alsó és a felső összeg nem feltétlenül létezik, mert  $+\infty - \infty$  alakú összegek is előfordulhatnak. *Ezért egyelőre csak nemnegatív értékű függvényeket fogunk integrálni.* Az alsó integrál ezek után lehetne az alsó összegek szuprénuma, a felső integrál a felső összegek infimuma; az integrál akkor létezik, ha az alsó és a felső integrál megegyezik.

Vegyünk azonban észre, hogy az alsó és a felső integrál bármilyen nemnegatív, *mérhető* függvény esetén megegyezik. Vegyünk egy  $q > 1$  számot, és legyen

$$\begin{aligned} A_N &= f^{-1}(\{0\}) = \{x : f(x) = 0\}, \\ A_i(q) &= f^{-1}([q^i, q^{i+1})) = \{x : q^i \leq f(x) < q^{i+1}\} \quad (i \in \mathbb{Z} \cup \{N\}) \end{aligned}$$





A felosztáshoz tartozó alsó és felső összeg legyen  $s(q)$ , illetve  $S(q)$ ; ekkor

$$\sum_{i \in \mathbb{Z}} q^i \cdot \mu(A_i) \leq s(q) \leq S(q) \leq \sum_{i \in \mathbb{Z}} q^{i+1} \cdot \mu(A_i) = q \sum_{i \in \mathbb{Z}} q^i \cdot \mu(A_i)$$

és emiatt

$$\underline{\int} f d\mu \leq \overline{\int} f d\mu \leq S(q) \leq q \cdot s(q) \leq q \underline{\int} f d\mu.$$

Ha  $q$ -val tartunk 1-hez, azt kapjuk, hogy  $\underline{\int} f d\mu = \overline{\int} f d\mu$ . Ezek után szükségtelen alsó és felső integrálokkal és integrálközelítő összegekkel foglalkozni. *Csak az alsó integrált fogjuk használni.*

Az alsó összegek esetében pedig elég az összegből véges sok tagot megtartani, mert az ilyen részletösszegek szuprémuma is kiadja a teljes sor összegét. Tehát: *nemnegatív mérhető függvényekre csak alsó integrál lesz, véges sok tagú alsó összegekkel.*

## Egyszerű függvények integrálja

A véges sok tagú alsó összegek maguk is egy-egy speciális, csak véges sok értéket felvevő függvénynek egy, intuitívan integrálnak tekinthető mennyisége.

### Definíció (egyszerű függvény)

Legyen  $(X, \mathcal{M})$  mérhető tér.

Az  $f : X \rightarrow \mathbb{R}$  *egyszerű függvény*, ha mérhető, és az értékészlete véges.

Másképpen:  $f$  akkor mérhető, ha vannak olyan  $A_1, \dots, A_n$  diszjunkt, mérhető halmazok és  $c_1, \dots, c_n$  számok, hogy

$$f = \sum_{i=1}^n c_i \cdot \chi_{A_i}.$$

## Definíció (egyszerű függvény integrálja)

Az  $f = \sum_{i=1}^n c_i \cdot \chi_{A_i}$  egyszerű függvény  $\mu$  szerinti integrálja

$$\sum_{i=1}^n c_i \cdot \mu(A_i), \quad \text{jele} \quad \int_X f \, d\mu = \int_X f(x) \, d\mu(x).$$

Az  $f$   $\mu$  szerinti integrálja a  $H \in \mathcal{M}$  halmazon

$$\int_H f \, d\mu = \sum_{i=1}^n c_i \cdot \mu(H \cap A_i) = \int_X (f \cdot \chi_H) \, d\mu.$$

## Állítás

Ugyanannak a függvénynek többféle felírása is lehet, mert a  $c_i$  értékek között egyenlők is lehetnek, de a képlet minden felírásra ugyanazt az értéket adja.

## Példa

Ha  $X = \{1, 2, \dots, n\}$ , és  $\mu$  a számlálómérték, akkor a  $\{1, 2, \dots, n\} \rightarrow \mathbb{R}$  függvények az  $n$  hosszú számsorozatok, minden függvény egyszerű, és az integrál a sorozat összege.

## Lemma

Nemnegatív egyszerű függvényekre

- (1) Ha  $f \leq g$ , akkor  $\int_X f \, d\mu \leq \int_X g \, d\mu$ ;
- (2) Ha  $\mu(A) = 0$ , akkor  $\int_A f \, d\mu = 0$
- (3)  $A \subset B$  esetén  $\int_A f \, d\mu = \int_B \chi_A f \, d\mu$
- (4)  $\int_A c \, d\mu = c\mu(A)$
- (5)  $\int(f + g) = \int f + \int g$ ;

**Bizonyítás.** (1) Legyen  $X = \bigsqcup A_i = \bigsqcup_j B_j$ ,  $f = \sum c_i \cdot \chi_{A_i}$  és  $g = \sum_j d_j \cdot \chi_{B_j}$ .

$$\int_X f = \sum_i c_i \cdot \mu(A_i) = \sum_i c_i \cdot \left( \sum_j \mu(A_i \cap B_j) \right)$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_i \sum_j c_i \cdot \mu(A_i \cap B_j) \leq \sum_j \sum_i d_j \cdot \mu(A_i \cap B_j) \\
&= \sum_j d_j \cdot \left( \sum_i \mu(A_i \cap B_j) \right) = \sum_j d_j \cdot \mu(B_j) = \int_X g.
\end{aligned}$$

(5)

$$\begin{aligned}
\int_X (f + g) d\mu &= \sum_{i,j} (c_i + d_j) \mu(A_i \cap B_j) = \sum_i c_i \sum_j \mu(A_i \cap B_j) + \sum_j d_j \sum_i \mu(A_i \cap B_j) \\
&= \sum_i c_i \mu(A_i) + \sum_j d_j \mu(B_j) = \int_X f d\mu + \int_X g d\mu.
\end{aligned}$$

## Nemnegatív függvények integrálja

### Definíció (nemnegatív mérhető függvény integrálja)

Legyen  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  mértéktér.

Ha  $f : X \rightarrow [0, \infty]$  mérhető (a  $\infty$  értéket is megengedjük), és  $H$  mérhető halmaz, akkor az  $f$  függvény  $\mu$  szerinti integrálja

$$\sup \left\{ \int_H h d\mu : h \text{ egyszerű függvény, } 0 \leq h \leq f \right\}.$$

Jele

$$\int_H f d\mu = \int_H f(x) d\mu(x).$$

### Állítás

Ha  $f$  nemnegatív egyszerű függvény, akkor a kétféle integrál-definíció ugyanazt az eredményt adja.

**Bizonyítás.** **Triviális** 🙄 a Lemma (1) pontjából.

### Példa

Ha  $X = \mathbb{N}$ , és  $\mu$  a számlálómérték, akkor az  $\mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$  mérhető függvények a végtelen számsorozatok, és (egyelőre csak nemnegatív tagú sorozatokra) az integrál a sor összege.

## Tétel

Legyenek  $f, g \geq 0$  mérhető függvények.

(1) Ha  $f \leq g$ , akkor  $\int_X f d\mu \leq \int_X g d\mu$ ;

(2)  $\int_A c d\mu = c\mu(A)$

(3) Ha  $\mu(A) = 0$ , akkor  $\int_A f d\mu = 0$

(4)  $A \subset B$  esetén  $\int_A f d\mu = \int_B \chi_A f d\mu$

(5)  $c \geq 0$  esetén  $\int cf = c \int f$ ;

(6)  $\int(f + g) = \int f + \int g$ .

**Bizonyítás.** (1–5) **triviális** 🙄; az utolsó bizonyítása később.

# 15. Nemnegatív függvénysorozatok integrálja

Monoton konvergencia tétel. A MKT. nem igaz csökkenő sorozatra. Összeg integrálja. Beppo Levi tétele. Végtelen táblázat összege mint a BLT speciális esete. Fatou-lemma. Példák, amikor a Fatou-lemmában nincs egyenlőség, illetve limsup-al egyik irányban sem igaz. [Petruska, 57–60. o.]

## Tétel (monoton konvergencia tétel, MKT)

Ha  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  mértéktér,  $0 \leq f_1 \leq f_2 \dots$  nemnegatív mérhetőek  $X$ -en és  $E \in \mathcal{M}$ , akkor

$$\int_E \lim_{n \rightarrow \infty} f_n d\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_E f_n d\mu$$

(És mindkét határérték létezik.)

**Bizonyítás.** Feltehető, hogy  $E = X$ , mert áttérhetünk az  $(E, \mathcal{M}|_E, \mu)$  mértéktérre vagy  $X \setminus E$  pontjaiban a függvényeket a konstans nullának definiálhatjuk.

Vegyük észre, hogy az állításban szereplő határértékek és integrálok mind léteznek, és  $f_n \leq f$  miatt  $\lim_{n \rightarrow \infty} \int_X f_n d\mu \leq \int_X f d\mu$  **triviális** 🙄. A másik irányú egyenlőtlenséget kell bizonyítanunk.

Vegyünk egy olyan, egyszerű függvényekből álló  $g_1, g_2, \dots$  sorozatot, amelyre  $g_m \leq f$  és  $\int_X g_m d\mu \rightarrow \int_X f d\mu$ .

Most egy időre rögzítsük  $m$ -et, és vegyünk még egy  $0 < \varepsilon < 1$  számot is.

A  $g_m$  egyszerű függvény, tehát  $g_m = \sum_{i=1}^k c_i \chi_{A_i}$  valamilyen  $c_i > 0$  számokkal és páronként diszjunkt, mérhető  $A_i$  halmazokkal. Minden  $n$ -re legyen  $A_{i,n} = \{x \in A_i : f_n(x) > (1 - \varepsilon)c_i\}$ . A monotonitás, azaz  $f_{n+1} \geq f_n$  miatt  $A_{i,n+1} \supset A_{i,n}$ .

Az  $A_i$  halmazon  $\lim f_n(x) = f(x) \geq c_i > (1 - \varepsilon)c_i$ , ebből következik, hogy minden  $x \in A_i$ -hez van olyan  $n$ , hogy  $f_n(x) > (1 - \varepsilon)c_i$ , tehát  $x \in A_{i,n}$ ; ezért  $\bigcup_{n=1}^{\infty} A_{i,n} = A_i$ , és így

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mu(A_{i,n}) = \mu(A_i).$$

A  $h_n = \sum_{i=1}^k (1 - \varepsilon)c_i \cdot \chi_{A_{i,n}}$  egyszerű függvény és  $h_n \leq f_n$ , ezért

$$\int f_n \geq \int h_n = \sum_{i=1}^k (1 - \varepsilon)c_i \cdot \mu(A_{i,n}).$$

Az  $n \rightarrow \infty$  határátmenetből

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int f_n \geq \sum_{i=1}^k (1 - \varepsilon) c_i \cdot \mu(A_i) = (1 - \varepsilon) \sum_{i=1}^k c_i \cdot \mu(A_i) = (1 - \varepsilon) \int g_m.$$

Most  $\varepsilon \rightarrow 0$ :

$$\lim \int f_n \geq \int g_m;$$

végül  $m \rightarrow \infty$ :

$$\lim \int f_n \geq \int f.$$

### Példa

Csökkenő sorozatra a MKT nem igaz, pl.  $\mathbb{R}$ -en  $f_n(x) = \frac{1}{n}$  vagy  $(0, 1)$ -en  $g_n = \frac{1}{nx}$ .

### Kérdés

Vajon van olyan ellenpélda is, amikor  $\int f_n$  véges?

### Tétel

Ha  $f, g \geq 0$  mérhetőek, akkor  $\int(f + g) = \int f + \int g$ .

**Bizonyítás.** Minden pozitív egész  $n$ -re legyen

$$f_n(x) = \max \left\{ \frac{k}{2^n} : k \in \mathbb{Z}, 0 \leq \frac{k}{2^n} \leq \min(f(x), n) \right\}$$

és

$$g_n(x) = \max \left\{ \frac{k}{2^n} : k \in \mathbb{Z}, 0 \leq \frac{k}{2^n} \leq \min(g(x), n) \right\}$$

Ezek nemnegatív egyszerű függvények,  $f_n \nearrow f$  és  $g_n \nearrow g$ ; a MKT miatt

$$\begin{aligned} \int(f + g)d\mu &= \lim \int(f_n + g_n)d\mu = \lim \left( \int f_n d\mu + \int g_n d\mu \right) = \\ &= \lim \int f_n d\mu + \lim \int g_n d\mu = \int f d\mu + \int g d\mu. \end{aligned}$$

### Tétel (Beppo Levi (1875–1961), BLT)

Ha  $f_1, f_2, \dots \geq 0$  mérhetőek, akkor

$$\int_X \left( \sum_{n=1}^{\infty} f_n \right) d\mu = \sum_{n=1}^{\infty} \int_X f_n d\mu.$$

**Bizonyítás.**

$$\begin{aligned} \int_X \left( \sum_{n=1}^{\infty} f_n \right) d\mu &= \int_X \left( \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N f_n \right) d\mu \stackrel{\text{MKT}}{=} \lim_{N \rightarrow \infty} \int_X \left( \sum_{n=1}^N f_n \right) d\mu = \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N \int_X f_n d\mu = \sum_{n=1}^{\infty} \int_X f_n d\mu. \end{aligned}$$

Ha  $X = \mathbb{N}$  és  $\mu$  a számlálómérték, akkor visszakapjuk azt, hogy ha egy végtelen táblázatban nemnegatív számok vannak, akkor az oszlopösszegek összege egyenlő a sorösszegek összegével:

### Következmény

$a_{n,k} \geq 0$  esetén

$$\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} a_{n,k} = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} a_{n,k}$$

### Tétel (Fatou-lemma, Pierre Joseph Louis Fatou (1878–1929))

Ha  $f_1, f_2, \dots \geq 0$  mérhetőek, akkor

$$\int_X (\liminf f_n) d\mu \leq \liminf \int_X f_n d\mu.$$

**Bizonyítás.** A  $g_n(x) = \inf_{m \geq n} f_m(x)$  függvénysorozat pontonként monoton nő, így

$$\begin{aligned} \int_X (\liminf f_n) d\mu &= \int_X \left( \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \inf_{m \geq n} f_m \right) \right) d\mu \stackrel{\text{mkt}}{=} \lim_{n \rightarrow \infty} \int_X \left( \inf_{m \geq n} f_m \right) d\mu = \\ &= \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_X \left( \inf_{m \geq n} f_m \right) d\mu \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_X f_n d\mu. \end{aligned}$$

## Példák

1. Lehetséges, hogy a Fatou-lemmában a két oldal nem egyenlő, pl. legyen a  $[0, 2)$  intervallumon

$$f_n = \begin{cases} \chi([0, 1)) & \text{ha } n \text{ páros} \\ \chi([1, 2)) & \text{ha } n \text{ páratlan.} \end{cases}$$

Bármely  $x \in [0, 2)$ -re az  $f_1(x), f_2(x), \dots$  sorozat felváltva 0 és 1, ezért  $\liminf f_n(x) = 0$ .

Ugyanakkor  $\int_{[0,2)} f_n d\lambda = 1$  minden  $n$ -re, ezért

$$\int_{[0,2)} (\liminf f_n) d\lambda = 0 < \liminf \int_X f_n d\lambda = 1.$$

2. A Fatou-lemma  $\liminf$  helyett  $\limsup$ -pal egyik irányban sem igaz.

(2a) Az előző példában  $\limsup f_n(x) = 1$  és

$$\int_{[0,2)} (\limsup f_n) d\lambda = 2 > \limsup \int_X f_n d\lambda = 1.$$

(2b) Az  $X = \mathbb{R}$ ,  $f_n = \frac{1}{n} \chi_{(0,n)}$  függvénysorozatra  $\lim f_n = 0$  és  $\int f_n = 1$ , ezért

$$\int_{\mathbb{R}} (\limsup f_n) d\lambda = 0 < \limsup \int_{\mathbb{R}} f_n d\lambda = 1.$$

Egy másik példa:  $X = [0, 1]$ ,  $f_n = n \cdot \chi_{(0,1/n)}$ .

## Példa

A Fatou-lemmát is érdekes felírni akár csak kéttagú összegekre: tetszőleges  $a_1, a_2, \dots \geq 0$  és  $b_1, b_2, \dots \geq 0$  számokra

$$\liminf a_n + \liminf b_n \leq \liminf (a_n + b_n).$$




## 15.1 Tétel

Legyen  $f \geq 0$  mérhető függvény a  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  téren, Ekkor az

$$\varphi : \mathcal{M} \rightarrow [0, \infty], \quad \varphi(A) = \int_A f \, d\mu$$

függvény mérték  $\mathcal{M}$ -en.

**Bizonyítás.** Az **triviális** , hogy  $\varphi \geq 0$  és  $\varphi(\emptyset) = 0$ , ezért elég azt igazolni, hogy a  $\varphi$  halmazfüggvény  $\sigma$ -additív.

Tegyük fel, hogy  $A = \bigsqcup_{n=1}^{\infty} B_n$ , akkor  $\chi_A = \sum_{n=1}^{\infty} \chi_{B_n}$ , és

$$\begin{aligned} \varphi(A) &= \int_A f \, d\mu = \int_X (\chi_A \cdot f) \, d\mu = \int_X \left( \sum_{n=1}^{\infty} \chi_{B_n} \cdot f \right) \, d\mu = \\ &\stackrel{\text{BLT}}{=} \sum_{n=1}^{\infty} \int_X (\chi_{B_n} \cdot f) \, d\mu = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{B_n} f \, d\mu = \sum_{n=1}^{\infty} \varphi(B_n). \end{aligned}$$

# 16. Valós és komplex értékű függvények integrálja

Előjeles és komplex függvények integrálja. Rögzített függvény integrálja, mint előjeles/komplex mérték.

## Definíció

- Valós értékű mérhető függvényekre

$$\int_X f \, d\mu = \int_X f_+ \, d\mu - \int_X f_- \, d\mu$$

ha kivonhatók egymásból, vagyis ha  $\int_X f_+ \, d\mu$  és  $\int_X f_- \, d\mu$  közül legalább az egyik véges.

- Az  $f$  mérhető függvény a  $\mu$  mérték szerint *integrálható*, ha  $\int_X f_+ \, d\mu$  és  $\int_X f_- \, d\mu$  is véges. (Lebesgue-mérték esetén *Lebesgue-integrálható* stb.)
- Komplex értékű mérhető függvényre

$$\int_X f \, d\mu = \int_X (\operatorname{Re} f) \, d\mu + i \int_X (\operatorname{Im} f) \, d\mu,$$

és csak akkor értelmezzük, ha mindkettő véges. (Tehát, egy komplex értékű függvény integrálja nem lehet végtelen).

## Tétel

Tegyük fel, hogy  $\int_X f \, d\mu$  és  $\int_X g \, d\mu$  is értelmes.

(1)  $\int_X f \, d\mu$  véges  $\Leftrightarrow \int_X |f| \, d\mu$  véges.

(2)

$$\int_X cf \, d\mu = c \int_X f \, d\mu. \quad (\text{komplexre is}).$$

(3) Ha  $\int_X f \, d\mu$  és  $\int_X g \, d\mu$  létezik és összeadhatók, akkor  $\int_X (f + g) \, d\mu$  is létezik, és

$$\int_X (f + g) \, d\mu = \int_X f \, d\mu + \int_X g \, d\mu.$$

(4)

$$\left| \int_X f \, d\mu \right| \leq \int_X |f| \, d\mu.$$

### Bizonyítás.

(1)

$$\int_X f \, d\mu = \int_X f_+ \, d\mu - \int_X f_- \, d\mu \quad \text{és} \quad \int_X |f| \, d\mu = \int_X f_+ \, d\mu + \int_X f_- \, d\mu.$$

(3) Elég a valós eset igazolni, utána a komplex eset **triviális** 🙊.

- Az összeadhatóság miatt ( $\int_X f_+ \, d\mu$  és  $\int_X g_+ \, d\mu$  is véges), vagy ( $\int_X f_- \, d\mu$  és  $\int_X g_- \, d\mu$ , is véges).

- Néhány speciális eset:

- Ha  $A, B$  diszjunktak, és  $f \geq 0$ , akkor  $\int_{B \cup C} f \, d\mu = \int_B f \, d\mu + \int_C f \, d\mu$ .  
(Már volt.)

- Ha  $f, g \geq 0$ , akkor  $\int_A (f + g) \, d\mu = \int_A f \, d\mu + \int_A g \, d\mu$ . (Már volt.)

- Ha  $f \geq g \geq 0$  és  $\int_A g \, d\mu$  véges, akkor  $\int_A (f - g) \, d\mu = \int_A f \, d\mu - \int_A g \, d\mu$ .  
(Az előző átrendezése.)

- Szétbontjuk az alaphalmazt 6 részre  $f$ ,  $g$  és  $f + g$  előjele szerint:

$$A_1 = \{x \in X : f \geq 0, g \geq 0\};$$

$$A_4 = \{x \in X : f < 0, g < 0\};$$

$$A_2 = \{x \in X : f \geq 0, g < 0, f \geq |g|\};$$

$$A_5 = \{x \in X : f \geq 0, g < 0, |g| > f\};$$

$$A_3 = \{x \in X : g \geq 0, f < 0, g \geq |f|\};$$

$$A_6 = \{x \in X : g \geq 0, f < 0, |f| > g\};$$

- $$\begin{aligned}
\int_X (f+g)_+ d\mu &= \int_{A_1 \cup A_2 \cup A_3} (f+g)_+ \\
&= \int_{A_1} (f_+ + g_+) + \int_{A_2} (f_+ - g_-) + \int_{A_3} (g_+ - f_-) \\
&= \left( \int_{A_1} f_+ + \int_{A_1} g_+ \right) + \left( \int_{A_2} f_+ - \int_{A_2} g_- \right) + \left( \int_{A_3} g_+ - \int_{A_3} f_- \right).
\end{aligned}$$

- $$\begin{aligned}
\int_X (f+g)_- d\mu &= \int_{A_4 \cup A_5 \cup A_6} (f+g)_- \\
&= \int_{A_4} (f_- + g_-) + \int_{A_5} (g_- - f_+) + \int_{A_6} (f_- - g_+) \\
&= \left( \int_{A_4} f_- + \int_{A_4} g_- \right) + \left( \int_{A_5} g_- - \int_{A_5} f_+ \right) + \left( \int_{A_6} f_- - \int_{A_6} g_+ \right).
\end{aligned}$$

- Mindkettő létezik, legalább az egyik véges.

- $$\begin{aligned}
\int_X (f+g) d\mu &= \int_X (f+g)_+ d\mu - \int_X (f+g)_- d\mu \\
&= \left( \int_{A_1} f_+ + \int_{A_1} g_+ + \int_{A_2} f_+ - \int_{A_2} g_- + \int_{A_3} g_+ - \int_{A_3} f_- \right) \\
&\quad - \left( \int_{A_4} f_- + \int_{A_4} g_- + \int_{A_5} g_- - \int_{A_5} f_+ + \int_{A_6} f_- - \int_{A_6} g_+ \right) \\
&= \left( \left( \int_{A_1} f_+ + \int_{A_2} f_+ + \int_{A_5} f_+ \right) - \left( \int_{A_4} f_- + \int_{A_6} f_- + \int_{A_3} f_- \right) \right) \\
&\quad + \left( \left( \int_{A_1} g_+ + \int_{A_6} g_+ + \int_{A_3} g_+ \right) - \left( \int_{A_4} g_- + \int_{A_2} g_- + \int_{A_5} g_- \right) \right) \\
&= \left( \int_X f_+ - \int_X f_- \right) + \left( \int_X g_+ - \int_X g_- \right) = \int_X f d\mu + \int_X g d\mu.
\end{aligned}$$

(2a) valós esetben:

- Ha  $c \geq 0$ , akkor

$$\int cf = \int (cf)_+ - \int (cf)_- = c \int f_+ - c \int f_- = c \left( \int f_+ - \int f_- \right) = c \int f.$$

- Ha  $c < 0$ , akkor

$$\int cf = \int (cf)_+ - \int (cf)_- = \int |c|f_- - \int |c|f_+ = -|c| \left( \int f_+ - \int f_- \right) = c \int f.$$

- (2b) A komplex esetben kibontjuk valós és képzetes részekre: legyen  $u = \operatorname{Re} f$ ,  $v = \operatorname{Im} f$ ,  $d = \operatorname{Re} c$ ,  $e = \operatorname{Im} c$ ;

$$\begin{aligned} \int cf &= \int (d+ei)(u+iv) = \int \left( (du-ev) + (dv+eu)i \right) = \int (du-ev) + i \int (dv+eu) \\ &= d \int u - e \int v + di \int v + ei \int u = (d+e) \left( \int u + i \int v \right) = c \int f. \end{aligned}$$

- (4) A valós esetben

$$\begin{aligned} \left| \int_X f \, d\mu \right| &= \left| \int_X f_+ \, d\mu - \int_X f_- \, d\mu \right| \leq \int_X f_+ \, d\mu + \int_X f_- \, d\mu \\ &= \int_X (f_+ + f_-) \, d\mu = \int_X |f| \, d\mu. \end{aligned}$$

- A komplex esetben először elforgatjuk  $f$ -et úgy, hogy  $\int_X f \, d\mu$  nemnegatív valós legyen.
- Egy alkalmas egységnyi  $\omega$  komplex számmal  $\omega \cdot \int_X f \, d\mu$  nemnegatív valós.
- 

$$\begin{aligned} \left| \int_X f \, d\mu \right| &= \omega \int_X f \, d\mu = \operatorname{Re} \left( \omega \int_X f \, d\mu \right) = \operatorname{Re} \left( \int_X (\omega f) \, d\mu \right) \\ &= \int_X \operatorname{Re}(\omega f) \, d\mu \leq \int_X |f| \, d\mu. \end{aligned}$$

## Az integrál, mint előjeles mérték

### Tétel

Legyen  $f$  valós vagy komplex értékű függvény a  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  téren, amelyre  $\int_X f \, d\mu$  létezik. Ekkor az

$$\varphi : \mathcal{M} \rightarrow [0, \infty], \quad \varphi(A) = \int_A f \, d\mu$$

függvény előjeles, illetve komplex mérték  $\mathcal{M}$ -en.

**Bizonyítás.** Elég a valós esetet igazolni; komplex mérték esetén külön-külön igaz a tétel a valós és a képzetes részre.

Ismét csak  $\varphi(\emptyset) = 0$ , és azt kell igazolni, hogy a  $\varphi$  függvény  $\sigma$ -additív.

Legyen  $\varphi_+(A) = \int_A f_+ d\mu$  és  $\varphi_-(A) = \int_A f_- d\mu$ ; a 15 tétel szerint ezek mértékek, és  $\int f$  definíciója miatt  $\varphi = \varphi_+ - \varphi_-$ .

Ha  $A = \bigsqcup_{n=1}^{\infty} B_n$ , akkor

$$\sum_{n=1}^{\infty} \varphi_+(B_n) = \varphi_+\left(\bigsqcup_{n=1}^{\infty} B_n\right) = \varphi_+(A) = \int_A f_+ d\mu \quad \text{és} \quad \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_-(B_n) = \int_A f_- d\mu$$

közül legalább az egyik véges, ezért a két sor tagonként kivonható egymásból:

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \varphi(B_n) &= \sum_{n=1}^{\infty} (\varphi_+(B_n) - \varphi_-(B_n)) = \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_+(B_n) - \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_-(B_n) = \\ &= \varphi_+(A) - \varphi_-(A) = \varphi(A). \end{aligned}$$

## Közelítés szép függvényekkel

### Lemma

Legyen  $G \subset \mathbb{R}^p$  nyílt,  $(G, \mathcal{B}, \mu)$  Lebesgue–Stieltjes mérték,  $f$  integrálható és  $\varepsilon > 0$  tetszőleges. Ekkor létezik olyan  $h$  függvény, amely véges sok folytonossági téglán konstans, azokon kívül 0, és  $\int_G |f - h| d\mu < \varepsilon$ .

Avagy, az integrálható függvények vektorterében sűrűn vannak az olyan "szép" függvények, amelyek véges sok téglán konstansok, azokon kívül az értékük 0.

**Bizonyítás.** Elég  $G \rightarrow [0, \infty]$  függvényekre bizonyítani, mert utána külön-külön kereshetünk megfelelő függvényeket a  $(\operatorname{Re} f)_+$ ,  $(\operatorname{Re} f)_-$ ,  $(\operatorname{Im} f)_+$ ,  $(\operatorname{Im} f)_-$  függvényekhez és  $\varepsilon/4$ -hez. A továbbiakban  $f : G \rightarrow [0, \infty]$ ,  $\mu$ -integrálható.

Az integrál definíciója szerint van olyan  $g = \sum_{k=1}^n c_n \cdot \chi_{A_k}$  egyszerű függvény, amelyre  $0 \leq g \leq f$  és  $\int_G (f - g) d\mu < \varepsilon/2$ . Az  $f$  integrálhatósága miatt mindegyik  $\mu(A_k)$  véges.

A 12 Lemma miatt vannak olyan  $B_k$  "szép" halmazok, amelyek véges sok folytonossági téglá uniói, és  $\mu(A_k \Delta B_k) < \frac{\varepsilon}{2n|c_k|}$ . Ezek után legyen  $h = \sum_{k=1}^n c_n \cdot \chi_{B_k}$ .

A  $h$  egy "szép" függvény, és

$$\begin{aligned} \int_G |f - h| d\mu &\leq \int_G |f - g| d\mu + \int_G |g - h| d\mu = \frac{\varepsilon}{2} + \int_G \left| \sum_{k=1}^n c_k (\chi_{A_k} - \chi_{B_k}) \right| d\mu < \\ &< \frac{\varepsilon}{2} + \sum_{k=1}^n |c_k| \cdot \mu(A_k \Delta B_k) < \frac{\varepsilon}{2} + \sum_{k=1}^n |c_k| \cdot \frac{\varepsilon}{2n|c_k|} = \varepsilon. \end{aligned}$$

# 17. Függvénysorozatok integrálja

Fatou-Lebesgue tétel. Korlátos konvergencia tétel. Dominált konvergencia tétel. Az integrál kiterjesztése majdnem mérhető függvényekre. Ha  $\sum \|f_n\|_1$  konvergencia, akkor  $f_n \rightarrow 0$  m.m. [Petruska, 57–60. o.]

## Tétel (Fatou–Lebesgue tétel)

Ha  $g \geq 0$  integrálható, és  $|f_n| \leq g$ , akkor

$$\int_X (\liminf_{n \rightarrow \infty} f_n) d\mu \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_X f_n d\mu \leq \limsup_{n \rightarrow \infty} \int_X f_n d\mu \leq \int_X (\limsup_{n \rightarrow \infty} f_n) d\mu.$$

**Bizonyítás.** A  $g$  felveheti a  $\infty$  értéket, de csak egy nullmértékű halmazon. Ezt a halmazt elhagyjuk  $X$ -ből, és a maradékon bizonyítunk, ahol az összes függvény értéke véges. A nullmértékű halmaz elhagyása nem változtatja meg az integrálok értékét.

1. Fatou-lemma a  $g + f_n \geq 0$  függvényre:

$$\begin{aligned} \int_X (\liminf_{n \rightarrow \infty} f_n) d\mu &= \int_X (\liminf_{n \rightarrow \infty} (g + f_n)) d\mu - \int_X g d\mu \leq \\ &\stackrel{\text{Fatou}}{\leq} \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_X (g + f_n) d\mu - \int_X g d\mu = \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_X f_n d\mu. \end{aligned}$$

2. A középső egyenlőtlenség **triviális** 🙄.

3. Fatou-lemma a  $g - f_n \geq 0$  függvényre:

$$\begin{aligned} \int_X (\limsup_{n \rightarrow \infty} f_n) d\mu &= \int_X g d\mu - \int_X (\liminf_{n \rightarrow \infty} (g - f_n)) d\mu \geq \\ &\stackrel{\text{Fatou}}{\leq} \int_X g d\mu - \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_X (g - f_n) d\mu = \limsup_{n \rightarrow \infty} \int_X f_n d\mu. \end{aligned}$$

## Tétel (nagy Lebesgue-tétel; dominált konvergencia tétel)

Ha  $g \geq 0$  integrálható,  $|f_n| \leq g$  és  $f_n \rightarrow f$  pontonként, akkor

$$\int_X f d\mu = \lim \int_X f_n d\mu,$$

avagy

$$\int_X (\lim f_n) d\mu = \lim \int_X f_n d\mu.$$

A  $g$  a *domináns függvény*.



**Bizonyítás.** A Fatou-Lebesgue tételből következik a DKT, mert  $\liminf f_n = \limsup f_n = \lim f_n$ .

**Tétel (kis Lebesgue-tétel; korlátos konvergencia tétel)**

Ha  $\mu(X)$  véges,  $f_n$  egyenletesen korlátos, és  $f_n \rightarrow f$  pontonként, akkor

$$\int_X f \, d\mu = \lim \int_X f_n \, d\mu,$$

avagy

$$\int_X (\lim f_n) \, d\mu = \lim \int_X f_n \, d\mu.$$

**Bizonyítás.** Következik a DKT-ből: ha  $|f_n| \leq M$  minden  $n$ -re, akkor  $g = M$  jó domináns.

Egyszer valaki megkérdezte az előadáson, hogy mi a különbség *domináns* és a sorokra vonatkozó Weierstrass-kritériumban szereplő *majoráns* között. A *domine* az úr (isten), a *mayor* a polgármester.

## Megjegyzés

A konvergenciatételeinket (mkt, BL, FL, KKT, DKT) csak sorozatos formában mondtuk ki, de az átviteli elvek segítségével ezeket könnyedén átírhatjuk folytonos paraméterezésű paraméteres integrálokra. Például, ha  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  véges mértéktér,  $I \in \mathbb{R}$  intervallum,  $f : X \times I \rightarrow \mathbb{R}$  korlátos függvény, minden  $t \in I$  esetén az  $x \mapsto f(x, t)$  szekciófüggvény mérhető, és minden  $x \in X$  esetén a  $t \mapsto f(x, t)$  szekciófüggvény folytonos, akkor az  $F(t) = \int_X f(x, t) d\mu$  paraméteres integrál folytonos.

A folytonosságra vonatkozó átviteli elv miatt a folytonosság bizonyításához elég azt ellenőrizni, hogy  $a, t_1, t_2, \dots \in I$ ,  $t_n \rightarrow a$  esetén  $F(t_n) \rightarrow F(a)$ , vagyis

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_X f(x, t_n) d\mu(x) = \int_X f(x, a) d\mu(x) = \int_X \left( \lim_{n \rightarrow \infty} f(x, t_n) \right) d\mu(x);$$

ez pedig éppen a KKT a  $g_n(x) = f(x, t_n)$  függvénysorozatra.

Ugyanez dominált konvergenciatétellel: Ha  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  mértéktér,  $I \in \mathbb{R}$  intervallum,  $f : X \times I \rightarrow \mathbb{R}$  függvény, minden  $t \in I$  esetén az  $x \mapsto f(x, t)$  szekciófüggvény mérhető, és minden  $x \in X$  esetén a  $t \mapsto f(x, t)$  szekciófüggvény folytonos, továbbá  $g : X \rightarrow [0, \infty]$  integrálható és minden  $x \in X, t \in I$  esetén  $|f(x, t)| \leq g(x)$ , akkor az  $F(t) = \int_X f(x, t) d\mu$  paraméteres integrál folytonos.

Félre: Látjuk már, hogy a paraméteres integrálokról szóló további tételeink átírásához az  $X \times I$  szorzaton kell majd integrálni...

## Majdnem mindenhol mérhető függvények

### Definíció (majdnem mindenütt teljesülő tulajdonság)

Legyen  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  mértéktér és  $T : X \rightarrow \{\text{igaz}, \text{hamis}\}$ . A  $T$  tulajdonság az  $A$  halmazon  *$\mu$ -majdnem mindenütt*, rövidítve  *$\mu$ -m.m.* vagy csak *m.m.* teljesül, ha van olyan  $N$  nullmértékű halmaz, hogy  $A \setminus N$ -en  $T$  konstans igaz.

Teljes mértéktéren a definíció egyszerűbb: az a halmaz, ahol  $T$  hamis,  $\mu$ -nullmértékű.

## Definíció (majdnem mérhető függvény)

Legyen  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  mértéktér. Az  $f$  függvény  *$\mu$ -majdnem mérhető*, ha egy nullmértékű halmazon megváltoztathatjuk/definiálhatjuk úgy, hogy mérhető legyen.

## Lemma

Ha  $f$  és  $g$  mérhető az  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  téren és  $f = g$   $\mu$ -m.m., akkor  $\int_X f = \int_X g$ .  
(Ha az egyik létezik, akkor a másik is.)

## Következmény

Az eddigi integrálfogalmakat egyértelműen kiterjeszthetjük majdnem mérhető függvényekre.

A különböző konvergenciátételeink igazak maradnak majdnem mérhető függvényekre is.

## Példa

Van, amikor egy állítás csak m.m. igaz:

- (1) Ha  $f \geq 0$  mérhető függvény az  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  téren, és  $\int_X f d\mu = 0$ , akkor  $f = 0$   $\mu$ -m.m.
- (2) Ha  $f_1, f_2, \dots$  mérhető függvények az  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  téren, és  $\sum_{n=1}^{\infty} \int_X |f_n| d\mu < \infty$ , akkor  $\sum_{n=1}^{\infty} f_n(x)$   $\mu$ -m.m.  $x$ -re konvergens.

**Bizonyítás.** (1) Minden  $n$ -re  $\mu(f < \frac{1}{n}) = 0$ , különben az integrál pozitív lenne, ezért

$$\mu(f > 0) = \lim \mu(f > \frac{1}{n}) = 0.$$

(2) Legyen  $g = \sum |f_n|$ . A Beppo Levi tétel miatt

$$\int_X g d\mu = \sum \int_X |f_n| d\mu < \infty,$$

ezért  $g < \infty$  m.m.. Akkor viszont  $\sum f_n(x)$  m.m.  $x$ -re abszolút konvergens, tehát konvergens.

# 18. A Riemann-integrál létezésének feltételei

Függvény alsó és felső burkolója. A burkoló függvények félig folytonosak, ezért Borel-mérhetőek. A Riemann-integrálhatóság Lebesgue-féle ekvivalens feltétele. [Petruska, 76–80. o.]

A célunk annak a tényen a bizonyítása, hogy egy korlátos függvény akkor és csak akkor Riemann-integrálható, ha a szakadási helyeinek halmaza Lebesgue-nullmértékű.

## Félig folytonos függvények

### Definíció (félig folytonos függvények)

Legyen  $A$  az  $\mathbb{R}$  vagy  $\mathbb{R}^p$  vagy egy más metrikus tér részhalmaza és  $f : A \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ . Az  $f$  függvény *felülről félig folytonos* (f.f.f.) az  $a \in A$  pontban, ha

$$\forall c > f(a) \quad \exists \delta > 0 \quad \forall x \in B(a, \delta) \cap A \quad f(x) < c.$$

Az  $f$  függvény *alulról félig folytonos* (a.f.f.) az  $a \in A$  pontban, ha

$$\forall c < f(a) \quad \exists \delta > 0 \quad \forall x \in B(a, \delta) \cap A \quad f(x) > c.$$

### Megjegyzés

Ha  $f(a)$  véges, akkor  $c$  helyett  $f(a) \pm \varepsilon$ -t is írhatunk:

$$f \text{ f.f.f. } a\text{-ban} \quad \Leftrightarrow \quad \forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta > 0 \quad \forall x \in B(a, \delta) \cap A \quad f(x) < f(a) + \varepsilon,$$

illetve

$$f \text{ a.f.f. } a\text{-ban} \quad \Leftrightarrow \quad \forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta > 0 \quad \forall x \in B(a, \delta) \cap A \quad f(x) > f(a) - \varepsilon.$$

## Lemma

- (1)  $f : A \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$  akkor és csak akkor f.f.f., ha bármely  $c \in \mathbb{R}$ -re  $f^{-1}([-\infty, c))$  relatív nyílt.
- (2)  $f : A \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$  akkor és csak akkor a.f.f., ha bármely  $c \in \mathbb{R}$ -re  $f^{-1}((c, \infty])$  relatív nyílt.

**Bizonyítás.** (1)  $\Rightarrow$ : Tegyük fel, hogy  $f$  f.f.f.. Legyen  $c \in \mathbb{R}$  tetszőleges, majd  $a \in f^{-1}([-\infty, c))$  tetszőleges.

Ekkor  $f(a) \in [-\infty, c)$ , vagyis  $\bar{f}(a) = f(a) < c$ . A 18 definíció szerint van olyan  $r > 0$ , hogy bármely  $x \in B(a, r) \cap A$  esetén  $f(x) < c$ . Ezért  $B(a, r) \cap A \subset f^{-1}([-\infty, c))$ , vagyis  $a$  az  $f^{-1}([-\infty, c))$  halmaznak relatív belső pontja. Ez minden  $a$ -re igaz, tehát  $f^{-1}([-\infty, c))$  relatív nyílt.

(1)  $\Leftarrow$ : Tegyük fel, hogy bármely  $c \in \mathbb{R}$ -re  $f^{-1}((c, \infty])$  relatív nyílt, és legyen  $a \in A$  tetszőleges; azt kell igazolnunk, hogy  $f$  f.f.f. az  $a$  pontban, vagyis  $\limsup_{x \rightarrow a} f(x) \leq f(a)$ .

Vegyünk egy tetszőleges  $c > f(a)$  számot, ekkor  $a \in f^{-1}((c, \infty])$ . Ez a halmaz relatív nyílt, tehát van olyan  $r > 0$ , hogy  $B(a, r) \cap A \subset f^{-1}((c, \infty])$ . Átfogalmazva, az  $B(a, r) \cap A$  halmaz pontjaiban  $f < c$ . Ebből következik, hogy  $\limsup_{x \rightarrow a} f(x) \leq c$ .

Ezek után a  $c \rightarrow f(a) + 0$  határátmenetből kapjuk, hogy  $\limsup_{x \rightarrow a} f(x) \leq f(a)$ .

## Következmény

A félig folytonos függvények Borel-mérhetőek.

# Alsó és felső burkolófüggvény

## Definíció (függvény alsó és felső burkolója)

Legyen  $A$  az  $\mathbb{R}$  vagy  $\mathbb{R}^p$  vagy egy más metrikus tér részhalmaza és  $f : A \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ . Az  $f$  függvény *felső* és *alsó burkolója*

$$\begin{aligned}\bar{f}(a) &= \inf_{r>0} \left( \sup f(B(a, r) \cap A) \right) = \lim_{r \rightarrow +0} \left( \sup f(B(a, r) \cap A) \right) \\ &= \max \left( \limsup_{x \rightarrow a} f(x), f(a) \right),\end{aligned}$$

illetve

$$\begin{aligned}\underline{f}(a) &= \sup_{r>0} \left( \inf f(B(a, r) \cap A) \right) = \lim_{r \rightarrow +0} \left( \inf f(B(a, r) \cap A) \right) \\ &= \min \left( \liminf_{x \rightarrow a} f(x), f(a) \right).\end{aligned}$$

## Lemma

- (1)  $\underline{f} \leq f \leq \bar{f}$ ;
- (2)  $\underline{f}(a) = \bar{f}(a)$  akkor és csak akkor, ha  $f$  folytonos  $a$ -ban (a folytonosságot ki kell terjesztenünk a  $\pm\infty$  értékekre).

## Bizonyítás.

- (1) **triviális** , mert

$$\underline{f}(a) = \min \left( \liminf_{x \rightarrow a} f(x), f(a) \right) \leq f(a) \leq \max \left( \limsup_{x \rightarrow a} f(x), f(a) \right) = \bar{f}(a).$$

- (2) Ha  $\underline{f}(a) = \bar{f}(a)$ , akkor az (1) miatt  $f(a)$  értéke is ugyanez, és

$$\begin{aligned}\limsup_{x \rightarrow a} f(x) &\leq \max \left( \limsup_{x \rightarrow a} f(x), f(a) \right) = \bar{f}(a) = f(a) = \underline{f}(a) = \\ &= \min \left( \liminf_{x \rightarrow a} f(x), f(a) \right) \leq \liminf_{x \rightarrow a} f(x) \leq \limsup_{x \rightarrow a} f(x);\end{aligned}$$

ezeknek mind egyenlőknek kell lenni, tehát  $\liminf_{x \rightarrow a} f(x) = \limsup_{x \rightarrow a} f(x) = f(a)$ , tehát  $f$  folytonos  $a$ -ban.

Megfordítva, ha  $f$  folytonos  $a$ -ban, akkor  $\liminf_{x \rightarrow a} f(x) = \limsup_{x \rightarrow a} f(x) = f(a)$ , ezért

$$\bar{f}(a) = \max \left( \limsup_{x \rightarrow a} f(x), f(a) \right) = f(a) \quad \text{és} \quad \underline{f}(a) = \min \left( \liminf_{x \rightarrow a} f(x), f(a) \right) = f(a).$$

### Lemma

A felső burkoló f.f.f., az alsó burkoló a.f.f..

**Bizonyítás.**  $\bar{f}$  f.f.f.: Legyen  $c \in \mathbb{R}$  tetszőleges; azt kell igazolni, hogy  $f^{-1}((c, \infty])$  relatív nyílt. Kérjünk az ellenségtől egy tetszőleges  $a \in f^{-1}((c, \infty])$  pontot; az kell, hogy  $a$  ennek relatív belső pontja.

A feltétel szerint  $f(a) < c$ . Válasszunk egy  $c_1$  számot is, amelyre  $f(a) < c_1 < c$ . Ismét a 18 definíció szerint van olyan  $r > 0$ , hogy bármely  $x \in B(a, r) \cap A$  esetén  $f(x) < c_1$ . Ennek a környezetnek bármely  $b$  pontjában  $f(b) < c_1$  és  $\limsup_{x \rightarrow b} f(x) \leq c_1$ , tehát  $\bar{f}(b) \leq c_1 < c$ , tehát  $b \in f^{-1}((c, \infty])$ . Ez minden  $b$ -re igaz, tehát  $B(a, r) \cap A \subset f^{-1}((c, \infty])$ , kész.

### Következmény

Az alsó és a felső burkoló is Borel-mérhető.

## A Riemann-integrál létezésének feltételei

### Lemma

Legyen  $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  korlátos függvény. Ha  $I_1, I_2, \dots \subset [a, b]$  intervallumsorozat, amelyeknek  $c$  közös belső pontja, és  $|I_n| \rightarrow 0$ , akkor  $\inf_{I_n} f \rightarrow \underline{f}(c)$  és  $\sup_{I_n} f \rightarrow \bar{f}(c)$ .

**Bizonyítás.** Legyen

$$R_n = \min \{r > 0 : B(c, r) \supset I_n\}, \quad r_n = \max \{r > 0 : B(c, r) \subset I_n\}$$

Ezek 0-hoz tartanak.

A tartalmazás miatt

$$\sup f(B(c, r_n)) \leq \sup f(I_n) \leq \sup f(B(c, R_n))$$

Végül rendőr-elv.

### Lemma

Legyen  $[a, b] \subset \mathbb{R}$  zárt intervallum, és  $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  korlátos függvény; ekkor

$$\int_a^b f \, dx = \int_{[a,b]} \underline{f} \, d\lambda \quad \text{és} \quad \int_a^b f \, dx = \int_{[a,b]} \bar{f} \, d\lambda.$$

## Bizonyítás.

- Az integrálok léteznek, mert a burkolók korlátosak és Borel-mérhetőek.
- Minden pozitív egész  $n$ -re, osszuk fel az intervalumot  $2^n$  egyenlő részre az  $a = x_{n,0} < x_{n,1} < \dots < x_{n,2^n} = b$  pontokkal, és legyen

$$\alpha_n(x) = \inf_{[x_{n,i-1}, x_{n,i}]} f, \quad \text{ha } x \in [x_{n,i-1}, x_{n,i}]$$
$$\beta_n(x) = \sup_{[x_{n,i-1}, x_{n,i}]} f, \quad \text{ha } x \in [x_{n,i-1}, x_{n,i}].$$

- A felosztáshoz tartozó alsó és felső integrálközelítő összegek

$$s_n = \int_a^b \alpha_n(x) dx = \int_{[a,b]} \alpha_n d\lambda, \quad S_n = \int_a^b \beta_n(x) dx = \int_{[a,b]} \beta_n d\lambda.$$

- az előző Lemma miatt  $\alpha_n(x) \rightarrow \underline{f}(x)$  és  $\beta_n(x) \rightarrow \overline{f}(x)$ , kivéve azokat a pontokat, amik valamelyik felosztásnak belső osztópontjai.
- A KKT miatt

$$\int_{-a}^b f dx = \lim_{n \rightarrow \infty} s_{F_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{[a,b]} \alpha_n d\lambda \stackrel{\text{KKT}}{=} \int_{[a,b]} \underline{f} d\lambda \quad \text{és}$$
$$\int_a^{\overline{b}} f dx = \lim_{n \rightarrow \infty} S_{F_n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{[a,b]} \beta_n d\lambda \stackrel{\text{KKT}}{=} \int_{[a,b]} \overline{f} d\lambda.$$

### Tétel

Legyen  $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  korlátos.

- (1) Az  $\int_a^b f dx$  Riemann-integrál akkor és csak akkor létezik, ha az  $[a, b]$  intervallumon az  $f$  függvény  $\lambda$ -m.m. folytonos.
- (2) Ha az  $\int_a^b f dx$  Riemann-integrál létezik, akkor az  $f$  függvény  $\lambda$ -mérhető, és  $\int_a^b f dx = \int_{[a,b]} f d\lambda$ .

## Bizonyítás.

(1) A Riemann-integrál létezik  $\Leftrightarrow \int_a^b f dg = \int_a^b f dg \Leftrightarrow \int_{[a,b]} \underline{f} d\lambda = \int_{[a,b]} \overline{f} d\lambda \Leftrightarrow \int_{[a,b]} (\overline{f} - \underline{f}) d\lambda = 0 \Leftrightarrow \overline{f} - \underline{f} = 0$   $\lambda$ -m.m.  $\Leftrightarrow f$   $\lambda$ -m.m. folytonos.

(2) Ha a Riemann-integrál létezik, akkor  $f = \underline{f}$   $\lambda$ -m.m., tehát  $f$   $\lambda$ -majdnem Borel-mérhető.



## Megjegyzés

Abból, hogy az  $\int_a^b f$  Riemann-integrál létezik, nem következik, hogy  $f$  Borel-mérhető. Például a Jordan-nullmértékű Cantor-halmaznak létezik nem Borel-mérhető  $N$  részhalmaza (mert csak kontinuum sok Borel-halmaz létezik). A  $\chi_N$  függvény Riemann-integrálható, de nem Borel-mérhető.

## Megjegyzés

A bizonyítások átvihetők például a többdimenziós Jordan-mérték szerinti integrálokra. Ha  $A \subset \mathbb{R}^p$  Jordan-mérhető és  $f : A \rightarrow \mathbb{R}$  korlátos, akkor az  $\int_A f$  Riemann-integrál akkor és csak akkor létezik, ha  $f$  az  $A$   $\lambda$ -m.m. pontjában folytonos, ilyenkor  $f$  Lebesgue-mérhető is, és a Riemann- és a Lebesgue-integrál értéke ugyanaz.

## IV. rész

# Mértékek differenciálása

## 19. Előjeles mértékek variációi

Előjeles és komplex mértékek. Előjeles mérték nem veheti fel mindkét végtelent. Majoráns mérték. Pozitív, negatív és totális variáció. A totális variáció majorálja a pozitív és a negatív variációt. [Petruska, 85–89. o.]

Eddig olyan mértékekkel foglalkoztunk, amelyeknek minden értéke nemnegatív. Most egy kicsit az olyan  $\sigma$ -additív halmazfüggvényeket fogjunk megvizsgálni, amelyek negatívak (sőt, komplexek) is lehetnek, mint például a gazdasági növekedés vagy az intelligencia.

Mindig ugyanazon az  $(X, \mathcal{M})$  mérhető téren fogunk játszani.

### Definíció (előjeles és komplex mérték, újra)

$\vartheta : \mathcal{M} \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$  előjeles mérték, ha  $\vartheta(\emptyset) = 0$  és a  $\vartheta$  függvény  $\sigma$ -additív.

$\vartheta : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{C}$  komplex mérték, ha  $\vartheta(\emptyset) = 0$  és a  $\vartheta$  függvény  $\sigma$ -additív. (Az értéke csak véges lehet.)

### Példák

Hogy gyárthatunk előjeles és komplex mértékeket?

Pl. előjeles mértéket készíthetünk úgy, hogy vesszük két mérték különbségét:  $\vartheta = \mu_1 - \mu_2$ . Fontos, hogy  $\mu_1(X)$  és  $\mu_2(X)$  közül legalább az egyik véges legyen, hogy mindig el lehessen végezni a kivonást.

A komplex mértékeknek a valós és a képzetes része is egy-egy véges előjeles mérték. Ennek a mintájára gyárthatunk vektorértékű mértékeket is: minden koordináta egy-egy előjeles mérték...

Egy másik, nagyon fontos lehetőség, ha egy függvényt integrálunk: vegyünk egy  $f$  mérhető függvényt, egy  $\mu$  mértéket, és legyen  $\vartheta(A) = \int_A f d\mu$ .

## Tétel

Előjeles mérték nem veheti fel mindkét végtelent.

**Bizonyítás.** Ha  $(X, \mathcal{M}, \vartheta)$  előjeles mérték, és felveszi a  $+\infty$  értéket, tehát  $\vartheta(P) = \infty$  valamilyen  $P \subset X$  halmazra, akkor az additivitás miatt  $\vartheta(X) = \vartheta(P) + \vartheta(X \setminus P) = \infty$  (a jobboldalon csak összeadható mennyiségek lehetnek.)

Ha pedig  $\vartheta(N) = -\infty$  valamilyen  $N \subset X$  halmazra, akkor az additivitás miatt  $\vartheta(X) = \vartheta(N) + \vartheta(X \setminus N) = -\infty$ .

## Definíció (marjoráns mérték)

Az  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  mérték *majorálja* az  $(X, \mathcal{M}, \vartheta)$  előjeles/komplex mértéket, ha minden  $A \in \mathcal{M}$ -re  $|\vartheta(A)| \leq \mu(A)$ .

15

## Variációk

### Definíció (előjeles vagy komplex mérték totális variációja)

Az  $(X, \mathcal{M}, \vartheta)$  *előjeles mérték totális variációja*

$$\begin{aligned}\tau(A) &= \sup \{ |\vartheta(B)| + |\vartheta(C)| : B, C \subset A, B \cap C = \emptyset \} \\ &= \sup \left\{ \sum_{k=1}^n |\vartheta(B_k)| : n \in \mathbb{N}, B_k \subset A, B_k \cap B_\ell = \emptyset \right\} \\ &= \sup \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} |\vartheta(B_k)| : B_k \subset A, B_k \cap B_\ell = \emptyset \right\}.\end{aligned}$$

Az  $(X, \mathcal{M}, \vartheta)$  *komplex mérték totális variációja*

$$\begin{aligned}\tau(A) &= \sup \left\{ \sum_{k=1}^n |\vartheta(B_k)| : n \in \mathbb{N}, B_k \subset A, B_k \cap B_\ell = \emptyset \right\} \\ &= \sup \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} |\vartheta(B_k)| : n \in \mathbb{N}, B_k \subset A, B_k \cap B_\ell = \emptyset \right\}\end{aligned}$$

## Definíció (előjeles mérték pozitív és negatív variációi)

Az  $(X, \mathcal{M}, \vartheta)$  *előjeles mérték pozitív és negatív variációja*

$$\pi(A) = \sup\{\vartheta(B) : B \subset A\},$$

illetve

$$\nu(A) = \sup\{-\vartheta(B) : B \subset A\}.$$

## Tétel

Legyen  $\vartheta$  előjeles vagy komplex mérték, a totális variációja  $\tau$ ; ha előjeles mérték, akkor a pozitív és negatív variációi  $\pi$ , illetve  $\nu$ .

1.  $\tau, \pi, \nu$  mértékek.
2.  $\tau$  majorálja  $\vartheta$ -t.
3. Ha  $\vartheta$  előjeles mérték, akkor  $\tau$  majorálja  $\pi$ -t és  $\nu$ -t.
4. A  $\tau$  a legkisebb mérték, ami majorálja  $\vartheta$ -t.

**Bizonyítás.** (1a)  $\pi$  mérték: trivi, hogy  $\pi(A) \geq \vartheta(\emptyset) = 0$ , tehát  $\pi \geq 0$ . Az is trivi, hogy  $\pi(\emptyset) = 0$ . Azt kell bizonyítani, hogy  $\pi$   $\sigma$ -additív. Tegyük fel, hogy  $A_1, A_2, \dots \in \mathcal{M}$  diszjunktak és  $A = \bigsqcup A_n$ . Azt kell igazolnunk, hogy  $\pi(A) = \sum \pi(A_n)$ .

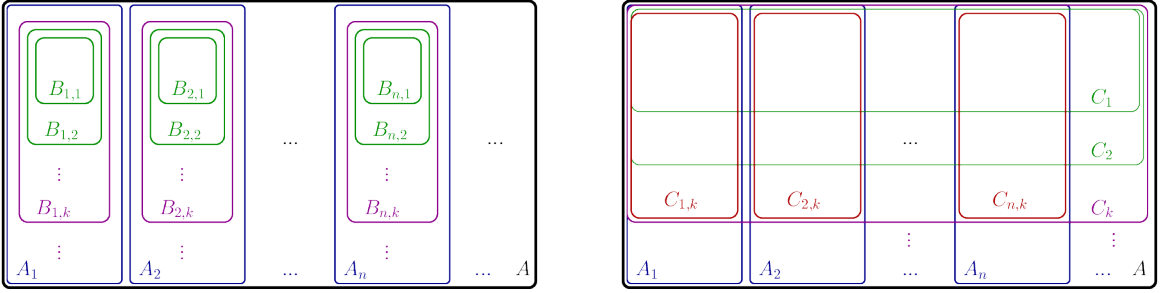
Mindegyik  $n$ -hez vegyünk egy olyan  $B_{n,1}, B_{n,2}, \dots \subset A_n$  sorozatot, amelyre  $0 \leq \vartheta(B_{n,k}) \rightarrow \pi(A_n)$ . Ekkor minden  $k$ -ra és  $N$ -re

$$\sum_{n=1}^N \vartheta(B_{n,k}) = \vartheta\left(\bigsqcup_{n=1}^N B_{n,k}\right) \leq \pi(A).$$

Most  $k \rightarrow \infty$ , majd  $N \rightarrow \infty$  határátmenet:

$$\sum_{n=1}^N \pi(A_n) \leq \pi(A)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \pi(A_n) \leq \pi(A). \quad (*)$$



Megfordítva, legyen  $C_1, C_2, \dots \subset A$  olyan sorozat, amelyre  $\vartheta(C_k) \rightarrow \pi(A)$ , és legyen  $C_{n,k} = A_n \cap C_k$ . Ekkor

$$\vartheta(C_k) = \vartheta\left(\bigsqcup_{n=1}^{\infty} C_{n,k}\right) = \sum_{n=1}^{\infty} \vartheta(C_{n,k}) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \pi(A_n);$$

A  $k \rightarrow \infty$  határátmenetből

$$\pi(A) = \lim_{k \rightarrow \infty} \vartheta(C_k) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \pi(A_n). \quad (**)$$

Az (\*) és (\*\*) együtt azt adja, hogy  $\pi(A) = \sum \pi(A_n)$ .

(1b)  $\tau$  mérték:  $\tau(\emptyset) = 0$ , és triviális, hogy  $\tau(A) \geq \vartheta(\emptyset) = 0$ ; most is a  $\sigma$ -additivitás kell; Legyen megint  $A = \bigsqcup A_n$ .

Mindegyik  $A_n$ -hez és mindegyik  $k$ -hoz vegyük  $\tau(B_n)$ -nek egy közelítő összegét úgy, hogy ezek  $k \rightarrow \infty$  esetén  $\tau(B_n)$ -hez tartanak, vagyis vegyük  $B_{n,k,\ell} \subset A_n$  halmazok sorozatának egy sorozatát úgy, hogy mindegyik  $n, k$ -ra a  $B_{n,k,1}, B_{n,k,2}, \dots \subset A_n$  halmazok diszjunktak, és  $\lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{\ell=1}^{\infty} |\vartheta(B_{n,k,\ell})| = \tau(A_n)$ . Rögzített  $k$ -ra a  $B_{n,k,\ell}$  halmazok diszjunkt részei  $A$ -nak, ezért minden  $N$ -re

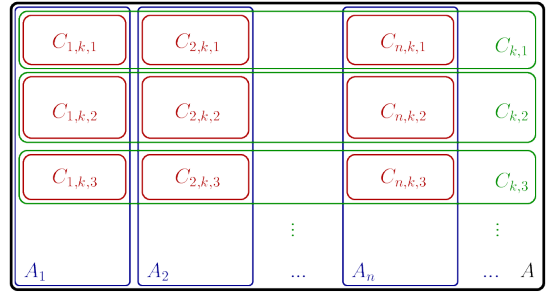
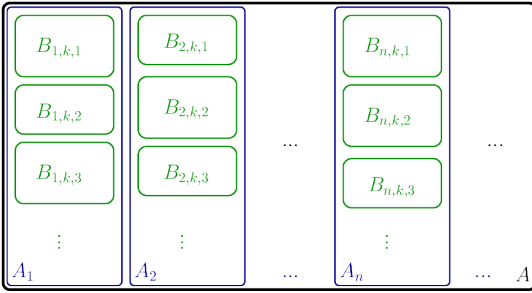
$$\sum_{n=1}^N \left( \sum_{\ell=1}^{\infty} |\vartheta(B_{n,k,\ell})| \right) \leq \tau(A).$$

$k \rightarrow \infty$ :

$$\sum_{n=1}^N \tau(A_n) \leq \tau(A).$$

$N \rightarrow \infty$ :

$$\sum_{n=1}^{\infty} \tau(A_n) \leq \tau(A).$$



A megfordításhoz vegyük  $\tau(A)$  közelítő összegeinek egy sorozatát, vagyis  $C_{k,\ell} \subset A$  halmazokat úgy, hogy rögzített  $k$ -ra  $C_{k,1}, C_{k,2}, \dots$  diszjunktak, és  $\lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{\ell=1}^{\infty} |\vartheta(C_{k,\ell})| = \tau(A)$ . Legyen  $C_{n,k,\ell} = A_n \cap C_{k,\ell}$ .

$$\begin{aligned} \sum_{\ell=1}^{\infty} |\vartheta(C_{k,\ell})| &= \sum_{\ell=1}^{\infty} \left| \vartheta \left( \bigsqcup_{n=1}^{\infty} C_{n,k,\ell} \right) \right| = \sum_{\ell=1}^{\infty} \left| \sum_{n=1}^{\infty} \vartheta(C_{n,k,\ell}) \right| \leq \\ &\leq \sum_{\ell=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} |\vartheta(C_{n,k,\ell})| = \sum_{n=1}^{\infty} \left( \sum_{\ell=1}^{\infty} |\vartheta(C_{n,k,\ell})| \right) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \tau(A_n) \end{aligned}$$

$k \rightarrow \infty$ :

$$\tau(A) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \tau(A_n).$$

Az triviális, hogy  $\tau$  majorál, és a legkisebb.

## 20. Előjeles mértékek felbontási tételei

Előjeles mérték szerint létezik maximális és minimális mértékű halmaz. Hahn-felbontás. Jordan-felbontás.  $\tau = \pi + \nu$ . [Petruska, 85–89. o.]

### 20.1 Lemma

Minden előjeles mértéknek van maximuma és minimuma, avagy:  
Ha  $\vartheta$  előjeles mérték, akkor léteznek olyan  $A, B \subset X$  halmazok, amelyekre  $\vartheta(A) = \pi(X)$  és  $\vartheta(B) = -\nu(X)$ .

Azt eddig is tudtuk, hogy  $-\nu(X) \leq \vartheta(A) \leq \pi(X)$ ; az a kérdés, hogy  $\vartheta$  felveszi-e a  $\pi(X)$  és  $-\nu(X)$  értékeket.

**Bizonyítás.** A  $\pi$ -re bizonyítunk.

1. eset:  $\pi(X) = \infty$ , azaz  $\vartheta$  nem korlátos felülről. Olyan  $A$  halmazt keresünk, amelyre  $\vartheta(A) = \infty$ .

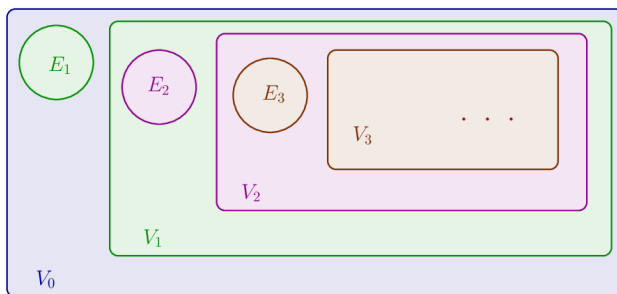
Nevezzünk egy  $V \in \mathcal{M}$  halmazt "végtelennek", ha  $\pi(V) = \infty$ , és egy végtelen  $V$  halmazt "bonthatónak" (v.ö. "Rontom-bontom, kisnyulacska!"<sup>1</sup>), ha vannak olyan  $E$  és  $W$  diszjunkt részhalmazai, amelyekre  $\vartheta(E) \geq 1$  és  $\pi(W) = \infty$ .

Vegyük észre, hogy nem bontható végtelen halmaznak a végtelen részhalmazai sem bonthatók.

1a. eset: Minden végtelen halmaz bontható, beleértve az  $X$ -et is. Ekkor bontva és tovább bontva

$$X \supset E_1 \sqcup V_1 \supset E_1 \sqcup (E_2 \sqcup V_2) \supset E_1 \sqcup (E_2 \sqcup (E_3 \sqcup V_3)) \supset \dots;$$

de akkor  $E_1, E_2, \dots$  diszjunkt halmazok, mindegyikre  $\vartheta(E_n) \geq 1$ , így az  $A = \bigcup E_n$  halmazra  $\vartheta(A) = \sum \vartheta(E_n) = \infty = \pi(X)$ .



1b. eset: Van nem bontható végtelen halmaz. Legyen  $V_0$  egy ilyen.

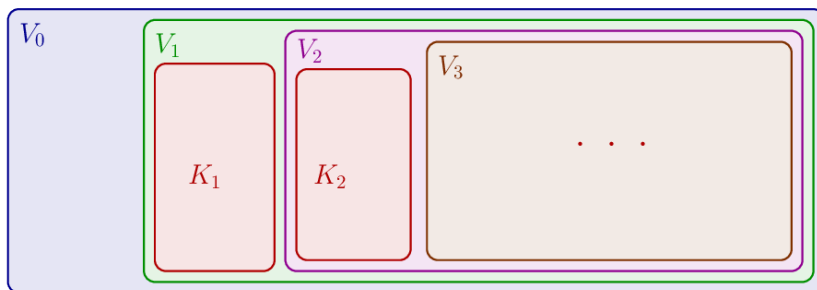
<sup>1</sup>Ez a fenyegetés annyit tesz, mint "Agyonverlek és kibelezlek, nyuszikám"; inkább ne mondjuk a gyerekeinknek. :-)

40.4Narancs Indirekt tegyük fel, hogy  $\vartheta$  értéke soha sem  $\infty$ .

Készítünk egy  $V_0 \supset V_1 \supset V_2 \supset \dots$  sorozatot nem bontható végtelen halmazokból.  $V_0$  már megvan.

Ha  $V_n$  már megvan, akkor válasszunk egy olyan  $V_{n+1} \subset V_n$  halmazt, amelyre  $\vartheta(V_{n+1}) > \max(\vartheta(V_n) + 1, 1)$ ; ilyen halmaz biztosan létezik, mert  $\vartheta(V_n)$  véges és  $\pi(V_n) = \infty$ .

A  $V_n$  halmaz két fele a  $V_{n+1}$  és  $V_n \setminus V_{n+1}$ . Mivel  $\pi$  additív, valamelyik fél halmaz végtelen. Az első felére  $\vartheta(V_{n+1}) \geq 1$ . Mivel a  $V_n$  nem bontható, a másik fél nem lehet végtelen. Tehát  $V_{n+1}$  is végtelen halmaz, ráadásul része a nem bontható  $V_n$ -nek, tehát ő sem bontható.



Most legyen  $K_n = V_n \setminus V_{n+1}$ ; ekkor

$$\vartheta(K_n) = \vartheta(V_n) - \vartheta(V_{n+1}) < -1,$$

az  $N = \bigcup_{n=1}^{\infty} K_n$  halmazra ezért  $\vartheta(N) = \sum \vartheta(K_n) = -\infty$ . Az  $N$  és  $V_1$  halmazokra  $N \subset V_1$ ,  $\vartheta(N) = -\infty$  és  $\vartheta(V_1) > 0$ , de az lehetetlen, hogy a pozitív mértékű  $V_0$ -nak legyen egy  $-\infty$  mértékű részhalmaza, ellentmondás. 40.4EUkek

2. eset:  $\pi(X)$  véges, azaz  $\vartheta$  felülről korlátos.

Szükségünk lesz a következő becslésre: ha  $\vartheta(H) \geq \pi(X) - \varepsilon$ , és  $R \subset H$ , akkor

$$\vartheta(R) = \vartheta(H) - \vartheta(H \setminus R) \geq (\pi(X) - \varepsilon) - \pi(X) = -\varepsilon.$$

Vegyünk minden  $n$  pozitív egészhez egy  $P_n \in \mathcal{M}$  halmazt, amire  $\vartheta(P_n) \geq \max(\pi(X) - \frac{1}{2^n}, 0)$ . Legyen  $Q_k = \bigcup_{n=k}^{\infty} P_n$  (a  $Q_n$  sorozat csökkenő) és  $A = \bigcap_{k=1}^{\infty} Q_k$ .<sup>2</sup>

Bármely  $k$ -ra

$$Q_k = P_k \cup \left( P_{k+1} \setminus P_k \right) \cup \left( P_{k+2} \setminus (P_k \cup P_{k+1}) \right) \cup \left( P_{k+3} \setminus (P_k \cup P_{k+1} \cup P_{k+2}) \right) \cup \dots$$

<sup>2</sup>A  $\limsup P_n = \bigcap_{k=1}^{\infty} \left( \bigcup_{n=k}^{\infty} P_n \right)$  halmazt hívjuk a  $P_n$  halmzsorozat *limesz superior*ának: azokból a pontokból áll, amelyek végtelen sok  $P_n$  halmaznak elemei.

A sorozat *limesz inferiora*  $\liminf P_n = \bigcup_{k=1}^{\infty} \left( \bigcap_{n=k}^{\infty} P_n \right)$ , ez azokból a pontokból áll, amelyek véges sok kivétellel minden  $P_n$  halmaznak elemei.



ezért

$$\pi(X) \geq \vartheta(Q_k) = \vartheta(P_k) + \sum_{n=k+1}^{\infty} \vartheta\left(P_n \setminus \bigcup_{\ell=k}^{n-1} P_\ell\right) > \left(\pi(X) - \frac{1}{2^k}\right) + \sum_{n=k+1}^{\infty} \frac{-1}{2^n} = \pi(X) - \frac{2}{2^k}$$

Ezek után

$$\begin{aligned} 0 &\leq \pi(X) - \vartheta(A) < \left(\vartheta(Q_k) + \frac{2}{2^k}\right) - \vartheta(A) = \vartheta(Q_k \setminus A) + \frac{2}{2^k} = \\ &= \vartheta\left(\bigcup_{n=k}^{\infty} (Q_n \setminus Q_{n+1})\right) + \frac{2}{2^k} = \sum_{n=k}^{\infty} (\vartheta(Q_n) - \vartheta(Q_{n+1})) + \frac{2}{2^k} < \\ &< \sum_{n=k}^{\infty} \left(\pi(X) - \left(\pi(X) - \frac{2}{2^{n+1}}\right)\right) + \frac{2}{2^k} = \left(\sum_{n=k}^{\infty} \frac{2}{2^{n+1}}\right) + \frac{2}{2^k} = \frac{4}{2^k}. \end{aligned}$$

Végül  $k \rightarrow \infty$ : látjuk, hogy  $\vartheta(A) = \pi(X)$ .

### Következmény

$\pi(X)$  és  $\nu(X)$  közül legalább az egyik véges.

**Bizonyítás.** A 20 lemma szerint  $\pi(X)$  és  $-\nu(X)$  is értéke  $\vartheta$ -nak, de a 19 tétel szerint nem lehet mindkettő végtelen.

### Tétel (Hahn-felbontás (Hans Hahn, 1879–1934))

Ha  $\vartheta$  előjeles mérték az  $(X, \mathcal{M})$  mérhető téren, akkor  $X$  felbontható két diszjunkt részre:  $X = P \cup N$  úgy, hogy a  $P$  mérhető részhalmazain  $\vartheta \geq 0$ , és az  $N$  mérhető részhalmazain  $\vartheta \leq 0$ .

Avagy, ha a  $\vartheta$  pozitív és negatív variációi  $\pi$  és  $\nu$ , akkor  $\pi(N) = 0$  és  $\nu(P) = 0$ .

**Bizonyítás.** 1. eset:  $\pi(X) < \infty$ .

Legyen  $P \subset X$  olyan halmaz, amelyre  $\vartheta(P) = \pi(X)$  és legyen  $N = X \setminus P$ .

Tetszőleges  $H \subset P$  esetén  $\vartheta(H) = \vartheta(P) - \vartheta(P \setminus H) \geq \pi(X) - \pi(X) = 0$ , így valóban  $\nu(P) = 0$ .

Tetszőleges  $H \subset N$  esetén  $\vartheta(H) = \vartheta(P \cup H) - \vartheta(P) \leq \pi(X) - \pi(X) = 0$ , így valóban  $\pi(N) = 0$ .

2. eset:  $\pi(X) = \infty$ . Ekkor  $\nu(X)$  véges, felcseréljük  $P$  és  $N$  definícióját.

## Kérdés

Egyértelmű-e a Hahn-felbontás?

Nem, de  $\tau$ -majdnem: ha  $X = P_1 \cup N_1 = P_2 \cup N_2$  két Hahn-felbontás, akkor a  $P_1 \Delta P_2 = N_1 \Delta N_2 = (P_1 \cup P_2) \cap (N_1 \cup N_2)$  halmazon  $\pi = \nu = 0$ , vagyis  $\tau(P_1 \Delta P_2) = 0$ ; a szimmetrikus differencia részhalmazain  $\vartheta$  konstans 0.

## Következmény

$$\pi(A) = \vartheta(A \cap P) \text{ és } \nu(A) = -\vartheta(A \cap N).$$

**Bizonyítás.** Bármilyen  $B \subset A$ -ra

$$\vartheta(B) = \vartheta(B \cap P) + \vartheta(B \cap N) \leq \vartheta(B \cap P) + \vartheta((A \cap B \cap P) + 0) = \vartheta(A \cap P).$$

Ha  $B = A \cap P$ , akkor egyenlőség van. Tehát

$$\pi(A) = \max \{ \vartheta(B) : B \subset A \} = \vartheta(A \cap P).$$

16

## Következmény (Jordan-felbontás (Marie Ennemond Camille Jordan 1838–1922))

Ha  $\vartheta$  előjeles mérték, a pozitív és negatív variációi  $\pi$  és  $\nu$ , akkor

$$\vartheta = \pi - \nu.$$

**Bizonyítás.** Legyen a Hahn-felbontás  $X = P \cup N$ . Bármilyen  $H$  mérhető halmazra

$$\vartheta(H) = \vartheta(H \cap P) + \vartheta(H \cap N) = \pi(H) - \nu(H).$$

## Következmény

Ha  $\vartheta$  előjeles mérték, a pozitív, negatív és totális variációi  $\pi$ ,  $\nu$  és  $\tau$ , akkor

$$\tau = \pi + \nu.$$

**Bizonyítás.** Legyen a Hahn-felbontás  $X = P \cup N$ . Bármilyen  $H$  mérhető halmazra és bármilyen  $A, B \subset H$  diszjunkt részeire

$$\begin{aligned} |\vartheta(A)| + |\vartheta(B)| &\leq (|\vartheta(A \cap P)| + |\vartheta(A \cap N)|) + (|\vartheta(B \cap P)| + |\vartheta(B \cap N)|) = \\ &= (\pi(A) + \nu(A)) + (\pi(B) + \nu(B)) = \pi(A \cup B) + \nu(A \cup B) \leq \pi(H) + \nu(H); \end{aligned}$$

például ha  $A = H \cap P$  és  $B = H \cap N$ , akkor egyenlőség van. Ezért

$$\tau(H) = \max \{ |\vartheta(A)| + |\vartheta(B)| : A, B \subset H \text{ diszjunktak} \} = \pi(H) + \nu(H).$$

### Következmény

$\vartheta(X)$  akkor és csak akkor véges, ha  $\pi(X)$  és  $\nu(X)$  véges.  
Minden komplex mérték totális variációja véges.

### Példa

Tegyük fel, hogy  $f$  mérhető az  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  mértéktéren és minden  $A \in \mathcal{M}$  esetén  $\vartheta(A) = \int_A f \, d\mu$ . Ekkor

- $(X, \mathcal{M}, \vartheta)$  Hahn-felbontása  $P = \{x : f(x) \geq 0\}$ ,  $N = \{x : f(x) < 0\}$ .
- $\pi(A) = \int_A f_+ \, d\mu$  és  $\nu(A) = \int_A f_- \, d\mu$  ,
- $\tau(A) = \int_A |f| \, d\mu = \int_A (f_+ + f_-) \, d\mu = \pi(A) + \nu(A)$ ,
- $\vartheta(A) = \int_A f \, d\mu = \int_A (f_+ - f_-) \, d\mu = \pi(A) - \nu(A)$ .

## Az előjeles mérték, mint integrál

### Következmény

Ha  $\vartheta$  előjeles mérték, a pozitív, negatív és totális variációi  $\pi$ ,  $\nu$  és  $\tau$ , akkor bármely  $A \in \mathcal{M}$  mérhető halmazra

$$\vartheta(A) = \int_A (\chi_P - \chi_N) \, d\tau.$$

Tehát, minden előjeles mérték előáll, mint egy függvény integrálja valamilyen mérték szerint.

### Kérdés (V)

ajon igaz-e valami hasonló összefüggés komplex mértékekre? Avagy, ha  $\vartheta$  komplex mérték, akkor létezik-e olyan mérhető  $f$  függvény, amelyre  $|f| = 1$ , és bármely  $A$  mérhető halmazra

$$\vartheta(A) = \int_A f \, d\tau?$$

## 21. Lebesgue-felbontás

Mérték tartója. Abszolút folytonos és szinguláris mértékek. Adott mértéknél nem nagyobb maximális szinguláris mérték. Lebesgue-felbontás. Egyértelműség. [Petruska, 90–91. o.]

A következő fejezetekben azt fogjuk vizsgálni, hogy milyen előjeles és komplex mértékek írhatók fel, mint valamilyen függvény integrálja egy megadott mérték szerint.

Vegyük elő újra azt az esetet, amikor mértéket valamilyen függvény integráljaként definiáltunk: mondjuk  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  mértéktér,  $f$  olyan mérhető függvény, amelynek létezik integrálja  $X$ -en, és bármely  $A \in \mathcal{M}$ -re  $\vartheta(A) = \int_A f d\mu$ . Speciálisan, ha  $f : R \rightarrow \overline{R}$  Borel-mérhető, és létezik a Lebesgue-integrálja, akkor  $\vartheta(A) = \int_A f d\lambda$  egy előjeles Borel-mérték.

Könnyű mutatni olyan mértéket, amely nem áll elő Lebesgue-integrál alakban, pl. a számlálómérték, vagy a Dirac-delta ( $\delta(A) = 1$ , ha  $0 \in A$ , egyébként  $0$ ). Nincs olyan Borel- vagy Lebesgue-mérhető  $f$  függvény, amelyre  $\int_A f d\lambda = |A|$  vagy  $\int_A f d\lambda = \delta(A)$  teljesülhetne.

Mindkét példánkban közös, hogy van egy olyan  $\lambda$ -nullmértékű  $A$  halmaz, amelyben  $\vartheta(A) \neq 0$ . Márpedig nullmértékű halmazon az integrál is nulla.

## Abszolút folytonos és szinguláris mértékek

Most is egy közös  $(X, \mathcal{M})$  mérhető téren fogunk dolgozni.

### Definíció (előjeles/komplex mérték tartója)

Az  $A \in \mathcal{M}$  halmaz a  $\vartheta$  előjeles/komplex mértéknek *tartója*, ha (ezek ekvivalensek):

- az  $X \setminus A$  halmazon  $\vartheta$  konstans  $0$
- bármely  $H \in \mathcal{M}$  halmazra  $\vartheta(H) = \vartheta(H \cap A)$ .

Például az  $X = P \cup N$  Hahn-felbontásban  $\pi$ -nek a  $P$ , a  $\nu$ -nek  $N$  egy tartója.

## Definíció (abszolút folytonos és szinguláris mértékek)

Legyen  $\alpha$  és  $\beta$  két mérték az  $(X, \mathcal{M})$  mérhető téren.

- (1) Az  $\alpha$  *abszolút folytonos* a  $\beta$ -ra nézve, ha bármely  $H \in \mathcal{M}$  esetén, ha  $\beta(H) = 0$ , akkor  $\alpha(H) = 0$ . Jele:  $\alpha \ll \beta$ .
- (2) Az  $\alpha$  és a  $\beta$  *szinguláris* egymásra nézve, ha (ezek ekvivalensek):
  - $\alpha$ -nak van  $\beta$ -nullmértékű tartója
  - $\beta$ -nak van  $\alpha$ -nullmértékű tartója
  - $X$  felbomlik két diszjunkt halmazzra,  $X = A \cup B$  úgy, hogy az  $\alpha$ -nak  $A$ , a  $\beta$ -nak  $B$  tartója, vagyis  $\alpha|_B = 0$  és  $\beta|_A = 0$ .

Jele:  $\alpha \perp \beta$ .

- (3) Ha előjeles vagy komplex mértékekről van szó, akkor azt követeljük meg, hogy az  $\alpha$  totális variációja legyen abszolút folytonos, illetve szinguláris a  $\beta$  totális variációja szerint. Ez megfelel annak, hogy ha egy előjeles mérték a  $H$  halmaz minden részén 0, akkor a totális variációja is 0.

## Példák

Ha  $f : X \rightarrow \mathbb{R}$  mérhető függvény, és  $\mu$  mérték, akkor a  $\varphi(A) = \int_A f d\mu$  előjeles mérték abszolút folytonos  $\mu$ -re nézve.

Ha  $\mu$  majorálja a  $\vartheta$  előjeles mértéket, akkor  $\vartheta \ll \mu$ .

Ha  $\vartheta$  előjeles mérték, és a variációi  $\tau$ ,  $\pi$  és  $\nu$ , akkor  $\tau \ll \vartheta$ ,  $\pi \ll \tau$ ,  $\nu \ll \tau$ ,  $\pi \ll \vartheta$ ,  $\nu \ll \vartheta$ ,  $\pi \perp \nu$ .

## Lemma

1. Ha  $\alpha \ll \beta$  és  $\alpha \perp \beta$ , akkor  $\alpha = 0$ .
2. Ha  $\alpha \ll \beta$  és  $\beta \ll \gamma$ , akkor  $\alpha \ll \gamma$ . ( $\ll$  egy tranzitív reláció, mint például az *osztója*, a *részhalma* vagy a *megette*.)
3. Ha  $\alpha_1, \alpha_2, \dots \geq 0$  mértékek, akkor  $\alpha_1 \ll \sum \alpha_k$ .
4. Ha  $\alpha_1, \alpha_2, \dots \ll \beta$  és  $\vartheta = \sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k$  előjeles mértékek, akkor  $\vartheta \ll \beta$ .
5. Ha  $\alpha \ll \beta$  és  $\beta \perp \gamma$ , akkor  $\alpha \perp \gamma$ .
6. Ha  $\alpha_1, \alpha_2, \dots \perp \beta$  és  $\vartheta = \sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k$  előjeles mértékek, akkor  $\vartheta \perp \beta$ .

**Bizonyítás.** 1. Legyen  $\alpha$  és  $\beta$  egy-egy, diszjunkt tartója  $A$ , illetve  $B$ . Bármely  $H$ -ra  $\alpha(H \setminus A) = 0$ , mert az  $A$  halmaz tartója  $\alpha$ -nak; továbbá  $\beta(H \cap A) = 0$ , mert  $A$  diszjunkt  $\beta$  tartójától. De  $\alpha \ll \beta$  miatt ebből következik, hogy  $\alpha(H \cap A) = 0$ . Így  $\alpha(H) = \alpha(H \setminus A) + \alpha(H \cap A) = 0$ .

2. Ha  $\gamma(H) = 0$ , akkor  $\beta(H) = 0$ , de akkor  $\alpha(H) = 0$ .

3. A tagot majorálja az összeg.

4. Ha  $\beta(H) = 0$ , akkor minden  $k$ -ra  $\alpha_k(H) = 0$ , de akkor ezek összege is 0.

5. Legyen  $\beta$  és  $\gamma$  egy-egy diszjunkt tartója  $B$ , illetve  $C$ . A  $B$ -n kívül  $\beta$  konstans 0, de akkor  $\alpha$  is. Ezért  $B$  az  $\alpha$  mértéknek is tartója.

6. Mindegyik  $\alpha_n$ -nek van egy  $\tau_\beta$ -nullmértékű  $A_n$  tartója. Az  $A = \bigcup A_n$  halmaz tartója a  $\sum \alpha_n$  mértéknek, és  $\beta$ -nullmértékű.

## Lebesgue-felbontás

### Tétel (Lebesgue-felbontás)

Legyen  $\vartheta$   $\sigma$ -véges előjeles vagy komplex mérték,  $\mu \geq 0$  mérték a közös  $(X, \mathcal{M})$  mérhető téren.

Ekkor  $\vartheta$  egyértelműen felbontható egy  $\mu$ -re nézve abszolút folytonos és egy  $\mu$ -re nézve szinguláris előjeles, illetve komplex mérték összegére, azaz egyértelműen vannak olyan  $\alpha$  és  $\beta$  előjeles, illetve komplex mértékek úgy, hogy

$$\vartheta = \alpha + \beta, \quad \alpha \ll \mu \quad \text{és} \quad \beta \perp \mu.$$

## Megjegyzés

A tételben azt is ki szokták kötni, hogy  $\mu$   $\sigma$ -véges, de erre nem lesz szükségünk.

### Bizonyítás.

1. eset:  $\vartheta$  véges.

Konstruálunk egy maximális szinguláris mértéket; ez lesz  $\beta$ , a maradék pedig  $\alpha$ .

Legyen  $\vartheta$  totális variációja  $\tau$ , legyen  $\mathcal{N} = \{N \in \mathcal{M} : \mu(N) = 0\}$  a  $\mu$ -nullmértékű halmazok gyűrűje, és legyen

$$s = \sup\{\tau(N) : N \in \mathcal{N}\}.$$

A jobboldalon a halmazban szerepel a  $0 = \tau(\emptyset)$ , így a definíció értelmes, és  $s \geq 0$ . Az is igaz, hogy bármely  $N \in \mathcal{N}$ -re  $\tau(N) \leq \tau(X)$ , így  $s \leq \tau(X)$ , ami véges.

A szuprérumot tetszőleges pontossággal megközelíthetjük: minden pozitív egész  $n$ -hez van egy olyan  $Z_n \in \mathcal{N}$  halmaz, amelyre  $\tau(Z_n) > s - \frac{1}{n}$ . Legyen  $Z = \bigcup Z_n$ ; ez megszámlálható sok  $\mu$ -nullmértékű halmaz uniója, ez is  $\mu$ -nullmértékű:  $Z \in \mathcal{N}$ .

Bármely  $n$ -re  $Z_n \subset Z$ ; a  $\tau$  monotonitása miatt

$$\forall n \quad s - \frac{1}{n} < \tau(Z_n) \leq \tau(Z) \leq s,$$

az  $n \rightarrow \infty$  határátmenetből

$$\tau(Z) = s.$$

Tehát a szuprérum valójában maximum.

Ezek után legyen  $H \in \mathcal{M}$  esetén

$$\alpha(H) = \vartheta(H \setminus Z), \quad \beta(H) = \vartheta(H \cap Z),$$

Az világos, hogy  $\alpha(H) + \beta(H) = \vartheta(H)$ .

A  $Z$  halmaz a  $\beta$  mértéknek  $\mu$ -nullmértékű tartója, tehát  $\beta \perp \mu$ .

Annak igazolásához, hogy  $\alpha \ll \mu$ , vegyünk egy tetszőleges  $\mu$ -nullmértékű  $N$  halmazt. Erre  $N \cup Z$  is  $\mu$ -nullmértékű, és

$$0 \leq |\alpha(N)| = |\vartheta(N \setminus Z)| \leq \tau(N \setminus Z) = \tau(N \cup Z) - \tau(Z) \leq s - s = 0.$$

Tehát, ha  $\mu(N) = 0$ , akkor  $\alpha(N) = 0$ ; tényleg  $\alpha \ll \mu$ .

Az egyértelműség bizonyítása:

Tegyük fel, hogy kétféle Lebesgue-felbontás is van:

$$\vartheta = \alpha_1 + \beta_1 = \alpha_2 + \beta_2.$$

Ekkor az

$$\alpha_1 - \alpha_2 = \beta_2 - \beta_1$$

mérték egyszerre abszolút folytonos és szinguláris, vagyis konstans 0.

2. eset:  $\vartheta$   $\sigma$ -véges.

Bontsuk fel az alaphalmazt megszámlálható sok, páronként diszjunkt  $\vartheta$ -véges cellára:  $X = \bigcup_{n=1}^{\infty} X_n$ . Mindegyik  $X_n$  cellán a  $\vartheta|_{X_n}$  mérték véges, így van egy egyértelmű Lebesgue-felbontása:  $\vartheta|_{X_n} = \alpha_n + \beta_n$ . Ezeket próbáljuk — kellő óvatossággal — összeadni.

Az  $\alpha_n$  és  $\beta_n$ -nek diszjunkt tartója is létezik: legyen  $\alpha_n$  tartója  $A_n \subset X_n$ , a  $\beta_n$  tartója  $B_n \subset X_n$ , ekkor tehát  $H \subset X_n$  esetén  $\alpha_n(H) = \vartheta(H \cap A_n)$  és  $\beta_n(H) = \vartheta(H \cap B_n)$ .

Ezek után legyen  $A = \bigcup A_n$ ,  $B = \bigcup B_n$ ,

$$\begin{aligned} \alpha(H) &= \vartheta(H \cap A) = \sum_{n=1}^{\infty} \vartheta(H \cap A_n) = \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n(H \cap X_n), \\ \beta(H) &= \vartheta(H \cap B) = \sum_{n=1}^{\infty} \vartheta(H \cap B_n) = \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n(H \cap X_n). \end{aligned}$$

Világos hogy ez a definíció értelmes,  $\alpha + \beta = \vartheta$ ,  $\alpha \ll \mu$  és  $\beta \perp \mu$ .

Az egyértelműséghez tegyük fel, hogy  $\alpha_1 + \beta_1$  és  $\alpha_2 + \beta_2$  is Lebesgue-felbontás; ekkor mindegyik  $X_n$ -re megszorítva a  $\vartheta|_{X_n}$  mértéknek Lebesgue-felbontása a  $\alpha_1|_{X_n} + \beta_1|_{X_n}$  és  $\alpha_2|_{X_n} + \beta_2|_{X_n}$ . A véges esetben a felbontás egyértelmű, ezért  $\alpha_1|_{X_n} = \alpha_2|_{X_n}$  és  $\beta_1|_{X_n} = \beta_2|_{X_n}$ ; de ezeket összeadva visszakapjuk az eredeti mértékeket.

### Megjegyzés

Ha  $\vartheta$  nem  $\sigma$ -véges, akkor nem biztos, hogy létezik Lebesgue-felbontás. Legyen például  $X = \mathbb{R}$ ,  $\mathcal{M} = \mathcal{B}$ ,  $\mu = \lambda$  és  $\vartheta$  a számlálómérték. Bármely pont Lebesgue-mértéke 0, a számlálómértéke pozitív, így az abszolút folytonos rész tartója csak az üres halmaz lehetne. A szinguláris rész tartója csak Lebesgue-nullmértékű lehet. Ez a kettő együtt nem adhatja ki a teljes  $\mathbb{R}$ -et.



## 22. Radon–Nikodym derivált

Radon–Nikodym derivált. Radon–Nikodym tétel. Helyettesítéses integrálás. A totális variáció szerinti RN derivált. Előjeles és komplex mérték szerinti integrál definíciói. [Petruska, 91–95. o.]

### Definíció (Radon–Nikodym derivált)

Legyen  $\mu \geq 0$  mérték, és legyen  $\vartheta$  előjeles vagy komplex mérték az  $(X, \mathcal{M})$  mérhető téren. Az  $f : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ , illetve  $f : X \rightarrow \mathbb{C}$  mérhető függvényt a  $\vartheta$  mérték  $\mu$  szerinti *Radon–Nikodym deriváltjának* nevezzük, ha bármely  $H \in \mathcal{M}$ -re  $\vartheta(H) = \int_H f d\mu$ .

Használatos az  $f = \frac{d\alpha}{d\mu}$  jelölés is:  $\int_H \frac{d\alpha}{d\mu} d\mu = \int_H d\alpha$ .

### Megjegyzés

A Radon–Nikodym-derivált létezésének triviális szükséges feltétele, hogy  $\vartheta \ll \mu$  legyen, mert nullmértékű halmazokon az integrál is mindig nulla. Ugyanakkor az abszolút folytonosság önmagában nem elég. Pl.  $\mathbb{R}$  Borel-halmazain nem léteznek a Lebesgue-mértéknek Radon–Nikodym-deriváltja a számlálómérték szerint, mert

$$\int_H f d|\cdot| = \sum_{a \in H} f(a),$$

és az egyelemű halmazokra ez azt adja, hogy  $f$  konstans 0, de a konstans 0 integrálja minden halmazon 0.

### Tétel (Radon–Nikodym)

Legyen  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  szigma-véges mérték, és legyen  $\alpha$  előjeles vagy komplex mérték az  $(X, \mathcal{M})$  mérhető téren, és tegyük fel, hogy  $\alpha \ll \mu$ .

Ekkor létezik a  $\frac{d\alpha}{d\mu}$  Radon–Nikodym derivált, vagyis létezik olyan  $f : X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ , illetve  $X \rightarrow \mathbb{C}$   $\mu$ -mérhető függvény, amelyre bármely  $H \in \mathcal{M}$  esetén  $\alpha(H) = \int_H f d\mu$ .

A Radon–Nikodym derivált  $\mu$ -majdnem egyértelmű, vagyis ha  $f$  és  $g$  is Radon–Nikodym derivált, akkor  $f = g$   $\mu$ -m.m.

**Bizonyítás.** I.a eset:  $\alpha \geq 0$ , mindkét mérték véges.

Legyen

$$\Phi = \left\{ f : X \rightarrow [0, \infty] \text{ mérhető, } f \geq 0, \forall H \in \mathcal{M} \int_H f d\mu \leq \alpha(H) \right\}$$

a sehol sem túl nagy függvények halmaza, és

$$s = \sup \left\{ \int_X f d\mu : f \in \Phi \right\}$$

Világos, hogy  $0 \leq s \leq \alpha(X)$ .

(1)  $0 \in \Phi$  (trivi).

(2) Ha  $g, h \in \Phi$ , akkor  $m = \max(g, h) \in \Phi$ .

Biz. Legyen  $A = X(g \geq h)$  és  $B = X(g < h)$ . Bármely  $H$ -ra

$$\int_H m d\mu = \int_{H \cap A} g d\mu + \int_{H \cap B} h d\mu \leq \alpha(H \cap A) + \alpha(H \cap B) = \alpha(H).$$

(3) Ha  $g_1, g_2, \dots \in \Phi$  és  $g_1 \leq g_2 \leq \dots$ , akkor  $h = \lim g_n \in \Phi$ .

Biz. Bármely  $H \in \mathcal{M}$ -re és  $n$ -re

$$\int_H g_n d\mu \leq \alpha(H);$$

A monoton konvergencia tételből

$$\int_H h d\mu \stackrel{\text{mkt}}{=} \lim \int_H g_n d\mu \leq \alpha(H).$$

(4) Van olyan  $f \in \Phi$ , amelyre  $\int_X f d\mu = s$ . Avagy, a szuprémum maximum is.

Biz. Vegyünk egy olyan  $g_1, g_2, \dots \in \Phi$  sorozatot, amelyre  $\int_X g_n d\mu \rightarrow s$ , és legyen

$f_n = \max(g_1, \dots, g_n) \in \Phi$ . Ekkor  $0 \leq g_n \leq f_n \leq f_{n+1}$ ; legyen  $f = \lim f_n$ . Ekkor  $\int_X g_n d\mu \leq \int_X f_n d\mu \leq s$ ; a rendőr-elv miatt  $\int_X f_n d\mu \rightarrow s$ . A monoton konvergencia tétel miatt  $\int_X f d\mu = \lim \int_X f_n d\mu = s$ .

(5)  $s = \alpha(X)$ .

Biz: indirekt. tegyük fel, hogy  $s < \alpha$ . Ekkor van olyan  $\varepsilon > 0$  amire  $\varepsilon \cdot \mu(X) < \alpha(X) - s = \alpha(X) - \int_X f d\mu$ .

Legyen

$$\varphi(H) = \alpha(H) - \int_H (f + \varepsilon) d\mu = \alpha(H) - \int_H f d\mu - \varepsilon \cdot \mu(H).$$

Ekkor  $\varphi$  előjeles mérték,  $\varphi \ll \mu$  és  $\varphi(X) > 0$ .

Legyen  $\varphi$  Hahn-felbontása  $X = P \cup N$ . Ekkor tehát bármely  $H \subset P$  esetén  $\varphi(H) \geq 0$ , azaz  $\int_H (f + \varepsilon) d\mu \leq \alpha(H)$ .

Mivel  $\varphi(X) > 0$ , ezért  $\varphi(P) > 0$ ; viszont  $\varphi \ll \mu$  miatt ebből következik, hogy  $\mu(P) > 0$ .

Legyen most  $g = f + \varepsilon \cdot \chi_P$ . Ez a függvény  $\Phi$ -beli, mert bármely  $H \in \mathcal{M}$ -re

$$\int_H g d\mu = \int_{H \cap N} f d\mu + \int_{H \cap P} (f + \varepsilon) d\mu \leq \alpha(H \cap N) + \alpha(H \cap P) = \alpha(H).$$

Ugyanakkor

$$\int_X g d\mu = \int_X f d\mu + \varepsilon \cdot \mu(P) > \int_X f d\mu = s,$$

ellentmondás.

(6) Ha  $\int_X f d\mu = s$ , akkor minden  $H$ -ra  $\alpha(H) = \int_H f d\mu$ .

Biz.  $\varphi(H) = \alpha(H) - \int_H f d\mu \geq 0$  mérték, de  $\varphi(X) = 0$ , tehát  $\varphi = 0$ .

I.b eset:  $\alpha$  véges előjeles mérték.

Vegyük  $\alpha$  Jordan-felbontását:  $\alpha = \pi - \nu$ , végesek. Mivel  $\pi, \nu \ll \alpha \ll \mu$ , a pozitív és negatív variációnak is létezik Radon–Nikodym deriváltja.

I.c eset:  $\alpha$  véges komplex mérték.

Az  $\alpha$  valós és képzetes része is véges, abszolút folytonos mérték, van Radon–Nikodym deriváltjuk.

Egyértelműség:

Elég a valós esetre. Ha  $f$  és  $g$  is Radon–Nikodym derivált, akkor legyen  $A = X(f > g)$  és  $B = X(f < g)$ . Ekkor

$$\int_A (f - g) d\mu = \int_A f d\mu - \int_A g d\mu = \alpha(A) - \alpha(A) = 0;$$

A baloldalon az integrandus pozitív; az integrál csak úgy lehet 0, ha  $\mu(A) = 0$ . Hasonlóan látjuk, hogy  $\mu(B) = 0$ . Így hát  $f = g$   $\mu$ -m.m.

II.a eset:  $\alpha$  előjeles, és  $\sigma$ -véges.

Legyen  $\alpha$  Jordan-felbontása  $\alpha = \pi - \nu$ .

Osszuk fel a teret diszjunkt cellákra:  $X = \bigcup X_n$  úgy, hogy minden cellán  $\alpha$  és  $\mu$  is véges. Mindegyik  $X_n$  cellán van  $\pi$ -nek és  $\nu$ -nek is Radon–Nikodym deriváltja; legyenek ezek

$$g_n = \frac{d\pi|_{X_n}}{d\mu|_{X_n}} \quad \text{és} \quad h_n = \frac{d\nu|_{X_n}}{d\mu|_{X_n}};$$

ezekből készítsünk egy-egy nagy közös  $g$ , illetve  $h$  függvényt, amelynek a cellákra vett megszorításai a RND-k:

$$g(x) = g_n(x) \quad \text{ha } x \in X_n; \quad h(x) = h_n(x) \quad \text{ha } x \in X_n.$$

Azt állítjuk, hogy  $f = g - h$  jó lesz.

Bármely  $H$ -ra

$$\pi(H) = \sum_{n=1}^{\infty} \pi(H \cap X_n) = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{H \cap X_n} g_n d\mu = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{H \cap X_n} g d\mu = \int_H g d\mu$$

és ugyanígy

$$\nu(H) = \int_H h d\mu.$$

A  $\pi(X)$  és  $\nu(X)$  közül az egyik véges, ezért  $g$  és  $h$  közül valamelyik  $\mu$ -m.m. véges, ezért

$$\alpha(H) = \pi(H) - \nu(H) = \int_H g d\mu - \int_H h d\mu = \int_H (g - h) d\mu = \int_H f d\mu.$$

Egyértelműség: az  $f$   $\mu$ -majdnem egyértelmű mindegyik cellán, tehát a megszámlálható sok cellán együtt is.

II.b eset:  $\alpha$  komplex,  $\sigma$ -véges.

Külön-külön létezik és m. egyértelmű a valós és a képzetes rész Radon–Nikodym deriváltja.

III. eset:  $\alpha$  nem  $\sigma$ -véges.

Feltehetjük, hogy  $\alpha(X) = \infty$  (a másik eset a  $-\infty$  lenne). Azt állítjuk, hogy  $X$  felbontható két részre:  $X = S \cup V$  úgy, hogy  $S$ -en  $\alpha$   $\sigma$ -véges, a  $V$  részhalmazain pedig  $\alpha(H) = \infty$  ha  $\mu(H) > 0$ .

A teret felcellázzuk olyan cellákra, amelyeken  $\mu$  véges; vegyük észre, hogy az állításunkat elég egy cellára igazolni. Tehát azt is feltehetjük, hogy  $\mu(X)$  véges.

Minden  $n$ -re legyen  $\varphi_n = \alpha - n \cdot \mu$ ; ez előjeles mérték, a Hahn-felbontása legyen  $X = P_n \cup N_n$ . A definíció miatt  $\varphi_{n+1} \leq \varphi_n$ , így  $P_{n+1} \subset P_n$  és  $N_{n+1} \supset N_n$ . Legyen  $S = \bigcup N_n$  és  $V = \bigcap P_n$ .

Mivel  $0 \geq \varphi_n(N_n) = \alpha(N_n) - n \cdot \mu(N_n)$ , ezért  $-\infty < \alpha(N_n) \leq n \cdot \mu(N_n) < \infty$  vagyis  $\alpha(N_n)$  véges. Ezért  $\alpha$  valóban  $\sigma$ -véges  $S$ -en.

Ha  $H \subset V = \bigcap P_n$  és  $\mu(H) > 0$ , akkor minden  $n$ -re  $H \subset P_n$ ; akkor  $\varphi_n(H) \geq 0$ ,  $\alpha(H) \geq n \cdot \mu(H)$ . Ez minden  $n$ -re igaz, tehát  $\alpha(H) = \infty$ .

Ezek után a Radon–Nikodym deriváltat előállíthatjuk a  $\sigma$ -véges  $S$  részen úgy mint eddig, a  $V$  halmazon pedig legyen  $f = \infty$ .

Egyértelműség: az  $S$ -en az egyértelműséget már tudjuk; azt kell igazolni, hogy a  $V$  halmazon csak a ( $\mu$ -m.m.) konstans  $\infty$  lehet a RND. Legyen tehát  $f$  RND a  $V$  halmazra megszorítva; ekkor tehát minden  $H \subset V$  és  $\mu(H) > 0$  esetén  $\int_H f d\mu = \infty$ .

Legyen  $V_n = V(f \leq n)$ . Mivel  $\alpha(V_n) = \int_{V_n} f d\mu \leq \mu(V_n) \cdot n < \infty$  véges, ez csak úgy lehet, ha  $\mu(V_n) = 0$ . De ekkor a  $V(f < \infty) = \bigcup V_n$  halmaz  $\mu$ -nullmértékű. Tehát a  $V$  halmazon  $f = \infty$   $\mu$ -m.m.

## 22.1 Tétel

Legyenek  $\alpha \ll \beta$  (pozitív) mértékek  $(X, \mathcal{M})$ -en,  $g = \frac{d\alpha}{d\beta}$ , és  $f$  integrálható  $X$ -en. Ekkor

$$\int_X f d\alpha = \int_X fg d\beta.$$

**Bizonyítás.** Ha  $f$  egyszerű függvény, akkor trivi, majd monoton konvergencia.

## Megjegyzés

A Radon-Nikodym derivált formulájának megjegyzési módja ugyanaz, mint a helyettesítéses integrálásnál:

$$\int_X f d\alpha = \int_X f \cdot \frac{d\alpha}{d\beta} \cdot d\beta.$$

## Lemma

Legyen  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  mérték,  $f$  mérhető függvény, amelyre létezik  $\int_X f d\mu$ . Ekkor a  $\vartheta(H) = \int_H f d\mu$  előjeles/komplex mérték totális variációja

$$\tau(H) = \int_H |f| d\mu.$$

**Bizonyítás.** Trivi, hogy bármely  $H \subset X$ -re

$$|\vartheta(H)| = \left| \int_H f d\mu \right| \leq \int_H |f| d\mu.$$

A másik irányhoz vegyünk egy  $n \geq 4$  egészt, és  $k = 1, \dots, n$  esetén legyen  $A_k = \left\{ x \in H : \frac{2\pi(k-1)}{n} \leq \arg f(x) < \frac{2\pi k}{n} \right\}$ .

$$\begin{aligned} \tau(H) &\geq \sum_{k=1}^n |\vartheta(A_k)| = \sum_{k=1}^n \left| \int_{A_k} f d\mu \right| = \sum_{k=1}^n \left| e^{-\frac{2\pi ki}{n}} \int_{A_k} f d\mu \right| \geq \sum_{k=1}^n \operatorname{Re} \left( e^{-\frac{2\pi ki}{n}} \int_{A_k} f d\mu \right) = \\ &= \sum_{k=1}^n \int_{A_k} \operatorname{Re} \left( e^{-\frac{2\pi ki}{n}} f \right) d\mu \geq \sum_{k=1}^n \int_{A_k} |f| \cos \frac{2\pi k}{n} d\mu = \cos \frac{2\pi}{n} \sum_{k=1}^n \int_{A_k} |f| d\mu = \cos \frac{2\pi}{n} \int_H |f| d\mu. \end{aligned}$$

Így hát

$$\cos \frac{2\pi}{n} \int_H |f| d\mu \leq \tau(H) \leq \int_H |f| d\mu,$$

és  $n \rightarrow \infty$ -vel kész.

## Tétel

Ha  $\vartheta$  komplex mérték  $(X, \mathcal{M})$ -en, és a totális variációja  $\tau$ , akkor van olyan  $f$  függvény, amelyre  $|f| = 1$  és

$$\vartheta(H) = \int_H f d\tau.$$

**Bizonyítás.** Legyen  $g = \frac{d\vartheta}{d\tau}$ , avagy  $\vartheta(H) = \int_H g d\tau$ . Az előző lemma szerint  $\tau(H) = \int_H |g| d\tau$ , vagyis  $\int_H (|g| - 1) d\tau = 0$  minden  $H$ -ra, ami azt jelenti, hogy  $|g| = 1$   $\tau$ -mm. Ahol  $g$  nem egységnyi, ott tetszés szerint megváltoztathatjuk...

## Definíció (előjeles/komplex mérték szerinti integrál)

Ha  $\vartheta$  előjeles/komplex mérték és a totális variációja  $\tau$ , akkor legyen

$$\int_H f d\vartheta := \int_H f \frac{d\vartheta}{d\tau} d\tau.$$

Alternatív definíció: Ha  $\vartheta$  előjeles mérték és a variációi  $\pi, \nu$ , akkor

$$\int_H f d\vartheta := \int_H f d\pi - \int_H f d\nu.$$



## V. rész

# Borel-mértékek differenciálása

Most  $\mathbb{R}^p$ -beli lokálisan véges előjeles Borel-mértékeket fogunk deriválni.

## 23. Differenciálbázisok; előjeles mérték deriváltja

Differenciálbázis. Alsó és felső deriváltak. Szimmetrikus, közönséges és erős derivált.

### Definíció (differenciálbázis)

Legyen  $G \subset \mathbb{R}^p$  nyílt,  $\mathcal{B} = \mathcal{B}(G)$ . A  $\mathcal{D} \subset G \times \mathcal{B}$  halmaz *differenciálbázis*, ha minden  $(a, A) \in \mathcal{D}$  esetén  $A$  korlátos,  $\lambda(A) > 0$ , és  $a \in G$  és  $\varepsilon > 0$  esetén létezik olyan  $(a, A) \in \mathcal{D}$ , amelyre  $A \subset B(a, \varepsilon)$ .

A  $\mathcal{D}$  differenciálbázis *reguláris*, ha minden  $a \in G \in \mathcal{D}$ -hez van olyan  $\varrho(a) > 0$  sűrűség, hogy minden  $(a, A)$ -ra van olyan  $r$ , hogy  $A \setminus B(a, r)$  nullmértékű és  $\lambda(A) \geq \varrho(a) \cdot \lambda(B(a, r))$ , vagyis ha vesszük a legkisebb, az  $A$ -t majdnem tartalmazó gömböt, akkor az  $A$  a gömbnek legalább a  $\varrho(a)$  részét kitölti.

A  $\mathcal{D}$  differenciálbázis *egyenletesen reguláris*, ha a  $\varrho(x)$  függvény konstans.



## Definíció (differenciálbázis szerinti derivált)

Legyen  $\vartheta$  előjeles Borel-mérték  $G$ -n,  $\mathcal{D}$  differenciálbázis.

- A  $\vartheta$   $\mathcal{D}$  szerinti alsó deriváltja az  $a \in G$  pontban

$$D_{\mathcal{D}}\vartheta(a) = \lim_{r \rightarrow 0^+} \inf \left\{ \frac{\vartheta(A)}{\lambda(A)} : (a, A) \in \mathcal{D}, A \subset B(a, r) \right\},$$

illetve

- a  $\vartheta$   $\mathcal{D}$  szerinti felső deriváltja az  $a \in G$  pontban

$$\overline{D}_{\mathcal{D}}\vartheta(a) = \lim_{r \rightarrow 0^+} \sup \left\{ \frac{\vartheta(A)}{\lambda(A)} : (a, A) \in \mathcal{D}, A \subset B(a, r) \right\}.$$

- Azt mondjuk, hogy  $a$   $\mathcal{D}$  bázis differenciálja  $\vartheta$ -t az  $a$  pontban, ha az alsó és a felső derivált egyenlő és véges. Ilyenkor  $D_{\mathcal{D}}\vartheta(a)$ -val is jelöljük. Ezzel ekvivalensen, a  $\mathcal{D}$  bázis differenciálja  $\vartheta$ -t az  $a$  pontban, és a derivált értéke  $D_{\mathcal{D}}\vartheta(a) = b \in \mathbb{R}$ , ha

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists r > 0 \quad \forall (a, A) \in \mathcal{D}, A \subset B(a, r) \quad \left| \frac{\vartheta(A)}{\lambda(A)} - b \right| < \varepsilon.$$

- Egy  $\vartheta$  komplex mérték akkor differenciálható, ha a valós és a képzetes része is differenciálható, és persze  $D_{\mathcal{D}}\vartheta(a) = D_{\mathcal{D}}(\operatorname{Re} \vartheta(a)) + i \cdot D_{\mathcal{D}}(\operatorname{Im} \vartheta(a))$ . A komplex mértékek definícióját az előző képlettel is definiálhatjuk.

## Példák

1. Legyen  $\vartheta$  egydimenziós Lebesgue-Stieltjes mérték, aminek az eloszlásfüggvénye  $F$ .

A  $\mathcal{D}_1 = \{(a, [a, a+r]) : a \in G, r > 0\}$  bázis szerinti derivált

$$D_{\mathcal{D}_1}\vartheta(a) = \lim_{r \rightarrow +0} \frac{\vartheta([a, a+r])}{\lambda([a, a+r])} = \lim_{r \rightarrow +0} \frac{F(a+r) - F(a)}{r} = F'(a+0);$$

a  $\mathcal{D}_2 = \{(a, [a-r, a]) : a \in G, r > 0\}$  bázis szerinti derivált

$$D_{\mathcal{D}_2}\vartheta(a) = \lim_{r \rightarrow +0} \frac{\vartheta([a-r, a])}{\lambda([a-r, a])} = \lim_{r \rightarrow +0} \frac{F(a) - F(a-r)}{r} = F'(a-0);$$

a  $\mathcal{D}_3 = \mathcal{D}_1 \cup \mathcal{D}_2$  bázis szerinti derivált  $F'(a)$ .

2. Szimmetrikus bázis:  $\mathcal{D} = \{(a, B(a, r)) : r > 0\}$ , a szimmetrikus bázis szerinti derivált a *szimmetrikus derivált*.

3. Kockabázis:  $\mathcal{D} = \{(a, Q) : Q \ni a \text{ tengelypárhuzamos, zárt kocka}\}$ , ebből lesz a *közönséges derivált*.

4. Téglabázis:  $\mathcal{D} = \{(x, T) : T \ni x \text{ tengelypárhuzamos, zárt tégl}\}$ , ebből lesz az *erős derivált*.

A szimmetrikus és a kockabázis egyenletesen reguláris, a téglabázis nem reguláris.

## Megjegyzés

Bár természetes lenne, de a differenciálbázis definíciójában nem kötjük ki, hogy az  $a$  pont benne legyen a halmazban; például a  $\mathcal{D}_2 = \{(a, [a-r, a]) : a \in G, r > 0\}$  differenciálbázisban a halmazok nem tartalmazzák az  $a$  pontot.

## Lemma

$$\overline{D}(\vartheta_1 + \vartheta_2) \leq \overline{D}\vartheta_1 + \overline{D}\vartheta_2$$

$$\underline{D}(\vartheta_1 + \vartheta_2) \geq \underline{D}\vartheta_1 + \underline{D}\vartheta_2$$

Ha  $\vartheta_1$  és  $\vartheta_2$  is differenciálható a  $\mathcal{D}$  bázisban, akkor

$$D(\vartheta_1 + \vartheta_2) = D\vartheta_1 + D\vartheta_2.$$

**Bizonyítás.** A lim sup szub-, illetve a lim inf szuperadditivitásából következik

A továbbiakban  $\mathcal{D}$  a szimmetrikus bázis, a legtöbb helyen nem is fogjuk kiírni. Sőt, egy darabig csak pozitív mértéket (ami majd a  $\vartheta$  totális variációja lesz) fogjuk

deriválni.

Először is azt fogjuk megmutatni, hogy Borel-mértékek deriváltjai Borel-mérhető függvények.

### Lemma

Ha  $\mu \geq 0$  Borel-mérték  $G$ -n, és  $0 < t \leq \infty$  rögzített, akkor az

$$f^t(x) = \sup \left\{ \frac{\mu(B(x, r))}{\lambda(B(x, r))} : 0 < r < t \right\}$$

függvény a.f.f., az

$$g^t(x) = \inf \left\{ \frac{\mu(B(x, r))}{\lambda(B(x, r))} : 0 < r < t \right\}$$

függvény f.f.f., ezért mindkettő Borel-mérhető.

**Bizonyítás.** (a) Rögzítsünk egy  $a \in G$  pontot és egy  $c < f^t(a)$  számot tetszőlegesen.

Vegyünk egy olyan  $c_1$ -et, amelyre  $c < c_1 < f^t(a)$ . Ehhez létezik olyan  $A = B(a, r)$  úgy, hogy  $r < t$  és  $\frac{\mu(A)}{\lambda(A)} > c_1$ .

Ha  $\delta \leq \frac{t-r}{2}$  és  $x \in B(a, \delta)$ , akkor  $B(a, r) \subset B(x, r+\delta) \subset B(a, r+2\delta) \subset B(a, t)$ ,

$$f^t(x) \geq \frac{\mu(B(x, r+\delta))}{\lambda(B(x, r+\delta))} \geq \frac{\mu(B(a, r))}{\left(\frac{r+\delta}{r}\right)^p \lambda(B(a, r))} > \left(\frac{r}{r+\delta}\right)^p c_1 > c,$$

az utolsó előtti egyenlőtlenség akkor igaz, ha  $\delta$  elég kicsi.

Tehát bármely  $c < f^t(a)$  esetén van olyan kicsi  $\delta > 0$ , hogy a  $B(a, \delta)$  környezetben  $f^t > c$ . Vagyis az  $f^t$  függvény a.f.f.

(b) Ugyanígy, vegyünk egy  $a \in G$  pontot és egy  $c > g^t(a)$  számot tetszőlegesen, majd ezekhez egy  $c_1$ -et, amelyre  $c > c_1 > g^t(a)$ . Ehhez létezik olyan  $A = B(a, r)$  úgy, hogy  $r < t$  és  $\frac{\mu(A)}{\lambda(A)} < c_1$ .

Ha  $\delta < r$  és  $x \in B(a, \delta)$ , akkor  $B(x, r-\delta) \subset B(a, r) \subset B(a, t)$ , és

$$g^t(x) \leq \frac{\mu(B(x, r-\delta))}{\lambda(B(x, r-\delta))} \leq \frac{\mu(B(a, r))}{\left(\frac{r-\delta}{r}\right)^p \lambda(B(a, r))} < \left(\frac{r}{r-\delta}\right)^p c_1 < c,$$

az utolsó egyenlőtlenség most is csak elég kicsi  $\delta$  esetén igaz.

Tehát bármely  $c > g^t(a)$  esetén van olyan kicsi  $\delta > 0$ , hogy a  $B(a, \delta)$  környezetben  $g^t < c$ . Vagyis a  $g^t$  függvény f.f.f.

## Lemma

Ha  $\mu \geq 0$  Borel-mérték  $G$ -n, akkor  $\overline{D}\mu$  és  $\underline{D}\mu$  Borel-mérhető.

**Bizonyítás.** Az előző lemma jelöléseivel

$$\overline{D}\mu(x) = \lim_{t \rightarrow +0} f^t(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f^{1/n}(x) \quad \text{és} \quad \underline{D}\mu(x) = \lim_{t \rightarrow +0} g^t(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} g^{1/n}(x),$$

ahol  $f^t(x)$  illetve  $g^t(x)$  az előző lemma szerint a.f.f. illetve f.f.f., tehát Borel-mérhetőek, és Borel-mérhetőek pontonkénti limesze is Borel-mérhető.

## 24. A maximális operátor tétele

Maximális operátor. A maximális operátor, az alsó és a felső derivált mérhetősége.  
A maximális operátor tétele. Lokálisan véges mérték alsó és felső deriváltja m.m. véges.

### Definíció (maximális operátor, maximális függvény)

Legyen  $\vartheta$  előjeles vagy komplex Borel-mérték, a totális variációja  $\tau$ , és legyen  $0 < t \leq \infty$ . Ekkor legyen

$$M^t \vartheta(x) = \sup \left\{ \frac{\tau(B(x, r))}{\lambda(B(x, r))} : 0 < r < t \right\}.$$

Ha  $t = \infty$ , akkor a jelölésből elhagyhatjuk a  $t$  indexet:  $M\vartheta$ . Ha  $\vartheta$  az  $f$  függvény integrálja, akkor írhatjuk azt is, hogy  $M^t f$  vagy  $Mf$ . Vagyis

$$Mf(x) = \sup \left\{ \frac{\int_{B(x, r)} |f| d\lambda}{\lambda(B(x, r))} : 0 < r \right\}$$

Az  $M^t$  neve *maximális operátor* (mert mértékhez vagy függvényhez rendel függvényt), az  $M^t \vartheta$  a *maximális függvény*.

Triviális, hogy ha  $\vartheta$  előjeles mérték, akkor  $-M\vartheta \leq \underline{D}\vartheta \leq \overline{D}\vartheta \leq M\vartheta$  (lim inf és lim sup az inf és sup között van).

### Lemma

Az  $M^t \vartheta$  maximális függvény a.f.f., tehát Borel-mérhető.

**Bizonyítás.** A 23 lemma első fele a  $\tau$  mértékre.

### Lemma

Véges sok gömb közül kiválaszthatóak páronként diszjunktak úgy, hogy a háromszorosuk az összes gömböt fedje (A  $B(a, r)$  gömb háromszorosa  $3B(a, r) = B(a, 3r)$ ).

**Bizonyítás.** Legyen a gömbök  $B_1, \dots, B_n$  sorrendje olyan, hogy  $r_1 \geq \dots \geq r_n > 0$

A gömbök közül kiválasztunk néhányat, amelyek páronként diszjunktak. Mőhőn, a gömbök mindegyikét sorban vagy kiválasztjuk, vagy nem. A  $B_1$ -et kiválasztjuk. A  $B_2$ -t akkor választjuk ki, ha nem metszi  $B_1$ -et. Ha a  $B_1, \dots, B_{k-1}$  gömbőkről már eldöntöttük, hogy kiválasztjuk-e: a  $B_k$  gömböt akkor választjuk ki, ha nem metszi egyik korábban kiválasztott gömböt sem.

Legyenek a kiválasztott gömbök  $B_{i_1}, \dots, B_{i_N}$ ; ezek páronként diszjunktak. Azt

állítjuk, hogy a 3-szorosra nagyított  $B(x_{i_1}, 3r_{i_1}), \dots, (x_{i_N}, 3r_{i_N})$  gömbök lefedik  $\bigcup_{i=1}^n B_i$ -t. Vegyünk egy tetszőleges  $x \in \bigcup_{i=1}^n B_i$  pontot; ezt valamelyik  $B_k$  gömb lefedi. Ha  $B_k$  kiválasztott gömb, akkor ennek 3-szoros nagyítása is fedi  $x$ -et. Ha  $B_k$  nem kiválasztott, akkor belemetsz egy nála korábban kiválasztott, tehát egy nála nem kisebb kiválasztott gömbbe: legyen ez  $B_j$ , és legyen  $y$  a  $B_k$  és  $B_j$  gömbök egy közös pontja. Ekkor  $|x - x_j| \leq |x - x_k| + |x_k - y| + |y - x_j| < r_k + r_k + r_j \leq 3r_j$ , így  $x \in B(x_j, 3r_j)$ .

### Lemma (A maximális operátor tétele)

Ha  $\vartheta$  véges előjeles vagy komplex mérték a  $G \subset \mathbb{R}^p$  halmazon, és  $t > 0$ , akkor

$$\lambda(M\vartheta > t) \leq \frac{3^p \tau(G)}{t}.$$

**Bizonyítás.** Ha  $K \subset G(M\vartheta > t)$  kompakt, akkor minden  $x \in K$ -hoz van olyan  $r = r(x)$  sugár, amelyre  $\frac{\tau(B(x,r))}{\lambda(B(x,r))} > t$ .  $\bigcup_{x \in K} B(x, r(x))$  lefedi  $K$ -t; a kompaktság miatt kiválasztható közülük egy véges fedés; ezt a sugarak szerint csökkenő sorrendbe tesszük. Tehát vannak olyan  $x_1, \dots, x_n \in K$  pontok és  $r_1 \geq \dots \geq r_n > 0$  sugarak, avagy  $B_k = B(x_k, r_k)$  gömbök, amelyek fedik  $K$ -t.

Ezek után alkalmazzuk az előző lemmát a gömbökre, kapunk olyan diszjunkt  $B_{i_1}, \dots, B_{i_N}$  gömböket, amelyekre  $K \subset \bigcup_{k=1}^N 3B_{i_k}$ . Tehát

$$\lambda(K) \leq \sum_{k=1}^N \lambda(B(x_{i_k}, 3r_{i_k})) = 3^p \sum_{k=1}^N \lambda(B(x_{i_k}, r_{i_k})) < 3^p \sum_{k=1}^N \frac{\tau(B(x_{i_k}, r_{i_k}))}{t} \leq \frac{3^p \tau(G)}{t}.$$

Ez minden kompakt  $K \subset G$ -re igaz, tehát a Lebesgue-mérték regularitása miatt a  $G(M\vartheta > t)$  halmazra is.

### Következmény

Ha  $\vartheta$  lokálisan véges, akkor  $\underline{D}\vartheta$  és  $\overline{D}\vartheta$  is  $\lambda$ -m.m. véges.

**Bizonyítás.** A  $G$  felbomlik megszámlálható sok olyan  $G_1, G_2, \dots$  gömbre, amelyen  $\tau$  véges. Legyen  $\vartheta_n(H) = \vartheta(H \cap G_n)$ ; ez egy véges előjeles mérték; az  $G_n$  gömbön belül  $\vartheta$  és  $\vartheta_n$  alsó és felső deriváltja megegyezik.

Mivel  $-M\vartheta_n \leq \underline{D}\vartheta_n \leq \overline{D}\vartheta_n \leq M\vartheta_n$ , bármely  $t > 0$  esetén

$$\lambda(|\overline{D}\vartheta_n| = \infty) \leq \lambda(M\vartheta_n = \infty) \leq \lambda(M\vartheta_n > t) \leq \frac{3^p \tau_n(G)}{t}.$$

Az  $t \rightarrow \infty$  határátmenetből

$$\lambda(|\overline{D}\vartheta_n| = \infty) = 0.$$

A  $G_n$  belsejében tehát  $\overline{D}\vartheta$  m.m. véges, tehát a gömbök unióján is.

## 25. Borel-mértékek differenciálása

Lokálisan véges Borel-mérték akkor és csak akkor szinguláris, ha a deriváltja m.m. 0. Lebesgue-pont. Abszolút folytonos mérték m.m. differenciálható, és a deriváltja megegyezik a Radon–Nikodym deriválttal. Mérhető burok. Alsó és felső sűrűség. Sűrűségi tétel. [Petruska, 100–105. o.]

### Lebesgue-pontok

#### Definíció

Legyen  $H \subset \mathbb{R}^p$ ,  $f : H \rightarrow \mathbb{R}$  vagy  $f : H \rightarrow \mathbb{C}$  mérhető. Az  $x_0 \in \text{int } H$  pont az  $f$  függvénynek *Lebesgue-pontja*, ha

$$\lim_{r \rightarrow 0^+} \frac{\int_{B(x_0, r)} |f - f(x_0)| d\lambda}{\lambda(B(x_0, r))} = 0.$$

Trivi, hogy minden folytonossági pont Lebesgue-pont.

#### Definíció

Az  $f$  függvényt lokálisan integrálhatónak nevezzük  $H$ -n, ha minden pontnak van olyan környezete, amelyen az integrál véges, vagy ezzel ekvivalensen, minden  $K \subset H$  kompakt halmazon az integrál véges.

#### Tétel

Ha  $f$  lokálisan integrálható  $H$ -n, akkor  $H$  m.m. belső pontja Lebesgue-pontja  $H$ -nak.

**Bizonyítás.** A  $H$ -t lefedhetjük olyan gömbökkel, amelyeken  $f$  integrálható, így elég integrálható  $f$ -re bizonyítani, vagyis  $f \in L_1$  esetén.

Rögzítsünk két pozitív egészt,  $k$ -t és  $m$ -et.

Az integrálható függvények terében sűrűn vannak az olyan "szép" függvények, amelyek véges sok téglalapon konstansok, azokon kívül az értékük 0. Legyen  $g$  egy olyan szép függvény, amelyre  $\int_G |f - g| d\lambda < \frac{1}{k}$ , és legyen  $h = f - g$ ; ekkor tehát  $\int_G |h| d\lambda < \frac{1}{k}$ .

Ha egy  $x$  pont nem esik egyik téglalap határára sem, akkor  $x$  egy kis környezetében  $g$  konstans, és így

$$\int_{B(x, r)} |f - f(x)| d\lambda = \int_{B(x, r)} |h - h(x)| d\lambda \leq \int_{B(x, r)} (|h| + |h(x)|) d\lambda,$$

$$\frac{\int_{B(x,r)} |f - f(x)| d\lambda}{\lambda(B(x,r))} \leq |h(x)| + \frac{\int_{B(x,r)} |h| d\lambda}{\lambda(B(x,r))} \leq |h(x)| + Mh(x),$$

$$\limsup_{r \rightarrow 0+} \frac{\int_{B(x,r)} |f - f(x)| d\lambda}{\lambda(B(x,r))} \leq |h(x)| + Mh(x).$$

Ha az  $x$  pontban  $\limsup_{r \rightarrow 0+} \frac{\int_{B(x,r)} |f - f(x)| d\lambda}{\lambda(B(x,r))} > \frac{1}{m}$ , akkor ott  $|h(x)|$  és  $Mh(x)$  valamelyike legalább  $\frac{1}{2m}$ . Ezért

$$\begin{aligned} \lambda \left( \limsup_{r \rightarrow 0+} \frac{\int_{B(x,r)} |f - f(x)| d\lambda}{\lambda(B(x,r))} > \frac{1}{m} \right) &\leq \lambda \left( |h| > \frac{1}{2m} \right) + \lambda \left( Mh > \frac{1}{2m} \right) \leq \\ &\leq \frac{\int |h| d\lambda}{1/2m} + \frac{3^p \int |h| d\lambda}{1/2m} = 2m(1 + 3^p) \int_G |h| d\lambda < \frac{2m(1 + 3^p)}{k}. \end{aligned}$$

Ebből  $k \rightarrow \infty$ , majd  $m \rightarrow \infty$  határátmenettel

$$\lambda \left( \limsup_{r \rightarrow 0+} \frac{\int_{B(x,r)} |f - f(x)| d\lambda}{\lambda(B(x,r))} > \frac{1}{m} \right) = 0,$$

$$\lambda \left( \limsup_{r \rightarrow 0+} \frac{\int_{B(x,r)} |f - f(x)| d\lambda}{\lambda(B(x,r))} > 0 \right) = 0.$$

19

## Derivált és Radon–Nikodym derivált

### Lemma

Ha  $\mu \geq 0$  lok. véges, szinguláris Borel-mérték, akkor  $D\mu = 0$  m.m.

**Bizonyítás.** A 24. következményhez hasonlóan elég zárt gömbök belsejére bizonyítani, ezért az is feltehető, hogy  $\mu$  véges.

Rögzítsünk két pozitív egészt,  $k$ -t és  $m$ -et.

Legyen  $H$  a  $\beta$  egy Lebesgue-nullmértékű tartója. A  $\mu$  lok. véges Borel-mérték, tehát reguláris; van olyan  $K \subset H$  kompakt halmaz, amelyre  $\mu(G \setminus K) < \frac{1}{k}$ .

Legyen  $\vartheta(A) = \mu(A \setminus K)$ ; ekkor persze  $\vartheta$  totális variációja  $\mu(A \setminus K)$ . A  $K$  komplementuma nyílt, ezen  $\vartheta$  és  $\mu$  alsó és felső deriváltja ugyanaz, tehát  $\overline{D}\vartheta = \overline{D}\mu$  és  $\underline{D}\vartheta = \underline{D}\mu$   $\lambda$ -m.m.

Ezek után

$$\lambda \left( \overline{D}\mu > \frac{1}{m} \right) = \lambda \left( \overline{D}\vartheta > \frac{1}{m} \right) \leq \lambda \left( M\vartheta > \frac{1}{m} \right) \leq \frac{3^p \mu(G \setminus K)}{1/m} < \frac{3^p m}{k}.$$



$k \rightarrow \infty$  majd  $m \rightarrow \infty$ ,

$$\forall m \quad \lambda \left( \overline{D}\mu > \frac{1}{m} \right) = 0$$

$$\lambda(\overline{D}\mu > 0) = 0.$$

### Következmény

Legyen  $\mathcal{D}$  reguláris differenciálbázis,  $\beta$  lok. véges, szinguláris előjeles vagy komplex mérték. Ekkor  $D_{\mathcal{D}}\beta = 0$   $\lambda$ -m.m.

**Bizonyítás.** 1. eset:  $\beta \geq 0$  mérték. Ha  $(x_0, A) \in \mathcal{D}$ ,  $A \subset B(x_0, r)$  és  $\lambda(A) > \rho \cdot \lambda(B(x_0, r))$ , akkor

$$\left| \frac{\beta(A)}{\lambda(A)} \right| < \frac{\beta(B(x_0, r))}{\rho \cdot \lambda(B(x_0, r))} \rightarrow \frac{1}{\rho} D\mu(x_0) = 0 \quad \text{m.m. } x_0\text{-ra.}$$

2. eset:  $\beta$  előjeles mérték, a Jordan-felbontása  $\pi - \nu$ . Az előző rész szerint  $D\pi = D\nu = 0$  m.m.

3. eset:  $\beta$  komplex mérték. Ekkor  $D(\operatorname{Re} \beta) = D(\operatorname{Im} \beta) = 0$  m.m.

### 25.1 Tétel (Mértékek differenciálásának fő tétele)

Legyen  $\mathcal{D}$  reguláris differenciálbázis,  $\vartheta$  lok. véges előjeles vagy komplex mérték, a Lebesgue-felbontása  $\vartheta = \int f d\lambda + \beta$ . Ekkor  $D_{\mathcal{D}}\vartheta = f$   $\lambda$ -m.m.

**Bizonyítás.** Legyen  $\alpha = \int f d\lambda$ ; megmutatjuk, hogy az  $f$  minden Lebesgue-pontjában  $D\alpha = f$ . Mivel  $D\beta = 0$  m.m., ez elég is.

Legyen tehát  $x_0$  Lebesgue-pont, és  $0 < \rho = \rho(x_0) \leq 1$  a differenciálbázis regularitásában szereplő arány. Ha  $A \subset B(x_0, r)$  és  $\lambda(A) > \rho \cdot \lambda(B(x_0, r))$ , akkor

$$\left| \frac{\alpha(A)}{\lambda(A)} - f(x_0) \right| = \left| \frac{\int_A (f - f(x_0)) d\lambda}{\lambda(A)} \right| \leq \frac{\int_A |f - f(x_0)| d\lambda}{\lambda(A)} \leq \frac{\int_{B(x_0, r)} |f - f(x_0)| d\lambda}{\rho \cdot \lambda(B(x_0, r))} \rightarrow 0.$$

### 25.2 Tétel

Egy  $\beta$  lok. véges előjeles vagy komplex mérték akkor és csak akkor szinguláris, ha  $D\beta = 0$   $\lambda$ -m.m.

## 26. A sűrűségi tétel

### Definíció

$H \subset \mathbb{R}^p$ -nek  $A$  mérhető burka, ha  $A \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^p)$ ,  $A \supset H$  és (\*) minden  $B \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^p)$ ,  $B \supset H$ -ra  $\lambda(A \setminus B) = 0$ , avagy, minden  $B \in \mathcal{L}(\mathbb{R}^p)$ ,  $H \subset B \subset A$ -ra  $\lambda(A \setminus B) = 0$ .

### Lemma

1. Minden halmaznak létezik mérhető burka; még  $G_\delta$  is.
2. Ha  $M_1$  és  $M_2$  is mérhető burok, akkor  $\lambda(M_1 \triangle M_2) = 0$ .
3. Ha  $M$  mérhető burok és  $A$  mérhető, akkor  $M \cap A$  mérhető burka  $H \cap A$ -nak.

**Bizonyítás.** 1. Tekintsünk egy tetszőleges  $H \subset \mathbb{R}^p$  halmazt; ehhez konstruálunk mérhető burkot.

Osszuk fel a teret korlátos kockákra:  $\mathbb{R}^p = \bigcup_{n=1}^{\infty} K_n$ , és legyen a  $H$  halmaznak az  $n$ -edik kockába eső része  $H_n = H \cap K_n$ .

Vegyünk minden  $k$ -hoz és  $n$ -hez egy olyan  $G_{n,k}$  nyílt halmazt, ami  $1/k$ -nál pontosabban fedi a  $H_n$  halmazt:  $H_n \subset G_{n,k}$ ,  $\lambda(G_{n,k}) < \bar{\lambda}(H \cap K_n) + \frac{1}{k}$ . Ezek után legyen

$$M_n = \bigcap_{k=1}^{\infty} G_{n,k}, \quad M = \bigcup_{n=1}^{\infty} M_n.$$

Azt állítjuk, hogy  $M$  mérhető burka  $H$ -nak. Az trivi, hogy  $M$  is mérhető,  $M_n \supset H_n$  és  $M \supset H$ .

A (\*) ellenőrzéséhez vegyünk egy tetszőleges  $B \supset H$  mérhető halmazt. A  $K_n$  kockában  $H_n \subset B \cap M_n \subset M_n$ , ezért minden  $k$ -ra

$$\bar{\lambda}(H_n) \leq \lambda(B \cap M_n) \leq \lambda(M_n) \leq \lambda(G_{n,k}) < \bar{\lambda}(H_n) + \frac{1}{k};$$

A  $k \rightarrow \infty$  határátmenetből

$$\lambda(B \cap M_n) = \lambda(M_n) = \bar{\lambda}(H_n),$$

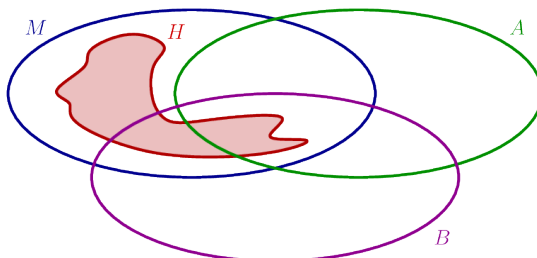
a kettő különbségéből  $\lambda(M_n \setminus B) = 0$ , végül

$$\lambda(M \setminus B) = \sum_{n=1}^{\infty} \lambda(M_n \setminus B) = 0.$$

Ez így még nem feltétlenül  $G_\delta$ , de a regularitás miatt vehetjük a mérhető burok  $G_\delta$  burkát.

2. Mivel  $M_1$  és  $M_2 \supset H$ , a mérhető burok definíciójából  $\lambda(M_2 \setminus M_1) = 0$ . Az  $M_1, M_2$  felcserélésével  $\lambda(M_1 \setminus M_2) = 0$ .

3. Az világos, hogy  $M \cap A$  mérhető és tartalmazza  $H \cap A$ -t; ismét csak  $(*)$ -t kell ellenőrizni. Tegyük fel, hogy  $B$  mérhető és  $B \supset H \cap A$ . Mivel  $B$  fedi a  $H \cap A$  halmazt, Az  $M$  pedig a teljes  $H$  halmazt,  $H$ -nak nem lehet eleme az  $(M \cap A) \setminus B$  atomban:



Akkor viszont  $H$ -t fedi az  $M \setminus ((M \cap A) \setminus B)$ , és így, mivel  $M$  mérhető burka  $H$ -nak,

$$\lambda((M \cap A) \setminus B) = 0.$$

### Definíció

Legyen  $H \subset \mathbb{R}^p$ , a mérhető burka  $M$ , és tekintsük a  $\mu(A) = \bar{\lambda}(A \cap H) = \lambda(A \cap M)$  mértéket. A  $H$  halmaz alsó és felső sűrűsége az  $x \in \mathbb{R}^p$  pontban

$$\bar{d}(x, H) = \bar{D}\mu(x) = \limsup_{r \rightarrow 0^+} \frac{\bar{\lambda}(B(x, r) \cap H)}{\lambda(B(x, r))},$$

illetve

$$\underline{d}(x, H) = \underline{D}\mu(x) = \liminf_{r \rightarrow 0^+} \frac{\bar{\lambda}(B(x, r) \cap H)}{\lambda(B(x, r))},$$

sűrűsége

$$d(x, H) = D\mu(x) = \lim_{r \rightarrow 0^+} \frac{\bar{\lambda}(B(x, r) \cap H)}{\lambda(B(x, r))}.$$

Az  $x$  a  $H$ -nak sűrűségi pontja, ha  $d(x, H) = 1$ .

### Tétel (Lebesgue-féle sűrűségi tétel)

(a) m.m.  $x \in H$  sűrűségi pont.

(b)  $H$  akkor és csak akkor Lebesgue-mérhető, ha m.m.  $x \notin H$ -ra  $d(x, H) = 0$ .

**Bizonyítás.** (a) Legyen  $M$  mérhető burka  $H$ -nak és  $f = \chi_M$ . Ekkor  $\mu(A) = \lambda(A \cap M) = \int_A f d\lambda$ . Ezért  $D\mu = \chi_M$  m.m.; speciálisan m.m.  $x \in H \subset M$ -re  $D\mu(x) = 1$ .

(b) Legyen  $N$  az  $\mathbb{R}^p \setminus H$  mérhető burka,  $\nu(A) = \lambda(A \cap N)$  és  $g = \chi_N$ .

Ha  $H$  mérhető, akkor lehet  $M = H$  és  $N = \mathbb{R}^p \setminus H$ , és a két sűrűség is komplementere egymásnak.

Ha  $H$  nem mérhető, akkor  $\lambda(M \cap N) > 0$ . Ugyanis  $\mathbb{R}^p \setminus N \subset H \subset M$ , vagyis  $H$  két mérhető halmaz közé esik, ezek különbsége nem lehet nullmértékű. A különbség viszont éppen  $M \cap N$ . A metszet pontjaiban  $H$  sűrűsége 1 m.m.

## 27. Abszolút folytonos függvények

Abszolút folytonos függvény. A Lipschitz-tulajdonság, az abszolút folytonosság és a folytonosság kapcsolata. Monoton növekvő függvény abszolút folytonosságának átfogalmazása a megváltozásból származó mértékkel és Radon–Nikodym deriválttal.

Most azzal fogunk játszani, hogy a Borel-mértékek differenciálásáról szóló tételünket átírjuk az eloszlásfüggvényeikre.

### Definíció (abszolút folytonos függvény)

- Egy  $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  függvényt *abszolút folytonosnak* mondunk, ha minden  $\varepsilon > 0$ -hoz van olyan  $\delta > 0$ , hogy bármely  $n$  és  $a \leq x_1 < y_1 \leq x_2 < y_2 \leq \dots \leq x_n < y_n \leq b$ ,  $\sum (y_i - x_i) < \delta$  esetén  $\sum |f(y_i) - f(x_i)| < \varepsilon$ .
- Egy  $I$  nyílt intervallumon értelmezett függvényt *abszolút folytonosnak* mondunk, ha minden  $[a, b] \subset I$  intervallumon abszolút folytonos.

### Trivialitás

$F$  Lipschitz  $\Rightarrow F$  abszolút folytonos  $\Rightarrow F$  folytonos.

### 27.1 Lemma

Legyen  $I \subset \mathbb{R}$  intervallum,  $F : I \rightarrow \mathbb{R}$  monoton növekvő,  $\varphi_F$  a megváltozásából származó Lebesgue-Stieltjes mérték. Ezek ekvivalensek:

- (1)  $F$  abszolút folytonos.
- (2) A  $\varphi_F$  mérték abszolút folytonos a Lebesgue-mértékre nézve.
- (3) Van olyan  $f \geq 0$  mérhető függvény, aminek  $F$  integrálfüggvénye, és  $f = F'$  m.m.

20

**Bizonyítás.** (1)  $\implies$  (2): Tekintsünk egy tetszőleges  $N \subset I$  nullmértékű halmazt; azt kell igazolnunk, hogy  $\varphi_F(N) = 0$ . A  $\varphi_F$  reguláris, ezért elég ezt az  $N$  kompakt részeire igazolni. Legyen tehát  $K \subset I$  kompakt,  $\lambda(K) = 0$ . A  $K$  benne van egy  $[a, b] \subset I$  intervallum belsejében:  $K \subset (a, b) \subset [a, b] \subset I$ .

Tetszőleges  $\varepsilon$ -hoz vegyünk egy, az (1) tulajdonságnak megfelelő  $\delta$ -t. Fedjük le  $K$ -t nyílt intervallumokkal, amelyek Lebesgue-összmértéke  $\delta$ -nál kisebb. Ebből válasszunk ki egy véges fedést. A fedésben lehetnek többszörösen fedett részek, de a fedés uniója mindenképpen véges sok diszjunkt relatív nyílt intervallumból

áll; legyenek ezek  $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ . A fedés Lebesgue-mértéke

$$\sum_{i=1}^n (y_i - x_i) < \delta,$$

a (3) tulajdonság alapján

$$\varphi_F(K) \leq \sum_{i=1}^n \varphi_F((x_i, y_i)) \leq \sum_{i=1}^n \varphi_F(F(y_i) - F(x_i)) < \varepsilon.$$

Az  $\varepsilon \rightarrow 0$  határátmenetből  $\varphi_F(K) = 0$ .

(2)  $\implies$  (3): Először is  $\varphi_F \ll \lambda$ , ezért minden pont mértéke 0, és ezért  $F$  folytonos.

Legyen  $f = \frac{d\varphi_F}{d\lambda}$ , ekkor tehát a  $F$  a  $f$ -nek integrálfüggvénye.

A  $\mathcal{D} = \{[x, x+r), [x-r, x) : x \in I, r > 0\}$  reguláris differenciálbázisban a 25 tétel szerint  $F' = D_{\mathcal{D}}\varphi_F = f$  m.m.

(3)  $\implies$  (1): Legyen  $[a, b] \subset I$  és  $\varepsilon > 0$  adott, ezekhez szeretnénk megfelelő  $\delta > 0$  számot találni.

Az  $f$  függvény integrálható  $[a, b]$ -n, ezért van olyan szép  $g : [a, b] \rightarrow [0, \infty)$  függvény, amely tehát véges sok szakaszon konstans, és  $\int_{[a,b]} |f - g| d\lambda < \frac{\varepsilon}{2}$ . Legyen  $K = \max g + 1$ . Azt állítjuk, hogy  $\delta = \frac{\varepsilon}{2K}$  jó lesz.

Tekintsünk egy tetszőleges  $a \leq x_1 < y_1 \leq x_2 < y_2 \leq \dots \leq x_n < y_n \leq b$  intervallumsorozatot, amelyre  $\sum_{i=1}^n (y_i - x_i) < \delta$ . Erre a sorozatra

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n (F(y_i) - F(x_i)) &= \sum_{i=1}^n \int_{[x_i, y_i]} f d\lambda \leq \sum_{i=1}^n \int_{[x_i, y_i]} (g + |f - g|) d\lambda \leq \\ &\leq \sum_{i=1}^n \int_{[x_i, y_i]} K d\lambda + \int_{[a,b]} |f - g| d\lambda \leq \sum_{i=1}^n K(y_i - x_i) + \frac{\varepsilon}{2} < K\delta + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon. \end{aligned}$$

## Megjegyzés

Nyílt intervallumon a terminológia nem egyértelmű. Sokan ott is ugyanezt az epszilon-deltás tulajdonságot követelik meg, és *lokálisan abszolút folytonos*-nak hívják azt, amit mi abszolút folytonosnak hívunk.

A [https://en.wikipedia.org/wiki/Absolute\\_continuity](https://en.wikipedia.org/wiki/Absolute_continuity) Wikipédia oldalon például az a definíció, hogy bármilyen  $I$  intervallumon  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  akkor abszolút folytonos, ha minden  $\varepsilon > 0$ -hoz van olyan  $\delta > 0$ , hogy bármely  $(a_1, b_1), \dots, (a_n, b_n) \subset I$ , páronként diszjunkt intervallumok és  $\sum (y_i - x_i) < \delta$  esetén  $\sum |f(b_i) - f(a_i)| < \varepsilon$ . Majd (hamisan) azt állítják, hogy ezzel ekvivalens, hogy  $f'$  m.m. létezik, és  $f$  az  $f'$  integrálfüggvénye. Érdeemes kipróbálni mondjuk az  $f(x) = x^2$  függvényre.

## 28. Szinguláris függvények

Szinguláris függvény. Monoton növekvő függvény szingularitásának átfogalmazása a megváltozásból származó mértékkel. Lebesgue-felbontás. Minden monoton függvény m.m. differenciálható. Fubini-tétel monoton függvények összegének tagonkénti differenciálásáról. Newton–Leibniz formula.

### Definíció

Legyen  $I \subset \mathbb{R}$  intervallum. Egy  $F : I \rightarrow \mathbb{R}$  függvényt *szingulárisnak* nevezünk, ha  $F' = 0$  m.m.

### 28.1 Lemma

Legyen  $I \subset \mathbb{R}$  intervallum,  $F : I \rightarrow \mathbb{R}$  monoton növekvő,  $\varphi_F$  a megváltozásából származó Lebesgue-Stieltjes mérték. Ezek ekvivalensek:

- (1)  $F$  szinguláris.
- (2) A  $\varphi_F$  mérték abszolút szinguláris a Lebesgue-mértékre nézve.

**Bizonyítás.** A 25 tételt akarjuk alkalmazni. Legyen  $\mathcal{D} = \{[x, x+r), [x-r, x) : x \in I, r > 0\}$  és  $D\varphi_F$ ; Vegyük észre, hogy

$$\frac{\varphi_F([x-r, x+r))}{2r} \leq \max\left(\frac{\varphi_F([x-r, x))}{r}, \frac{\varphi_F([x, x+r))}{r}\right) \leq 2 \frac{\varphi_F([x-r, x+r))}{2r}.$$

Az  $r \rightarrow +0$  határátmenetből

$$0 \leq \overline{D}\varphi_F(x) \leq \underline{F}'(x) \leq \overline{F}'(x) \leq 2\overline{D}\varphi_F(x).$$

Ezért  $F$  szinguláris  $\Leftrightarrow F' = 0$  m.m.  $\Leftrightarrow \overline{D}\varphi_F = 0$  m.m.  $\Leftrightarrow \varphi_F$  szinguláris.

### Megjegyzés

Itt sem egyértelmű a terminológia. Van, aki csak folytonos függvényekre definiálja a szingularitást, itten kezdve baj lesz a Lebesgue-felbontással. Van aki a konstans nulla függvényt nem hívja szingulárisnak, szerinte a szinguláris függvények nem alkotnak vektorteret.

## Példa

A  $c(x)$  Cantor-függvény folytonos, és szinguláris, nem abszolút folytonos. (A függvényt definiáljuk úgy, hogy a  $(-\infty, 0]$  intervallumon 0, az  $[1, \infty)$  intervallumon konstans 1 legyen.) A  $c(x)$  a szinguláris Cantor-mérték eloszlásfüggvénye.

Végtelen sok szinguláris, folytonos mérték összegéből nyerhetünk szigorúan monoton, folytonos, szinguláris függvényt: ha  $q_1, q_2, \dots$  a racionális számok egy felsorolása, akkor az

$$F(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2^k} c(x - q_k)$$

szigorúan monoton növekvő, az egyenletes konvergencia miatt folytonos, és szinguláris is, mert  $\varphi_F$  megszámlálható sok szinguláris mérték összege. Szóval  $f$  folytonos, monoton nő, és majdnem mindenhol 0 a deriváltja...

## Lebesgue-felbontás

### Tétel (Lebesgue-felbontás)

Minden monoton növekvő függvény felbomlik egy abszolút folytonos és egy szinguláris függvény összegére.

**Bizonyítás.** Tegyük fel, hogy  $F : I \rightarrow \mathbb{R}$  monoton nő,  $x_0$  egy folytonossági pontja, és legyen  $\varphi_F$  Lebesgue-felbontása  $\varphi_F = \alpha + \beta$ .

Vegyük  $\alpha$ -nak és  $\beta$ -nak egy-egy  $a(x)$ , illetve  $b(x)$  eloszlásfüggvényét úgy, hogy  $a(x_0) + b(x_0) = f(x_0)$ . Ekkor bármely  $x > x_0$  folytonossági pontban

$$F(x) = F(x_0) + \varphi_F([x_0, x]) = a(x_0) + b(x_0) + \alpha([x_0, x]) + \beta([x_0, x]) = a(x) + b(x).$$

Az  $f$  szakadási pontjában  $b$  értékét megváltoztathatjuk úgy, hogy  $f = a + b$  mindenhol teljesüljön.

### Tétel

Ha  $F$  monoton, akkor m.m. differenciálható.

**Bizonyítás.** Az  $F$  abszolút folytonos és a szinguláris része is m.m. differenciálható.



### Tétel (Fubini)

Ha  $I \subset \mathbb{R}$  intervallum,  $F_n : I \rightarrow \mathbb{R}$  monoton növekvő és  $\sum F_n$  minden pontban konvergens, akkor

$$\left( \sum_{n=1}^{\infty} F_n \right)' = \sum_{n=1}^{\infty} F_n' \quad \text{m.m.}$$

**Bizonyítás.** Legyen az  $F_n$  megváltozásából származó LS mérték és ennek Lebesgue-felbontása  $\varphi_n = \alpha_n + \beta_n$ , az  $\alpha_n$  RN deriváltja  $f_n \geq 0$ , és legyen  $\varphi = \sum \varphi_n$ ,  $\alpha = \sum \alpha_n$  (ami absz. folyt.) és  $\beta = \sum \beta_n$  (ami szinguláris).

Az  $S = \sum F_n$  függvény a  $\varphi = \alpha + \beta$  mértéknek eloszlásfüggvénye, mert  $S(b) - S(a) = \sum (F_n(b) - F_n(a)) = \sum \varphi_n([a, b])$ .

$$\alpha = \sum \alpha_n = \sum \int f_n d\lambda \stackrel{\text{BL}}{=} \int \left( \sum f_n \right) d\lambda,$$

vagyis  $\varphi$  abszolút folytonos részének Radon–Nikodym deriváltja  $\sum f_n$ . A 25. tétel szerint

$$S' = \frac{d\varphi}{d\lambda} = \sum f_n = \sum F_n' \quad \lambda\text{-m.m.}$$

## Newton–Leibniz formula

### Lemma

Ha  $F$  monoton nő, szinguláris és nem konstans, akkor van olyan pont, ahol  $\overline{F'} = \infty$ .

**Bizonyítás.** Tegyük fel, hogy  $F(a) < F(b)$  és legyen  $\varphi_F$  az  $F$  megváltozásából kapott Lebesgue–Stieltjes mérték. Mivel  $\varphi_F$  szinguláris, ezért van olyan nullmértékű  $H \subset [a, b]$  halmaz, amelyre  $\varphi_F(H) = \varphi_F([a, b]) = F(b) - F(a) > 0$ . Fedjük le  $H$ -t nagyon kis összhosszúságú intervallumokkal. Ekkor valamelyikben nagy lesz  $F$  meredeksége a két végpont között. Erre az intervallumra ugyanezt eljátszva, majd ezt ismételve, az intervallumok metszetében kapunk egy pontot, amelyben végtelen a felső derivált.

### Tétel (Newton–Leibniz formula)

Ha  $F$  monoton nő, mindenhol differenciálható, akkor abszolút folytonos, és  $F(b) - F(a) = \int_{[a,b]} F' d\lambda$ .

# Korlátos változású függvények

A korlátos változású függvényekre ezek könnyen kiterjeszthetőek. A továbbiakban  $F$  *lokálisan* korlátos változású lesz.

## Definíció

Legyen  $I \subset \mathbb{R}$  intervallum,  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ . Az  $f$  függvény *lokálisan korlátos változású*, ha  $I$  minden kompakt részintervallumán korlátos változású.

## Lemma

Egy  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  függvény akkor és csak akkor lokálisan korlátos változású, ha két monoton növekvő függvény különbsége.

**Bizonyítás.** Válasszunk egy  $x_0 \in I$  kezdőpontot, és legyen

$$g(x) = \begin{cases} V(f, [x_0, x]) & x \geq x_0 \\ -V(f, [x, x_0]) & x < x_0 \end{cases}, \quad h(x) = g(x) - f(x).$$

## Következmény

Legyen  $F : I \rightarrow \mathbb{R}$  (vagy  $F : I \rightarrow \mathbb{C}$ ), ekkor  
 $F$  Lipschitz  $\Rightarrow F$  abszolút folytonos  $\Rightarrow F$  folytonos és lok. k.v.

## Lemma

Ha  $F : I \rightarrow \mathbb{R}$  (vagy  $F : I \rightarrow \mathbb{C}$ ) korlátos változású, akkor az  $F$  folytonossági intervallumain értelmezett  $\varphi([a, b]) = F(b) - F(a)$  intervallumfüggvény kiterjeszthető előjeles (komplex) Borel-mértékké.

**Bizonyítás.** Az  $F$  felbomlik két monoton növekvő függvény különbségére. Ezekből egy-egy véges LS mértéket készíthetünk, ezek különbsége egy előjeles mérték, ami az  $F$  megváltozásának kiterjesztése.

## Következmény

Legyen  $I \subset \mathbb{R}$  intervallum,  $F : I \rightarrow \mathbb{R}$  lok. k.v,  $\varphi_F$  a megváltozásából származó előjeles/komplex Lebesgue-Stieltjes mérték. Ezek ekvivalensek:

- (1)  $F$  abszolút folytonos.
- (2) A  $\varphi_F$  mérték abszolút folytonos a Lebesgue-mértékre nézve.
- (3) Van olyan  $f$  mérhető függvény, aminek  $F$  integrálfüggvénye, és  $f = F'$  m.m.

### Következmény

Az  $F : I \rightarrow \mathbb{C}$  lok.kv. függvény akkor és csak akkor szinguláris, ha az  $F$  megváltozásából származó előjeles/komplex Lebesgue–Stieltjes mérték szinguláris.

### Következmény

Minden lok. k.v. függvény felbomlik egy abszolút folytonos és egy szinguláris függvény összegére.

### Következmény

Ha  $F$  lokásan korlátos változású, akkor m.m. differenciálható.



# VI. rész

## Szorzatmértékek

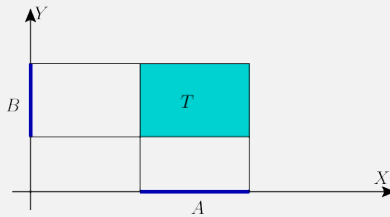
### 29. Véges sok mértéktér szorzata

$\sigma$ -additivitás két mértéktér direkt szorzatán. Két mértéktér szorzata. Fubini-tétel (bizonyítás nélkül). Véges sok mértéktér szorzata. [Petruska, 121, 123–124. o.]

### Két mértéktér szorzata

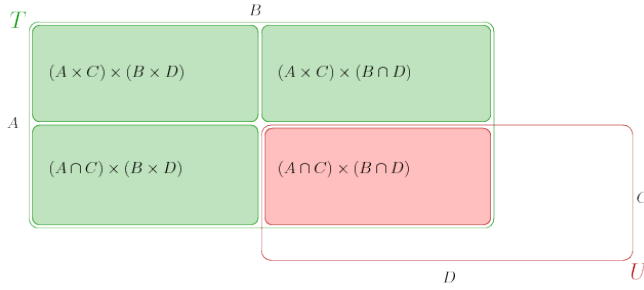
#### 29.1 Lemma

Legyen  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  és  $(Y, \mathcal{N}, \nu)$  két mértéktér.



- (a) A  $\mathcal{T} = \{A \times B : A \in \mathcal{M}, B \in \mathcal{N}\}$ , a "téglák" halmaza félgűrű;
- (b) A  $\mathcal{T}$  félgűrűn az  $\alpha(A \times B) = \mu(A) \cdot \nu(B)$  halmazfüggvény  $\sigma$ -additív,  $\sigma$ -szubadditív, és additív.

**Bizonyítás.** (a) Ahhoz, hogy  $\mathcal{T}$  félgűrű legyen, három dolog kell:  $\emptyset \in \mathcal{T}$ , bármely két téglá metszete téglá, és bármely két téglá különbsége előáll, mint véges sok téglá diszjunkt uniója; mindhárom triviális. Az ábrán a  $T \cap U$  és  $T \setminus U$  felbontása látható.



Az üres halmaz is téglá, például  $\emptyset \times \emptyset \in \mathcal{T}$ .

(b) Tegyük fel, hogy a  $T = A \times B$  téglá felbomlik a  $T_n = A_n \times B_n$  téglák ( $n = 1, 2, \dots$ ) diszjunkt uniójára. Ekkor  $x \in X, y \in Y$  esetén

$$\chi_A(x) \chi_B(y) = \chi_T(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \chi_{T_n}(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \chi_{A_n}(x) \chi_{B_n}(y).$$

Előbb  $x$ , majd  $y$  szerint integrálva,

$$\begin{aligned} \mu(A) \chi_B(y) &= \left( \int_X \chi_A(x) d\mu(x) \right) \chi_B(y) = \int_X \chi_A(x) \chi_B(y) d\mu(x) = \\ & \int_X \left( \sum_{n=1}^{\infty} \chi_{A_n}(x) \chi_{B_n}(y) \right) d\mu(x) \stackrel{\text{Beppo Levi}}{=} \sum_{n=1}^{\infty} \int_X \chi_{A_n}(x) \chi_{B_n}(y) d\mu(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \mu(A_n) \chi_{B_n}(y) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha(T) = \mu(A) \nu(B) &= \int_Y \mu(A) \chi_B(y) d\nu(y) = \int_Y \left( \sum_{n=1}^{\infty} \mu(A_n) \chi_{B_n}(y) \right) d\nu(y) = \\ & \stackrel{\text{Beppo Levi}}{=} \sum_{n=1}^{\infty} \int_Y \mu(A_n) \chi_{B_n}(y) d\nu(y) = \sum_{n=1}^{\infty} \mu(A_n) \nu(B_n) = \sum_{n=1}^{\infty} \alpha(T_n) \end{aligned}$$

tehát  $\alpha$  tényleg  $\sigma$ -additív (és persze additív is).

A  $\sigma$ -szubadditivitás következik abból, hogy  $\mathcal{T}$  félgűrű: a szokott módon minden fedés kicserélhető diszjunkt téglákkal való fedésre, és elmetszhető a lefedett téglával.

A 29. Lemma biztosítja mértékkiterjesztés feltételeit: az  $\alpha$  téglafüggvény kiterjeszhető mértékké a téglák által generált  $\sigma$ -algebrára.

### Definíció

Az  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  és  $(Y, \mathcal{N}, \nu)$  mértékterek szorzata a  $(Z, \mathcal{S}, \varphi)$  mértéktér, ahol  $Z = X \times Y$ ,  $\varphi_\alpha$  a lemmabeli  $\alpha$ -hoz asszociált külső mérték a  $Z$  halmazon,  $\mathcal{S}$  a  $\varphi_\alpha$  szerint mérhető halmazok rendszere, és  $\varphi$  az  $\varphi_\alpha$  megszorítása  $\mathcal{S}$ -re.

## Véges sok mértéktér szorzata

A lemma és a definíció minden nehézség nélkül kiterjeszthető  $n$  mértéktér szorzatára is.

### Definíció

(véges sok mértéktér szorzata)

Ha  $(X_k, \mathcal{M}_k, \mu_k)$  ( $k = 1, 2, \dots, n$ ) mértékterek, akkor  $\mathcal{T} = \{A_1 \times \dots \times A_n : A_1 \in \mathcal{M}_1, \dots, A_n \in \mathcal{M}_n\}$  a téglák félgűrűje, ezen az  $\alpha(A_1 \times \dots \times A_n) = \mu_1(A_1) \cdot \dots \cdot \mu_n(A_n)$  függvény  $\sigma$ -additív. A mértékterek szorzata  $(Z, \mathcal{S}, \varphi)$ , ahol  $Z = X_1 \times \dots \times X_n$  halmazon,  $\varphi_\alpha : Z \rightarrow [0, \infty]$  az  $\alpha$ -hoz asszociált külső mérték,  $\mathcal{S}$  a  $\varphi_\alpha$  szerint mérhető halmazok rendszere, és  $\varphi$  a  $\varphi_\alpha$  megszorítása  $\mathcal{S}$ -re.

A  $\sigma$ -additivitásának bizonyítása ugyanúgy megy, mint a 29 lemmában, csak a Beppo Levi tételt nem kétszer, hanem  $k$ -szor kell alkalmazni.

### Példa

Ha  $\mu$  a  $p$ -dimenziós,  $\nu$  a  $q$ -dimenziós Lebesgue-mérték, akkor a szorzat a  $(p + q)$ -dimenziós Lebesgue-mérték. Ez majdnem triviális, a valamelyik mérték szerint nullmértékű halmazokat kell egy kicsit diszkutálni: minden mérhető halmaz egy  $F_\sigma$  halmaz és egy nullmértékű halmaz uniója stb.

## A szorzatmérték szerinti integrál átírása többszörös integrállá

### Tétel (Fubini)

Legyen a  $(Z, \mathcal{S}, \varphi)$  az  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  és  $(Y, \mathcal{N}, \nu)$  mértékterek szorzata, és  $f$   $\varphi$ -m. mérhető  $Z$ -n. Ha  $f$  (végesen) integrálható, vagy ha  $Z$   $\sigma$ -véges és  $\int_Z f d\varphi$  létezik, akkor

- (a)  $\mu$ -m.m.  $x$ -re létezik a  $g(x) = \int_Y f(x, y) d\nu(y)$  paraméteres integrál;
- (b)  $\int_X g d\mu = \int_Z f d\varphi$ , avagy

$$\int_Z f(x, y) d\varphi(x, y) = \int_X \left( \int_Y f(x, y) d\nu(y) \right) d\mu(x).$$

**Megjegyzés.** Az  $f \geq 0$  esetet szokás Tonelli-tételnek is nevezni.

**Bizonyítás.** A komplex értékű függvények esetében külön vehetjük a valós és a képzetes részt, ezért elég csak a valós értékű függvényekre bizonyítani.

Az  $f$  függvényt nevezzük Fubini-félének, ha  $\int_Z f d\varphi$  létezik, és  $f$ -re teljesül a tétel, vagyis az (a) és a (b) tulajdonság. Jelölje  $\Phi$  a Fubini-féle függvények családját. Szép sorban egyre többféle függvényről bizonyítjuk be, hogy Fubini-féle.

(I) Bármely  $T = A \times B \in \mathcal{T}$  téglá esetén  $\chi_T \in \Phi$ .

A  $\varphi$  definíciója alapján trivi:

$$\begin{aligned} \int_X \left( \int_Y \chi_T(x, y) d\nu(y) \right) d\mu(x) &= \int_X \left( \int_Y \chi_A(x) \chi_B(y) d\nu(y) \right) d\mu(x) = \\ &= \int_X \left( \chi_A(x) \int_Y \chi_B(y) d\nu(y) \right) d\mu(x) = \int_X \chi_A(x) \nu(B) d\mu(x) = \\ &= \nu(B) \int_X \chi_A(x) d\mu(x) = \nu(B) \mu(A) = \varphi(T) = \int_Z \chi_T d\varphi. \end{aligned}$$

(II) Ha  $f \in \Phi$  és  $c \in \mathbb{R}$ , akkor  $c \cdot f \in \Phi$ .

$$\begin{aligned} \int_X \left( \int_Y c f(x, y) d\nu(y) \right) d\mu(x) &= \int_X \left( c \int_Y f(x, y) d\nu(y) \right) d\mu(x) = \\ &= c \int_X \left( \int_Y f(x, y) d\nu(y) \right) d\mu(x) = c \int_Z f(x, y) d\varphi = \int_Z (c f(x, y)) d\varphi. \end{aligned}$$

(III) Ha  $f_1, f_2 \in \Phi$  és  $\int_Z f_1 d\varphi + \int_Z f_2 d\varphi$  létezik, akkor  $f_1 + f_2 \in \Phi$ .

A két integrál összeadható, és (II) miatt  $f$  megszorozható  $(-1)$ -gyel, ezért feltehetjük, hogy egyik sem  $-\infty$ . Legyen  $g_i(x) = \int_Y f_i(x, y) d\nu(y)$  ( $i = 1, 2$ ). Mivel

$$\int_X g_i(x) d\mu(x) = \int_Z f_i d\varphi > -\infty,$$

az is igaz, hogy  $\mu$ -m.m.  $x$ -re  $g_i(x)$  létezik, és az értéke nem  $-\infty$ . Akkor viszont  $g_1(x)$  és  $g_2(x)$   $\mu$ -m.m.  $x$ -re összeadható. Minden egyes ilyen  $x$  értékre

$$\int_Y f_i(x, y) d\nu(y) = g_i(x) > -\infty,$$

ezért  $\nu$ -m.m.  $y$ -ra  $f_i(x, y) > -\infty$ , vagyis értelmes az  $f_1(x, y) + f_2(x, y)$  összeg, így

$$g_1(x) + g_2(x) = \int_Y f_1(x, y) d\nu(y) + \int_Y f_2(x, y) d\nu(y) = \int_Y (f_1(x, y) + f_2(x, y)) d\nu(y) = g(x),$$

és most már jogos a  $\mu$ -m.m.  $x$ -re létező  $g(x)$ -ről beszélni.

Mivel

$$\int_X g_1(x) d\mu(x) = \int_Z f_1 d\varphi \quad \text{és} \quad \int_X g_2(x) d\mu(x) = \int_Z f_2 d\varphi$$

összeadható,

$$\int_X g(x) d\mu(x) = \int_X g_1(x) d\mu(x) + \int_X g_2(x) d\mu(x) = \int_Z f_1 d\varphi + \int_Z f_2 d\varphi = \int_Z f d\varphi.$$



(IV) Ha  $0 \leq f_1 \leq f_2 \leq \dots$  nemnegatív Fubini-féle függvények egy növekvő sorozata, akkor ezek limesze,  $f = \lim f_n$  is Fubini-féle.

Legyen  $g_n(x) = \int_Y f_n(x, y) \, d\nu(y)$ ; ez (a) miatt  $\mu$ -m.m.  $x$ -re létezik, ezért  $\mu$ -m.m.  $x$ -re az összes  $g_n(x)$  létezik, és  $0 \leq g_1(x) \leq g_2(x) \leq \dots$ . Legyen most  $g = \lim g_n$ ; a MKT miatt

$$g(x) = \lim g_n(x) = \lim \int_Y f_n(x, y) \, d\nu(y) \stackrel{\text{mkt}}{=} \int_Y f(x, y) \, d\nu(y) \quad (\mu\text{-m.m. } x\text{-re}),$$

$$\int_Z f \, d\varphi \stackrel{\text{mkt}}{=} \lim \int_Z f_n \, d\varphi \stackrel{f_n \in \Phi}{=} \lim \int_X g_n(x) \, d\mu(x) \stackrel{\text{mkt}}{=} \int_X g(x) \, d\mu(x).$$

(V) Ha  $0 \leq f_1 \leq f_2$ ,  $f_2 \in \Phi$  és  $\int_Z f_2 \, d\varphi = 0$ , akkor  $f_1 \in \Phi$ .

Világos, hogy

$$0 \leq \int_Z f_1 \, d\varphi \leq \int_Z f_2 \, d\varphi = 0, \quad \text{így} \quad \int_Z f_1 \, d\varphi = 0.$$

Abból, hogy

$$\int_X \left( \int_Y f_2(x, y) \, d\nu(y) \right) d\mu(x) = \int_Z f_2 \, d\varphi = 0,$$

látjuk, hogy

$$\begin{aligned} \mu\text{-m.m. } x\text{-re} \quad & \int_Y f_2(x, y) \, d\nu(y) = 0; \\ \mu\text{-m.m. } x\text{-re} \quad & \left( \nu\text{-m.m. } y\text{-ra} \quad f_2(x, y) = 0 \right); \\ \mu\text{-m.m. } x\text{-re} \quad & \left( \nu\text{-m.m. } y\text{-ra} \quad f_1(x, y) = 0 \right); \\ \mu\text{-m.m. } x\text{-re} \quad & \int_Y f_1(x, y) \, d\nu(y) = 0; \\ & \int_X \left( \int_Y f_1(x, y) \, d\nu(y) \right) d\mu(x) = 0 = \int_Z f_1 \, d\varphi. \end{aligned}$$

(VI) Ha  $A = \bigcup T_k$  megszámlálható sok téglá uniója, akkor  $\chi_A \in \Phi$ .

Mivel a téglák félgűrűt alkotnak, a szokásos módon kicserélhetjük az unióban szereplő téglákat diszjunkt téglákra. Mostantól a tégláink diszjunktak, ezért  $\chi_A = \sum \chi_{T_k}$ .

Legyen  $f_n = \chi_{T_1 \cup \dots \cup T_n} = \chi_{T_1} + \dots + \chi_{T_n}$ ; Ekkor  $0 \leq f_1 \leq f_2 \leq \dots$ , és  $\lim f_n = \chi_A$ . Ezután (III) miatt  $f_n \in \Phi$ , majd (IV) miatt  $\chi_A = \lim f_n \in \Phi$ .

(VII) Tegyük fel, hogy  $A_1, A_2, \dots \in \mathcal{S}$ , mindegyikük megszámlálható sok téglá egyesítése,  $\varphi(A_1)$  véges, és  $A = \bigcap A_n$ . Ekkor  $\chi_A \in \Phi$ .

Először is, vegyük észre, hogy ha  $B = \bigcup_k B_k$  és  $C = \bigcup_\ell C_\ell$  is megszámlálható sok téglá uniója, akkor  $B \cap C = \bigcup_{k,\ell} (B_k \cap C_\ell)$  is megszámlálható sok téglá uniója. Ezért  $A_2$ -t kicserélhetjük az  $A_1 \cap A_2$  halmazra, utána  $A_3$ -at kicserélhetjük  $A_2 \cap A_3$ -ra...; ezek után feltehetjük, hogy  $A_1 \supset A_2 \supset \dots$ . Ekkor  $\chi_A = \lim \chi_{A_n}$ .

Legyen  $f_n = \chi_{A_1} - \chi_{A_n}$ . (VI) miatt  $\chi_{A_n} \in \Phi$ , (II+III) miatt  $f_n \in \Phi$ . Mivel  $0 \leq f_n \leq f_{n+1}$ , (IV) miatt  $\chi_{A_1 \setminus A} = \lim f_n \in \Phi$ . Mivel  $\int_Z \chi_{A_1} d\varphi = \varphi(A_1)$  véges, (II+III) miatt  $\chi_A = \chi_{A_1} - \chi_{A_1 \setminus A} \in \Phi$ .

**(VIII)** Ha  $\varphi(A) = 0$ , akkor  $\chi_A \in \Phi$  és  $\mu$ -m.m.  $x$ -re  $\nu^*(A_x) = 0$  (itt  $A_x = \{y : (x, y) \in A\}$  az  $A$  halmaz  $x$  szerinti szekciója,  $\nu^*$  pedig  $\nu$  teljesség tétele).

Minden  $n$ -re fedjük le  $A$ -t egy olyan  $B_n$  halmazzal, amely megszámlálható sok téglá uniója és  $\varphi(B_n) < \frac{1}{n}$ , és legyen  $C = \cap B_n$ . Ekkor persze  $\varphi(C) = 0$  mert minden  $n$ -re  $\varphi(C) \leq \varphi(B_n) < \frac{1}{n}$ .

(VII) szerint  $\chi_C = \chi_{\cap B_n} \in \Phi$ , végül  $0 \leq \chi_A \leq \chi_C$  és (V) miatt  $\chi_A \in \Phi$ .

Már csak azt kell belátni, hogy  $\varphi(A) = 0, \chi_A \in \Phi \Rightarrow \mu$ -m.m.  $x$ -re  $\nu^*(A_x) = 0$ . Itt  $\Phi$  definíciója miatt  $\int_Z \chi_A d\varphi = \int_X (\int_Y \chi_A d\nu) d\mu$ , továbbá  $\varphi(A) = 0$  miatt  $\int_Z \chi_A d\varphi = 0$ . A kettőt összevetve  $\int_X (\int_Y \chi_A d\nu) d\mu = 0$ , ahonnan következik, hogy  $\mu$ -m.m.  $x$ -re  $\int_Y \chi_{A_x} d\nu(y) = \int_Y \chi_A(x, y) d\nu(y) = 0$ . Itt  $A_x$  lehet, hogy nem mérhető  $\nu$  szerint, de  $\nu^*$  szerint már biztosan az; tehát  $\nu^*(A_x) = 0$ .

**(IX)** Ha  $A \in \mathcal{S}$  és  $\varphi(A)$  véges, akkor  $\chi_A \in \Phi$ .

Válasszunk minden  $n$ -re olyan  $B_n$  halmazt, amely megszámlálható sok téglá uniója, fedi  $A$ -t és  $\varphi(B_n) < \varphi(A) + \frac{1}{n}$ . Legyen  $C = \cap B_n$ . Ekkor az  $N = C \setminus A$  halmazra  $\varphi(N) = 0$ ; (VII) miatt  $\chi_C \in \Phi$ , (VIII) miatt  $\chi_N \in \Phi$ , végül (II+III) miatt  $\chi_A = \chi_C - \chi_N \in \Phi$ .

**(X)** Ha  $A \in \mathcal{S}$  és  $A$   $\sigma$ -véges  $\varphi$  szerint, akkor  $\chi_A \in \Phi$ . Valóban, mivel  $A = \sqcup A_j$ ,  $\varphi(A_j) \leq \infty$ , ezért (III+IV+IX) miatt  $\chi_A = \sum \chi_{A_j} \in \Phi$ .

**(XI)** Legyen  $f \geq 0$  mérhető. Ha  $\int_Z f d\varphi$  véges, vagy ha  $\varphi$   $\sigma$ -véges, akkor  $f \in \Phi$ . Valóban, ha egy  $g = \sum c_k \chi_{A_k} \geq 0$  egyszerű függvény integrálja véges, vagy ha  $\varphi$   $\sigma$ -véges, akkor (II+III+X) miatt  $g \in \Phi$ . (IV) alapján ugyanez mondható  $f$ -re is, mert monoton limesze egyszerű függvényeknek.

(Itt  $\chi_k = \chi_{A_k}, \bigcup^* A_k = Z$ )

**(XII)** Legyen  $f$  majdnem mérhető és  $f \geq 0$  m.m. Ha  $\int_Z f d\varphi$  véges, vagy ha  $\varphi$   $\sigma$ -véges, akkor  $f \in \Phi$ . Legyen  $f_1 \geq 0$ , és  $f_1 = f$   $\varphi$ -m.mindenhol. Legyen  $A := \{z \in Z : f \neq g_1\}$ , ekkor  $\varphi(A) = 0$  és (VIII) szerint m.m.  $x$ -re  $\nu^*(A_x) = 0$ . Rögzítve egy  $x$ -et  $f(x, y) = f_1(x, y)$  m.m.  $y$ -ra, vagyis  $g(x) = \int_Y f(x, y) d\nu(y) = \int_Y f_1(x, y) d\nu(y) := g_1(x)$  is m.m.  $x$ -re létezik, és az egyenlőség fennáll. Ekkor pedig (XI) szerint  $\int_X g d\mu = \int_X g_1 d\mu = \int_Z f_1 d\varphi = \int_Z f d\varphi$ .

**(XIII)** Legyen  $f$  majdnem mérhető. Ha  $\int_Z f d\varphi$  véges, vagy ha  $\varphi$   $\sigma$ -véges és  $\int_Z f d\varphi$  létezik, akkor  $f \in \Phi$ . Az eddigiek szerint ha az első feltétel teljesül készen vagyunk ( $f^+, f^- \geq 0$ ). A második esetben  $f, f^+, f^-$  majdnem mérhetőek, és nemnegatívak, (II+XII) szerint  $f^+, -f^- \in \Phi$ , az integrál definíciója, és (III) miatt  $f \in \Phi$  is teljesül.

A Fubini-tétel lehetőséget ad az integrálok felcserélgetésére, feltéve, hogy a szorzatmérték szerinti integrál létezik.

## Példa

A Jordan-mérték szerinti integráloknál szokott szerepelni ez a példa: A  $[0, 1] \times [0, 1]$  négyzeten legyen

$$f(x, y) = \begin{cases} \frac{x^2 - y^2}{(x^2 + y^2)^2} & \text{ha } x, y > 0 \\ 0 & \text{ha } x = 0 \text{ vagy } y = 0. \end{cases}$$

Erre a függvényre

$$\int_0^1 \left( \int_0^1 \frac{x^2 - y^2}{(x^2 + y^2)^2} dy \right) dx = \frac{\pi}{4}, \quad \text{de} \quad \int_0^1 \left( \int_0^1 \frac{x^2 - y^2}{(x^2 + y^2)^2} dx \right) dy = -\frac{\pi}{4}.$$

A két integrál azért lehet különböző, mert  $f_+$  és  $f_-$  integrálja is végtelen, így a Fubini-tétel feltételei nem teljesülnek.

**Megjegyzés.** Az ilyen példák után szokott eljönni az a kérdés, hogy tudunk-e olyan *korlátos* vagy *nemnegatív*  $f : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, \infty)$  függvényt *mondani*, amelyre  $\int_{x=0}^1 \left( \int_{y=0}^1 f(x, y) dy \right) dx$  és  $\int_{y=0}^1 \left( \int_{x=0}^1 f(x, y) dx \right) dy$  is létezik, de az értékük különböző. A Fubini-tétel miatt korlátos vagy nemnegatív, Lebesgue-, speciálisan Borel-mérhető függvényekre a két integrál mindig egyenlő, mi pedig csak Borel-mérhető függvényeket tudunk *felírni*. Nem mérhető függvények konstruálásához muszáj a kiválasztási axiómát használni.

## Példa

Tegyük fel, hogy igaz a kontinuumhipotézis, és legyen  $<$  a  $[0, 1]$  halmaz egy  $\omega_1$  típusú jólrendezése. Tekintsük a következő függvényt:

$$f(x, y) = \begin{cases} 1 & x < y \\ 0 & x \geq y \end{cases}$$

Bármely  $x$ -re csak megszámlálható sok olyan  $y$  van, amely megelőzi  $x$ -et a jólrendezésünkben. Ezért bármely rögzített  $x$ -re  $f(x, y) = 1$  m.m.  $y$ -ra, és így  $\int_{[0,1]} f(x, y) d\lambda(y) = 1$ , tehát

$$\int_{x \in [0,1]} \left( \int_{y \in [0,1]} f(x, y) d\lambda(y) \right) d\lambda(x) = 1.$$

Megfordítva, bármely  $y \in [0, 1]$ -hez csak megszámlálható sok  $x \leq y$  létezik, tehát rögzített  $y$  esetén  $f(x, y) = 0$  m.m.  $x$ -re, ezért

$$\int_{y \in [0,1]} \left( \int_{x \in [0,1]} f(x, y) d\lambda(x) \right) d\lambda(y) = 0.$$

## Tétel (Friedman, 1980)

A ZFC-vel konzisztens a következő állítás: Legyen  $f : [0, 1]^2 \rightarrow [0, \infty)$  tetszőleges függvény. Ha az  $\int_{x \in [0,1]} \left( \int_{y \in [0,1]} f(x, y) d\lambda(y) \right) d\lambda(x)$  és  $\int_{y \in [0,1]} \left( \int_{x \in [0,1]} f(x, y) d\lambda(x) \right) d\lambda(y)$  kettős integrálok léteznek, akkor egyenlők. [Friedmann]

Tehát, ha akarjuk, legalábbis pozitív függvények esetén, szabadon szabad csejélgetni a többszörös szummákat és Lebesgue-integrálokat. Ha akarjuk, létezik olyan eset, amikor nem, de nem tudunk konkrét ellenpéldát felírni a ZFC-nél erősebb plusz feltételek felhasználása nélkül.

## 30. Végtelen sok mértéktér szorzata

Akárhány valószínűségi mértéktér szorzata. Bizonyítás a  $\sigma$ -szubadditivitásra. [Petruska, 121, 124–126. o.]

Ha a szorzatmértékek definícióját végtelen sok mértéktér szorzatára akarjuk átvinni, többféle nehézségbe ütközünk: biztosítanunk kell, hogy a tégláink mértékét kifejező — most már végtelen sok tényező — szorzatok sorrendfüggetlenek legyenek; ráadásul végtelen sok  $\sigma$ -algebra direkt szorzata nem lesz félgűrű. Az is előfordulhat, hogy megszámlálható soknál több mértékteret szeretnénk szorozni, mert éppen olyanunk van, hogy  $2^{2^{\aleph_0}}$  független valószínűségi változót szeretnénk konstruálni.

Ezeknek a nehézségeknek egy lehetséges feloldása az, hogy csak valószínűségi mértéktereket szorzunk össze, amelyekben a teljes tér mértéke 1, ( $[0, 1]$ -beli számok végtelen szorzata már nem függ a sorrendtől), továbbá csak olyan téglákat használunk, amelyeknek véges sok kivétellel minden éle a megfelelő teljes tér (hasonlóan például a topologikus terek szorzatához).

Egy következő állomás lehetne az olyan téglák megengedése, amelyeknek megszámlálható sok kivétellel minden éle az egész tér, de az ilyenek úgyszólván benne lesznek a generált  $\sigma$ -algebrában.

Mostantól tehát legyen  $I$  tetszőleges számosságú, de azért nem üres indexhalmaz, és minden  $i \in I$ -re  $(X_i, \mathcal{M}_i, \mu_i)$  valamilyen valószínűségi mértéktér.

A leendő szorzatmérték alaphalmaza az  $X_i$  halmazok szorzata,  $Z = \times_{i \in I} X_i$  lesz. Ez tekinthető az olyan,  $I$ -n értelmezett függvények halmazának, amelyek minden  $i \in I$ -hez  $X_i$ -beli pontot rendelnek. Ha  $I = \mathbb{N}$ , akkor a  $Z = \times_{i \in I} X_i = \times_{i=1}^{\infty} X_i$  halmaz elemei végtelen sorozatok.

A téglák az olyan  $T = \times_{i \in I} A_i$  "hengerhalmazok" lesznek, amelyekben minden  $i \in I$ -re  $A_i \in \mathcal{M}_i$ , és véges sok  $i$  index kivételével  $A_i = X_i$ . Az  $A_i$  halmazt (így, egymás közt, nem hivatalosan) a  $T$  téglát  $i$ -edik "oldalának" fogjuk hívni.

A tégláink halmazát jelölje most is  $\mathcal{T}$ , tehát

$$\mathcal{T} = \left\{ \times_{i \in I} A_i : \forall i \in I A_i \in \mathcal{M}_i, \text{ és } \{i \in I : A_i \neq X_i\} \text{ véges} \right\}.$$

A  $T = \times_{i \in I} A_i$  téglához hozzárendeljük a

$$\alpha(T) = \prod_{i \in I} \mu_i(A_i)$$

számot. A szorzatban véges sok  $i$  kivételével minden tényező 1, így vehetjük csak az 1-nél kisebbek szorzatát, vagy a véges részsorzatok minimumát.

## Lemma

- (a)  $\mathcal{T}$  félgűrű.
- (b) Az  $\alpha : \mathcal{T} \rightarrow [0, 1]$  téglafüggvény additív.
- (c) Az  $\alpha : \mathcal{T} \rightarrow [0, 1]$  téglafüggvény  $\sigma$ -szubadditív.

**Bizonyítás.** (a) Ahhoz, hogy  $\mathcal{T}$  félgűrű legyen, három dolog kell:  $\emptyset \in \mathcal{T}$ , bármely két téglá metszete téglá, és bármely két téglá különbsége előáll, mint véges sok téglá diszjunkt uniója.

Az üres halmaz is téglá, az egyik  $A_i$ -t választhatjuk  $\emptyset$ -nek.

Legyen  $T = \times_{i \in I} A_i$  és  $U = \times_{i \in I} B_i$  két téglá. Legyen  $J \subset I$  az olyan indexek halmaza, amelyekre  $A_i \neq X_i$  vagy  $B_i \neq X_i$ . Átindexelve, feltehetjük, hogy  $J = \{1, 2, \dots, n\}$ . Innen pedig minden ugyanúgy megy, mint a 29 definícióban. :-)

(b) Tegyük fel, hogy egy  $T$  téglá az  $U_1, \dots, U_n$  téglák diszjunkt uniója. Legyen  $J \subset I$  az olyan  $i$  indexek halmaza, amelyekre valamelyik téglánk  $i$ -edik éle nem az egész tér; ez véges sok véges indexhalmaz uniója, vagyis  $J$  véges. Ismét csak átindexelve, feltehetjük, hogy  $J = \{1, 2, \dots, N\}$  Innen pedig minden ugyanúgy megy, mint a 29 definícióban. :-)

(c) Indirekt tegyük fel, hogy  $\alpha$  nem  $\sigma$ -szubadditív, vagyis van olyan  $T$  téglá, ami lefedhető az  $U^1, U^2, \dots$  téglák uniójával úgy, hogy  $\sum_{n=1}^{\infty} \alpha(U^n) < \alpha(T)$ . Nyilván mindegyik  $U^n$ -et lecserélhetjük az  $U^n \cap T$  téglával, így a fedés tovább csökken. Tehát feltehetjük, hogy  $U^n \subset T$ .

Az itt szereplő téglák élei összesen megszámlálható sok irányban lehetnek kisebbek, mint a megfelelő mértéktér; ezeket átindexelhetjük pozitív egészekkel. Az összes többi irányban minden szorzat minden tényezője 1. Tehát feltehetjük, hogy átindexelés után  $I = \mathbb{N}$ , a direkt szorzatok elemei sorozatok.

Legyen  $T = \times_{i=1}^{\infty} A_i$  és minden  $n$ -re  $U^n = \times_{i=1}^{\infty} B_i^n$ . Mivel  $U^n \subset T$ , az is igaz, hogy minden  $i$  indexre  $B_i^n \subset A_i$ . Az indirekt feltevés szerint

$$\sum_{n=1}^{\infty} \alpha(U^n) < \alpha(T),$$

vagyis

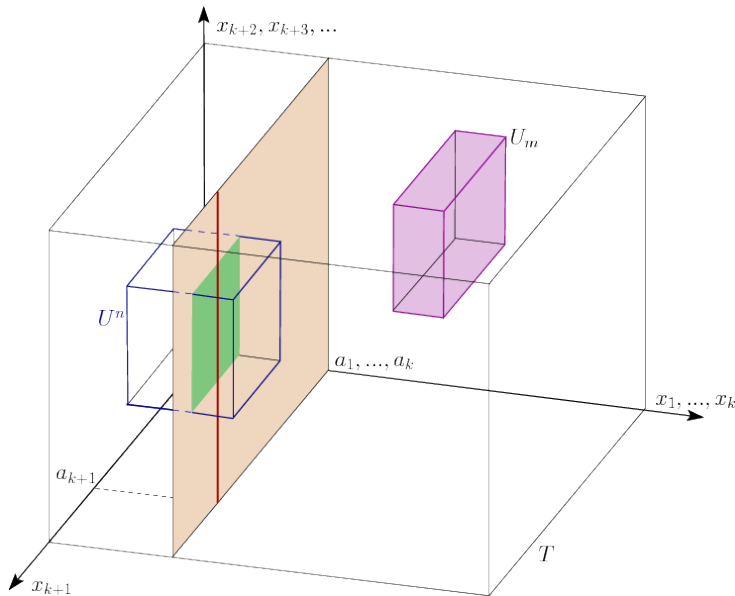
$$\sum_{n=1}^{\infty} \left( \prod_{i=1}^{\infty} \mu_i(B_i^n) \right) < \prod_{i=1}^{\infty} \mu_i(A_i). \quad (1)$$

Rekurzívan konstruálunk egy olyan  $t = (a_1, a_2, \dots) \in T$  pontot, ami a következőt fogja tudni:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left( \prod_{i=1}^k \chi_{B_i^n}(a_i) \cdot \prod_{i=k+1}^{\infty} \mu_i(B_i^n) \right) < \prod_{i=k+1}^{\infty} \mu_i(A_i) \quad \text{minden } k = 0, 1, 2, \dots \text{ esetén.} \quad (2)$$

Ha  $k = 0$ , akkor az első produktum üres, ezt most is 1-nek definiáljuk.

A (2) szemléletes jelentése a következő. Vegyük az  $x_1 = a_1, \dots, x_k = a_k$  hipersíkot, és az összes téglánk "nyomát" — metszetét a hipersíkkal. A baloldalon az első produktum értéke 0 vagy 1 attól függően, hogy az  $U^n$  téglá elmetszi-e a hipersíkot. A másik két produktum a hipersíkra eső vetületek módosított mértéke, amit érthetően az első  $k$  koordináta nélkül számolunk, ezért megy az index  $(k + 1)$ -től. A (2) formula tehát azt fejezi ki, hogy az  $U^n$  téglák nyomának összege a hipersíkon kisebb, mint a  $T$  téglá nyoma.



A  $k = 0$  esetben (2) egybeesik (1)-gyel, tehát igaz.

Ha  $k$  pozitív egész, és  $a_1, \dots, a_{k-1}$  már megvan, akkor vizsgáljuk a következő függvényt:

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \left( \prod_{i=1}^{k-1} \chi_{B_i^n}(a_i) \cdot \chi_{B_k^n}(x) \cdot \prod_{i=k+1}^{\infty} \mu_i(B_i^n) \right)$$

(vagyis (2) baloldalán az  $a_k$  helyére az  $x$  változót tettük). Olyan  $a_k \in A_k$  pontra van szükségünk, amelyre  $f(a_k) < \prod_{i=k+1}^{\infty} \mu_i(A_i)$ .

Az  $A_k$  halmazon integrálva,

$$\begin{aligned} \int_{A_k} f(x) d\mu_k(x) &\stackrel{\text{B.L.}}{=} \sum_{n=1}^{\infty} \int_{A_k} \left( \prod_{i=1}^{k-1} \chi_{B_i^n}(a_i) \cdot \chi_{B_k^n}(x) \cdot \prod_{i=k+1}^{\infty} \mu_i(B_i^n) \right) d\mu_k(x) \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \left( \prod_{i=1}^{k-1} \chi_{B_i^n}(a_i) \cdot \prod_{i=k}^{\infty} \mu_i(B_i^n) \right) \\ &\stackrel{(2)}{<} \prod_{i=k}^{\infty} \mu_i(A_i) = \int_{A_k} \left( \prod_{i=k+1}^{\infty} \mu_i(A_i) \right) d\mu_k(x). \end{aligned}$$

Az  $f$  integrálja kisebb, tehát az  $A_k$  halmaz egy pozitív mértékű részén  $f < \prod_{i=k+1}^{\infty} \mu_i(A_i)$ ; ebből a pozitív mértékű részből válasszunk egy  $a_k$  pontot.

Ezzel megkonstruáltuk a (2)-nak eleget tevő  $t = (a_1, a_2, \dots)$  sorozatot.

Az indirekt feltevésünk szerint a  $t$  pontot fedí valamelyik  $U^m$  téglá, vagyis minden  $i$ -re  $\chi_{B_i^m}(a_i) = 1$ . Az  $U^m$  egy hengerhalmaz, tehát véges sok  $i$  index kivételével  $B_i^m = X_i$ , ezért elég nagy  $k$  esetén

$$1 = \prod_{i=1}^k \chi_{B_i^m}(a_i) \cdot \prod_{i=k+1}^{\infty} \mu_i(B_i^m) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \left( \prod_{i=1}^k \chi_{B_i^n}(a_i) \cdot \prod_{i=k+1}^{\infty} \mu_i(B_i^n) \right) \stackrel{(2)}{<} \prod_{i=k+1}^{\infty} \mu_i(A_i) \leq 1,$$

ellentmondás. Tehát  $\alpha$  tényleg  $\sigma$ -szubadditív.

### Definíció

Az  $(X_i, \mathcal{M}_i, \mu_i)$  valószínűségi mértékterek  $(i \in I)$  szorzata a  $(Z, \mathcal{S}, \varphi)$  mértéktér, ahol  $Z = \times_{i \in I} X_i$ ,  $\varphi_\alpha$  az  $\alpha$ -hoz asszociált külső mérték a  $Z$  halmazon,  $\mathcal{S}$  a  $\varphi_\alpha$  szerint mérhető halmazok rendszere, és  $\varphi$  a  $\varphi_\alpha$  megszorítása  $\mathcal{S}$ -re.



## VII. rész

# Kitekintések

22

### 31. $L_p$ -terek

$L_p$ -normák. Valós és komplex  $\ell_p$  és  $L_p$  terek. Konjugált kitevők, Hölder- és Minkowski-egyenlőtlenség. Faktorizálás a m.m. 0 függvények terével. Sűrű alterek  $L_p$ -terekben (egyszerű, szép (véges sok, téglán konstans), kompakt tartójú folytonos függvények alterei). [Petruska, 127–130. o.]

Egy rögzített  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  mértéktéren majdnem mérhető függvényekkel fogunk dolgozni. A képhalmaz  $\mathbb{R}$  vagy  $\mathbb{C}$  is lehet, tehát vannak "valós  $L_p$  terek" és "komplex  $L_p$  terek" is.

#### Definíció

Egy majdnem mérhető függvény  $p$ -edik normája az  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  téren:  
 $0 < p < \infty$  esetén

$$\|f\|_p = \left( \int_X |f|^p d\mu \right)^{1/p};$$

$p = \infty$  esetén

$$\inf \|f\|_\infty = \text{ess sup } |f| = \min\{K : |f| \leq K \text{ } \mu\text{-m.m.}\}.$$

(lényeges szuprémum)

#### Tétel (Hölder-egyenlőtlenség)

Ha  $p, q \geq 1$  konjugált kitevők, azaz  $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$ , és  $f, g$  majdnem mérhető függvények, akkor

$$\|f\|_p \cdot \|g\|_q \geq \|fg\|_1.$$

**Bizonyítás.** Triviális esetek:

- Ha  $\|f\|_p = 0$  vagy  $\|g\|_q = 0$ , akkor  $f = 0$   $\mu$ -m.m, illetve  $g = 0$   $\mu$ -m.m, ilyenkor mindkét oldal 0.
- Ha  $\|f\|_p$  és  $\|g\|_q$  egyike sem 0, és legalább az egyik  $\infty$ , akkor a baloldal végtelen.
- Ha  $p = 1$ , akkor  $q = \infty$ , és

$$\|f\|_p \cdot \|g\|_q = \int_X |f| d\mu \cdot \operatorname{ess\,sup} |g| \geq \int_X |f| \cdot |g| d\mu = \|fg\|_1.$$

- Ugyanígy trivi, ha  $p = \infty$  és  $q = 1$ .

A továbbiakban feltesszük, hogy  $1 < p, q < \infty$ ,  $0 < \|f\|_p < \infty$  és  $0 < \|g\|_q < \infty$ . Sőt, a homogenitás miatt A két függvényt normálhatjuk, ezért azt is feltehetjük, hogy  $\|f\|_p = \|g\|_q = 1$ .

A súlyozott számtani-mértaniból

$$\frac{1}{p} \cdot |f|^p + \frac{1}{q} \cdot |g|^q \geq \left(|f|^p\right)^{\frac{1}{p}} \cdot \left(|g|^q\right)^{\frac{1}{q}} = |f| \cdot |g|,$$

és ez az olyan pontokban is igaz, ahol  $|f| = \infty$  vagy  $|g| = \infty$ . Integrálva

$$\|f\|_p \cdot \|g\|_q = 1 = \frac{1}{p} \|f\|_p^p + \frac{1}{q} \|g\|_q^q = \int_X \left(\frac{1}{p} |f|^p + \frac{1}{q} |g|^q\right) d\mu \geq \int_X |f| \cdot |g| d\mu = \|fg\|_1.$$

### Következmény (Cauchy–Schwarz–Bunyakovszkij egyenlőtlenség)

Ha  $f, g$  majdnem mérhető függvények, akkor

$$\|f\|_2 \cdot \|g\|_2 \geq \|fg\|_1.$$

### Tétel (Minkowski-egyenlőtlenség)

Ha  $1 \leq p \leq \infty$ , és  $f, g$  majdnem mérhető, összeadható függvények, akkor

$$\|f + g\|_p \leq \|f\|_p + \|g\|_p.$$

**Bizonyítás.** Triviális esetek:

- Ha  $p = 1$ , akkor

$$\|f + g\|_1 = \int_X |f + g| d\mu \leq \int_X |f| d\mu + \int_X |g| d\mu = \|f\|_1 + \|g\|_1.$$

- Ha  $p = \infty$ , akkor

$$\|f + g\|_\infty = \text{ess sup } |f + g| \leq \text{ess sup } |f| + \text{ess sup } |g| = \|f\|_\infty + \|g\|_\infty.$$

- Ha  $\|f\|_p = \infty$ ,  $\|g\|_p = \infty$  vagy  $\|f + g\|_p = 0$ .

A továbbiakban  $1 < p < \infty$ , a  $p$ -hez tartozó konjugált kitevő  $q = \frac{p}{p-1}$ ,  $\|f\|_p$  és  $\|g\|_p$  is véges, és  $\|f + g\|_p > 0$ .

Egy triviális becslés:

$$\int_X |f+g|^p d\mu \leq \int_X \left(2 \max(|f|, |g|)\right)^p d\mu \leq 2^p \int_X (|f|^p + |g|^p) d\mu = 2^p (\|f\|_p^p + \|g\|_p^p) < \infty,$$

tehát  $\|f + g\|_p$  egy véges, pozitív szám; szabad vele egyenlőtlenségeket szorzni és osztani.

A Hölder-egyenlőtlenséget a  $q, p$  kitevőkkel fogjuk alkalmazni, és kihasználjuk, hogy  $p - 1 = \frac{p}{q}$ .

$$\begin{aligned} \|f + g\|_p^p &= \int_X |f + g|^p d\mu \leq \int_X |f + g|^{p-1} \cdot (|f| + |g|) d\mu \leq \\ &\leq \int_X |f + g|^{p/q} \cdot |f| d\mu + \int_X |f + g|^{p/q} \cdot |g| d\mu \\ &\stackrel{\text{Hölder}}{\leq} \left\| |f + g|^{p/q} \right\|_q \|f\|_p + \left\| |f + g|^{p/q} \right\|_q \|g\|_p = \\ &= \|f + g\|_p^{p/q} (\|f\|_p + \|g\|_p) = \|f + g\|_p^{p-1} (\|f\|_p + \|g\|_p). \end{aligned}$$

Ezt elosztva  $\|f + g\|_p^{p-1}$ -nel, kész vagyunk.

### Következmény

Minden egyes  $1 \leq p \leq \infty$  esetén, az olyan majdnem mérhető  $f$  függvények, amelyekre  $\|f\|_p$  véges, vektorteret alkotnak.

### Definíció

$1 \leq p \leq \infty$  esetén  $L_p(X, \mathcal{M}, \mu)$  a véges  $p$ -normájú függvények tere, faktoriálva a m.m. nulla függvények alterével. Ezen a  $\|\cdot\|_p$  tényleg norma, tehát  $L_p$  egy normált vektortér.

## Példák

1. Ha  $X = \{1, 2, \dots, d\}$  és  $\mu$  a számlálómérték, akkor  $L_2(X)$  a  $d$ -hosszúságú sorozatokból áll, éppen az  $\mathbb{R}^n$  euklideszi tér.
2. Ha  $X = \mathbb{N}$ , akkor a tér a végtelen számsorozatokból áll, a neve (valós vagy komplex)  $\ell_p$  tér. Van, amikor praktikus negatív indexeket is megengedni, tehát  $X = \mathbb{Z}$ , a tér elemei minkét irányban végtelen sorozatok; pl. Fourier-soroknál.
3. Ha  $X$  az  $\mathbb{R}^d$  egy pozitív mértékű részhalmaza, és  $\mu$  a Lebesgue-mérték. Ilyenkor csak az alaphalmazt adjuk meg:  $L_2(X)$ ;  $L_2([a, b])$  stb.

**Megjegyzés.** A különböző  $p$  értékekre különböző függvényosztályokat kapunk, általában egyik sem része a másiknak. Például ha  $X = (0, \infty)$  és  $p < q < \infty$ , akkor az  $f = \begin{cases} x^{-1/q} & x \in (0, 1) \\ 0 & x \in [1, \infty) \end{cases}$  függvény  $L_p$ -beli, de nem  $L_q$ -beli. A  $g = \begin{cases} 0 & x \in (0, 1) \\ x^{-1/p} & x \in [1, \infty) \end{cases}$  függvény  $L_q$ -beli, de nem  $L_p$ -beli.

Ha  $\mu(X)$  véges, akkor  $p < q$ -ból például a Hölder egyenlőtlenség miatt következik, hogy  $L_q \subset L_p$ : ha  $f \in L_q$ , akkor

$$\int_X |f|^p \leq \| |f|^p \|_{\frac{q}{p}} \cdot \| 1 \|_{\frac{q}{q-p}} = \| f \|_q^p \cdot (\mu(X))^{\frac{q-p}{q}} < \infty.$$

## Tétel

$L_p$ -ben sűrű az egyszerű függvények altere.

Ha  $p$  véges, akkor

$$L_p(\mathbb{R}^d) \begin{array}{l} \text{sűrű altér} \\ \supseteq \\ \text{sűrű altér} \\ \supseteq \\ \text{sűrű részhalmaz} \\ \supseteq \end{array} \begin{array}{l} \text{egyszerű függvények} \\ \text{"szép" függvények} \\ \text{rac. "szép" függvények} \end{array}$$

ahol a szép függvények a véges sok téglán konstans, azon kívül nulla függvények; a rac. "szép" függvények a racionális értékű, véges sok racionális téglán konstans, azon kívül 0 függvények.

Ha  $p$  véges, akkor

$$L_p(\mathbb{R}^d) \begin{array}{l} \text{sűrű altér} \\ \supseteq \end{array} \text{ kompakt tartójú folytonos függvények.}$$

## Következmény

Ha  $p$  véges, akkor  $L_p(\mathbb{R}^d)$  szeparábilis.

## Példa

$L_\infty(\mathbb{R})$  nem szeparábilis, mert a  $\chi_{(c,\infty)}$  ( $c \in \mathbb{R}$ ) alakú függvényekből kontinuum sok van, és bármelyik kettő távolsága 1, tehát az  $\frac{1}{2}$  sugarú környezetek diszjunktak.

# 32. Riesz–Fischer tétel

Példák pontonként és  $L_p$ -ben (nem) konvergens sorozatokra. Teljesség, Riesz–Fischer-tétel. Banach-tér. (Petruska II, 24. fejt.) [Petruska, 127–130. o.]

## Példák

Az új metrika új konvergenciafogalmat is jelent; a pontonkénti és az  $L_p$ -beli konvergencia nem következik egymásból:

1. Az  $f_n = \chi_{[n,n+1]}$  függvénysorozatra  $f_n \rightarrow 0$  pontonként, de  $f_n \not\rightarrow 0$   $L_p$ -ben.
2. Legyen  $n = 2^k + r$ ,  $0 \leq r < 2^k$  esetén  $g_n = \chi_{[\frac{r}{2^k}, \frac{r+1}{2^k}]}$ , tehát először a nagyra nőtt Jeff, majd egyre kisebb vakondok dugják ki a fejüket, de  $[0, 1]$  minden pontjában végtelen sok alkalommal. Ha  $p < \infty$ , akkor  $g_n \xrightarrow{L_p} 0$ , de  $g_n \not\rightarrow 0$  pontonként.
3. Az  $L_\infty$ -beli konvergencia a majdnem egyenletes konvergenciát jelenti, tehát egy nullmértékű halmazt elhagyva a függvénysorozat egyenletesen konvergál.

**1 Lemma.** Ha  $f_1, f_2, \dots \geq 0$  majdnem mérhető függvények, akkor

$$\left\| \sum_{n=1}^{\infty} f_n \right\|_p \leq \sum_{n=1}^{\infty} \|f_n\|_p.$$

**Bizonyítás.** Ha  $p = \infty$ : m.m.  $x$ -re

$$\sum_{n=1}^{\infty} f_n(x) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \|f_n\|_\infty.$$

Ha  $p < \infty$ , akkor

$$\begin{aligned} \left\| \sum_{n=1}^{\infty} f_n \right\|_p &= \left( \int_X \left( \sum_{n=1}^{\infty} f_n \right)^p d\mu \right)^{1/p} = \left( \int_X \left( \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N f_n \right)^p d\mu \right)^{1/p} = \\ &\stackrel{x^p \text{ folyt.}}{=} \left( \int_X \lim_{N \rightarrow \infty} \left( \sum_{n=1}^N f_n \right)^p d\mu \right)^{1/p} \stackrel{\text{m.k.}}{=} \left( \lim_{N \rightarrow \infty} \int_X \left( \sum_{n=1}^N f_n \right)^p d\mu \right)^{1/p} = \\ &\stackrel{x^{1/p} \text{ folyt.}}{=} \lim_{N \rightarrow \infty} \left( \int_X \left( \sum_{n=1}^N f_n \right)^p d\mu \right)^{1/p} = \lim_{N \rightarrow \infty} \left\| \sum_{n=1}^N f_n \right\|_p \leq \\ &\stackrel{\text{Minkowski}}{\leq} \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N \|f_n\|_p = \sum_{n=1}^{\infty} \|f_n\|_p. \end{aligned}$$

### Tétel (Riesz–Fischer)

Az  $L_p(X, \mathcal{M}, \mu)$  metrikus tér teljes, azaz minden Cauchy-sorozat konvergens.

**Bizonyítás.** A program: Kérjünk egy tetszőleges Cauchy-tulajdonságú  $(f_n)$  sortozatot az ellenségtől; ehhez konstruálunk limeszfüggvényt. Abban nem reménykedhetünk, hogy a  $(f_n)$  sorozat pontonként konvergens, de lesz egy alkalmas részsorozata, ami m.m. pontban konvergens. A részsorozat pontonkénti limesze lesz az  $L_p$  értelemben vett limeszfüggvény.

A Cauchy-tulajdonság  $\varepsilon = \frac{1}{2^k}$ -ra azt mondja, hogy

$$\forall k \in \mathbb{N} \quad \exists n_k \quad \forall m, n \geq n_k \quad \|f_n - f_m\|_p < \frac{1}{2^k}.$$

Az  $n_k$  indexeket tetszés szerint megnövelhetjük, ezért még azt is azt is feltehetjük, hogy  $n_1 < n_2 < n_3 < \dots$

Legyen  $g_k = f_{n_k}$  ( $k = 1, 2, \dots$ ). A következőket bizonyítjuk erről a részsorozatról:

1. A  $g_k$  sorozat m.m. pontban konvergens; a limeszfüggvényét jelölje  $g$ .
2.  $g \in L_p$  és  $g_k \xrightarrow{L_p} g$ .
3.  $f_n \xrightarrow{L_p} g$ .

1. Legyen  $h_1, h_2, \dots$  az a függvénysorozat, amelyre  $g_k = h_1 + h_2 + \dots + h_k$ , tehát  $h_1 = g_1$ , és  $i \geq 2$  esetén  $h_i = g_i - g_{i-1}$ . Legyen  $d = \sum_{i=1}^{\infty} |h_i|$ .

Az  $n_{k-1}$  definíciója miatt

$$\|h_k\|_p = \|f_{n_k} - f_{n_{k-1}}\|_p < \frac{1}{2^{k-1}}, \quad (k \geq 2),$$

$$\|d\|_p = \left\| \sum_{k=1}^{\infty} |h_k| \right\|_p \stackrel{\text{Lemma}}{\leq} \sum_{k=1}^{\infty} \|h_k\|_p \leq \|h_1\|_p + \sum_{k=2}^{\infty} \frac{1}{2^{k-1}} < \infty.$$

Emiatt  $d(x)$  m.m.  $x$ -re véges. Ha viszont egy  $x$  pontban  $d(x) = \sum |h_k(x)|$  véges, akkor a  $\sum h_k(x)$  sor konvergens, azaz a  $(g_k(x))$  sorozat konvergens. Legyen  $g = \lim g_k = \sum_{i=1}^{\infty} h_i$ . (Ez egyelőre pontonkénti limesz.)

2.

$$\|g - g_k\|_p = \left\| \sum_{i=k+1}^{\infty} h_i \right\|_p \stackrel{\text{Lemma}}{\leq} \sum_{i=k+1}^{\infty} \|h_i\|_p \leq \sum_{i=k+1}^{\infty} \frac{1}{2^{i-1}} = \frac{2}{2^k}.$$

3. Ha  $n \geq n_k$ , akkor

$$\|g - f_n\|_p \leq \|g - f_{n_k}\|_p + \|f_{n_k} - f_n\|_p = \|g - g_k\|_p + \|f_{n_k} - f_n\|_p < \frac{2}{2^k} + \frac{1}{2^k} = \frac{3}{2^k}.$$

Ezzel tetszőleges  $L_p(X)$ -beli Cauchy-sorozathoz konstruáltunk ( $L_p$  értelemben vett) limeszfüggvényt.

### Definíció

Azokat a normált vektortereket, amelyek egyben teljes metrikus terek is, Banach-térnek hívjuk.

### 33. Mértékben való konvergencia

Mértékben való konvergencia. Metrizálhatóság. Kapcsolat a mértékben való, az  $L_p$ -beli és a pontonkénti konvergencia között. Teljesség. [Petruska, 135–137. o.]

#### Definíció

Legyen  $(X, \mathcal{M}, \mu)$  mértéktér,  $M$  a majdnem mérhető, m.m. véges függvények vektortere, faktorizálva a m.m. nulla függvények terével.

Az  $f_1, f_2, \dots \in M$  függvénysorozat mértékben tart a  $g \in M$  függvényhez (jele:  $f_n \xrightarrow{m} g$  vagy  $f_n \xrightarrow{\mu} g$ , ha

$$\forall \delta > 0 \quad \mu\left(X(|f_n - g| \geq \delta)\right) \rightarrow 0.$$

#### Definíció

Definiálhatjuk  $M$ -en a következő metrikát:

$$d(f, g) = \min\left(1, \inf\left\{\delta + \mu\left(X(|f_n - g| \geq \delta)\right) : \delta > 0\right\}\right).$$

#### Tétel

- (a) A  $d$  függvény eltolásinvariáns metrika.  
 (b)  $f_n \xrightarrow{m} g$  akkor és csak akkor, ha  $d(f_n, g) \rightarrow 0$ .

**Bizonyítás.** (a) Csak a háromszög-egyenlőtlenség nem triviális; azt akarjuk igazolni, hogy  $d(f, g) + d(g, h) \geq d(f, h)$ . Ha  $d(f, g) = 1$  vagy  $d(g, h) = 1$ , akkor persze trivi.

Ha  $d(f, g) < 1$  és  $d(g, h) < 1$  akkor vegyünk egy tetszőleges  $\varepsilon$ -t. Ehhez létezik olyan  $\delta_1 > 0$  és  $\delta_2 > 0$ , hogy

$$\begin{aligned} \delta_1 + \mu(|f - g| \geq \delta_1) &< d(f, g) + \varepsilon, \\ \delta_2 + \mu(|g - h| \geq \delta_2) &< d(g, h) + \varepsilon; \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
d(f, h) &\leq \delta_1 + \delta_2 + \mu(|f - h| \geq \delta_1 + \delta_2) \\
&\leq \delta_1 + \delta_2 + \mu(|f - g| \geq \delta_1) + \mu(|g - h| \geq \delta_2) \\
&< d(f, g) + d(g, h) + \varepsilon.
\end{aligned}$$

Végül szokás szerint  $\varepsilon \rightarrow 0$ .

(b,  $\Rightarrow$ ) Legyen  $\varepsilon > 0$  tetszőleges,  $\delta = \varepsilon/2$ . Ekkor van olyan  $n_0$  küszöbindex, hogy  $n \geq n_0$  esetén  $\mu(|f_n - g| \geq \delta) < \delta$ . Akkor pedig

$$d(f_n, g) \leq \delta + \mu(|f_n - g| \geq \delta) < 2\delta = \varepsilon.$$

(b,  $\Leftarrow$ ) Legyen  $\delta_0 > 0$  és  $0 < \varepsilon < \min(1, \delta_0)$ . Olyan  $n_0$  kell, hogy  $n \geq n_0$  esetén  $\mu(|f_n - g| \geq \delta) < \varepsilon$ .

Legyen  $n_0$ , hogy  $n \geq n_0$ -ra  $d(f_n, g) < \varepsilon$ .

$$\begin{aligned}
d(f_n, g) &< \varepsilon \leq 1 \\
\inf \left\{ \delta + \mu(X(|f_n - g| \geq \delta)) \right\} &< \varepsilon \\
\exists \delta > 0 \quad \delta + \mu(X(|f_n - g| \geq \delta)) &< \varepsilon \leq \delta_0 \\
\delta &\leq \delta_0, \\
\mu(X(|f_n - g| \geq \delta_0)) &\leq \mu(X(|f_n - g| \geq \delta)) < \varepsilon.
\end{aligned}$$

### Tétel

Ha  $f_n \xrightarrow{L^p} g$ , akkor  $f_n \xrightarrow{m} g$ .

**Bizonyítás.** Ha  $p = \infty$ , akkor a konvergencia egy nullmértékű halmaztól eltekintve egyenletes.

Ha  $p < \infty$ , akkor

$$\begin{aligned}
\|f_n - g\|_p^p &= \int_X |f_n - g|^p d\mu \geq \mu(X(|f_n - g| \geq \delta)) \cdot \delta^p, \\
\mu(X(|f_n - g| \geq \delta)) &\leq \frac{\|f_n - g\|_p^p}{\delta^p} \rightarrow 0.
\end{aligned}$$

### Példa

Abból, hogy  $f_n \rightarrow g$  pontonként, nem következik, hogy  $f_n \xrightarrow{m} g$ . Például az  $(\mathbb{R}, \mathcal{L}, \lambda)$  mértéktérben az  $f_n = \chi_{(n, \infty)}$  sorozat pontonként tart 0-hoz, mégis  $d(f_n, 0) = 1$ .

## Tétel

Ha  $f_n \rightarrow g$  pontonként, és  $\mu$  véges, akkor  $f_n \xrightarrow{m} g$ .

**Bizonyítás.** Legyen  $\delta > 0$  tetszőleges.

$$\mu(|f_n - g| \geq \delta) \leq \mu\left(\bigcup_{k=n}^{\infty} X(|f_k - g| \geq \delta)\right) \rightarrow \mu\left(\bigcap_{n=1}^{\infty} \bigcup_{k=n}^{\infty} X(|f_n - g| \geq \delta)\right) = \mu(\emptyset) = 0.$$

## Tétel

A  $(M, d)$  metrikus tér teljes.

**Bizonyítás.** Tegyük fel, hogy  $f_n$  egy Cauchy-sorozat; ehhez szeretnénk mértékbeli limeszfüggvényt.

Minden  $k$ -ra legyen  $n_k$  olyan, hogy  $n, m \geq n_k$  esetén  $d(f_n, f_m) < \frac{1}{2^k}$ , és legyen  $A_k = X\left(|f_{n_k} - f_{n_{k+1}}| \geq \frac{1}{2^k}\right)$ .

Alkalmas  $\delta$ -val

$$\delta + \mu\left(|f_{n_k} - f_{n_{k+1}}| \geq \delta\right) < \frac{1}{2^k},$$

de akkor  $\delta < \frac{1}{2^k}$ , és így

$$\mu(A_k) = \mu\left(|f_{n_k} - f_{n_{k+1}}| \geq \frac{1}{2^k}\right) \leq \mu\left(|f_{n_k} - f_{n_{k+1}}| \geq \delta\right) < \frac{1}{2^k}.$$

Bármely  $k$  esetén, az  $A_k \cup A_{k+1} \cup \dots$  halmazon kívül az  $(f_{n_k})$  részsorozat egyenletesen Cauchy, így az is igaz, hogy m.m.pontban konvergens. Legyen  $g = \lim f_{n_k}$  a pontonkénti limesz.

Az  $A_k \cup A_{k+1} \cup \dots$  halmazon kívül  $|f_{n_k} - g| < \frac{2}{2^k}$ , ezért

$$d(f_{n_k}, g) \leq \frac{2}{2^k} + \mu\left(|f_{n_k} - g| \geq \frac{2}{2^k}\right) < \frac{4}{2^k}.$$

Tehát  $f_{n_k} \xrightarrow{m} g$ ; ebből következik, hogy  $f_n \xrightarrow{m} g$ .

## 34. $L_2$ -terek, ortogonális függvénysorok

Skaláris szorzás. Az  $L_2$  és  $\ell_2$  Hilbert-terek. A Legendre- és a trigonometrikus polinomok rendszerének teljessége. Az  $L_2([a, b])$  izomorfája az  $\ell_2$  térrel. [Petruska, 24. fej.]

A leggyakrabban előforduló esetek persze a legegyszerűbb  $L_1$  és  $L_\infty$ , no meg — a skaláris szorzás miatt — az  $L_2$ .

### Definíció

Az  $f, g \in L_2(X, \mathcal{M}, \mu)$  függvények skaláris szorzata

$$\langle f, g \rangle = \int_X f \bar{g} \, d\mu.$$

Ennek megvannak a véges dimenziós algebrából jól ismert tulajdonságai, pl.  $\langle f, f \rangle = \|f\|^2$ , valósban bi-komplexben szeszilinearitás, lehet véges sok vektorra Gram–Schmidt ortogonalizációt végezni stb.

A Cauchy–Schwarz egyenlőtlenség szerint

$$|\langle f, g \rangle| \leq \|f\|_2 \cdot \|g\|_2.$$

### Definíció

Az olyan Banach-teret, amelyekben van skaláris szorzás, és  $\|f\|^2 = \langle f, f \rangle$ , (valós, illetve komplex) Hilbert-tereknek hívjuk.

## Legendre-polinomok

Legyen most  $[a, b]$  korlátos, zárt intervallum. Az  $L_2([a, b])$  térben az  $1, x, x^2 \dots$  sorozatból Gram–Schmidt ortogonalizációval nyert ortogonális polinomokat nevezük Legendre-polinomoknak. Legyenek  $\omega_0, \omega_1, \dots$  a négyzetesen normált Legendre-polinomok, azaz  $\deg \omega_k = k$ ,  $\|\omega_k\|_2 = 1$  és  $j \neq k$  esetén  $\langle \omega_j, \omega_k \rangle = 0$ .

Ha egy tetszőleges  $f \in L_2$  függvényhez keressük a legközelebbi polinomot a legfeljebb  $k$ -adfokú polinomok terében, akkor jól ismert (és ez egy véges dimenziós állítás), hogy a legközelebbi  $p$  polinom a merőleges vetület, tehát

$$p = \sum_{j=0}^k c_j \omega_j, \quad \text{ahol } c_j = \langle f, \omega_j \rangle \text{ az } f \text{ vetülete az } \omega_j \text{ irányára.}$$

## Tétel

Legyen  $f \in L_2([a, b])$  tetszőleges függvény és  $c_j = \langle f, \omega_j \rangle$ . Ekkor

$$\sum_{j=0}^k c_j \omega_j \xrightarrow{L_2} f \quad \text{ha } n \rightarrow \infty.$$

**Bizonyítás.** Vegyük egy rögzített  $\varepsilon$ -t.

Válasszunk egy olyan  $g$  folytonos függvényt, amelyre  $\|f - g\|_2 < \varepsilon$ .

Weierstrass I. aproximációs tétele szerint a folytonos függvények jól közelíthetők polinomokkal: a  $g : [a, b] \rightarrow \mathbb{C}$  folytonos függvényhez és  $\varepsilon > 0$ -hoz van olyan  $q$  polinom, amelyre  $\max |g - q| < \varepsilon$ .

Legyen  $k = \deg q$ , és legyen  $p = \sum_{j=0}^k c_j \omega_j$  az  $f$  merőleges vetülete a legfeljebb  $k$ -adfokú polinomok alterére. Ekkor tehát

$$\|f - p\|_2 \leq \|f - q\|_2 \leq \|f - g\|_2 + \|g - q\|_2 < \varepsilon + \varepsilon.$$

Ez a tétel egy újfajta bázisfogalmat is ad: az  $f$  koordinátái az ortonormált polinomok bázisában a  $c_j$  számok, de most nem csak véges sok nemnulla lehet közöttük. Ezért az összeget is mint  $L_2$  értelemben konvergens függvénysort kell értelmeznünk.

A koordinátairányokra való vetítés egy természetes megfeleltetést ad az  $L_2([a, b])$  és  $\ell_2$  terek között: minden  $f \in L_2([a, b])$  függvényt megfeleltethetünk a  $(c_j)$  sorozatnak.

## Trigonometrikus polinomok

Polinomok helyett trigonometrikus függvényeket is használhatunk, így kapjuk a Fourier-sorokat. Pl. a  $[0, 2\pi]$  intervallumon, komplex alakban írva, az  $e^{inx}$  alakú függvények ( $n \in \mathbb{Z}$ ) ortogonálisak. Ha az alap intervallumunk a  $[0, 1]$  polinom, akkor az  $e^{2\pi inx}$  polinomok lesznek ortogonálisak. Az ilyenek lineáris kombinációit hívjuk trigonometrikus polinomoknak.

Weierstrass II. approximációs tétele szerint a  $2\pi$  szerint periodikus folytonos függvény közelíthető trigonometrikus polinomokkal, és a fenti bizonyítás is átvihető. A Fourier-sor  $k$ -adik együtthatója az  $f(x)$  és az  $e^{2\pi ikx}$  függvény skaláris szorzata, ezt az  $\hat{f}(k)$  szimbólummal is szokás jelölni:

## Definíció (Fourier-együtthető)

Legyen  $f \in L_2([0, 1])$  tetszőleges függvény és  $k$  egész szám. Az  $f$  függvény  $k$ -adik Fourier-együtthetője

$$\hat{f}(k) = \int_{[0,1]} e^{-2\pi i k x} f(x) \, d\lambda(x).$$

## 34.1 Tétel

Tetszőleges  $f \in L_2([0, 1])$  tetszőleges függvényre

$$\sum_{|k| \leq n} \hat{f}(k) e^{2\pi i k x} \xrightarrow{L_2} f \quad \text{ha } n \rightarrow \infty.$$

Ez persze nem ígér sokat a pontonkénti konvergenciáról...

Fejér Lipót észrevétele volt, hogy a részletösszegek átlaga szépen viselkedik.

## Tétel (Fejér)

Ha  $f(x)$  1 szerint periodikus, folytonos függvény, a Fourier-együtthetői

$$\hat{f}(k) = \int_0^1 e^{-2\pi i k x} f(x) \, dx,$$

a Fourier-részletösszegei

$$s_n(x) = \sum_{k=-n}^n \hat{f}(k) e^{2\pi i k x},$$

akkor

$$\frac{s_0(x) + s_1(x) + \dots + s_{n-1}(x)}{n} \rightarrow f(x)$$

egyenletesen.

## 35. L<sub>1</sub>-függvények konvolúciója

$L_1$ -beli függvények konvolúciója.  $L_1$  mint kommutatív Banach-algebra. [Petruska, 138. o.]

### Példák

Tegyük fel, hogy fényképet készítünk; a fényességet egy  $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$  függvény írja le. Igen ám, de a kezünk remeg, ezért a képet sokféle  $y$  vektorral eltoljuk, és az így eltolt, végtelen sokféle  $x \mapsto f(x - y)$  függvényt szuperponáljuk egymásra mindenféle  $g(y)$  súlyokkal, Ezért az áhított  $x \mapsto f(x)$  függvény helyett az  $x \mapsto \int_y g(y) \cdot f(x - y) dy$  elmosódott/szellemképes függvény lesz a kép.

Egy másik példa a polinomok és hatványsorok szorzása, a Cauchy-szorzat. Az  $a_0 + a_1x + \dots$  és  $b_0 + b_1x + \dots$  polinomok/sorok szorzata  $c_0 + c_1x + \dots$ , ahol  $c_n = \sum a_k b_{n-k}$ .

Független valószínűségi változók összegének vizsgálakor is találkozunk konvolúcióval: ha  $\xi_1$  és  $\xi_2$  független valószínűségi változók, a sűrűségfüggvényük  $f$ , illetve  $g$ , akkor  $\xi_1 + \xi_2$  sűrűségfüggvénye  $x \mapsto \int_y g(y) \cdot f(x - y) dy$ .

### Definíció

Az  $f, g : \mathbb{R}^p \rightarrow \mathbb{R}/\mathbb{C}$  függvények konvolúciója az

$$(f * g)(x) = \int_{y \in \mathbb{R}^p} f(y)g(x - y)d\lambda(y)$$

paraméteres integrállal megadott függvény, ha *valamilyen értelemben* létezik...

Az  $\mathbb{R}^p$  vektortér helyett mindenféle *mérhető csoportokra* is definiálhatjuk a konvolúciót (algebrai csoport, amin még egy eltolásinvariáns mérték is van). A legfontosabb példa a kör, avagy amikor a számegyenest periodikusan, modulo 1 vagy modulo  $2\pi$  tekintjük.

## Tétel

Ha  $f, g, h \in L_1(\mathbb{R}^p)$ , akkor

- (a) az  $f * g$  konvolúció m.m. pontban létezik,  $f * g \in L_1(\mathbb{R}^p)$  és  $\|f * g\|_1 \leq \|f\|_1 \cdot \|g\|_1$ ;
- (b) ha  $c, d$  számok, akkor  $(cf + dg) * h = c(f * h) + d(g * h)$  és  $f * (cg + dh) = c(f * g) + d(f * h)$ ;
- (c)  $f * g = g * f$ .
- (d)  $(f * g) * h = f * (g * h)$ .

A konvolúció tehát egyfajta szorzás (bilineáris operáció) az  $L_1$  téren.

**Bizonyítás.** (a) Fubini-tétel az  $f(y)g(x - y)$  függvényre.

Az  $(u, v) \mapsto f(u)g(v)$  függvény mérhető az  $(\mathbb{R}^p, \lambda_p) \times (\mathbb{R}^p, \lambda_p) = (\mathbb{R}^{2p}, \lambda_{2p})$  szorzattérben, és ezt komponáljuk az  $(x, y) \mapsto (y, x - y)$  lineáris (tehát mérhető) transzformációval, tehát az  $F(x, y) = f(y)g(x - y)$  függvény  $\lambda_{2p}$ -mérhető.

Az abszolút érték integrálja

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^p} |f(y)g(x - y)| d\lambda_{2p}(x, y) &\stackrel{\text{Fubini}}{=} \int_{y \in \mathbb{R}^p} |f(y)| \left( \int_{x \in \mathbb{R}^p} |g(x - y)| d\lambda_p(x) \right) d\lambda_p(y) \\ &= \int_{y \in \mathbb{R}^p} |f(y)| \|g\| d\lambda_p(y) = \|f\|_1 \cdot \|g\|_1 \end{aligned}$$

ami véges, ezért alkalmazhatjuk a Fubini tételt:

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^p} f(y)g(x - y) d\lambda_{2p}(x, y) &= \int_{x \in \mathbb{R}^p} \left( \int_{y \in \mathbb{R}^p} f(y)g(x - y) d\lambda_p(y) \right) d\lambda_p(x) \\ &= \int_{x \in \mathbb{R}^p} (f * g)(x) d\lambda_p(x). \end{aligned}$$

A Fubini-tétel miatt a belső integrál m.m.  $x$ -re létezik. Továbbá, mivel a kettős integrál véges, a belső integrál is, vagyis  $(f * g)(x)$  m.m.  $x$ -re véges.

Végül,

$$\begin{aligned} \|f * g\|_1 &= \int_{\mathbb{R}^p} |f * g| d\lambda_p = \int_{x \in \mathbb{R}^p} \left| \int_{y \in \mathbb{R}^p} f(y)g(x - y) d\lambda_p(y) \right| d\lambda_p(x) \\ &\leq \int_{\mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^p} |f(y)g(x - y)| d\lambda_{2p}(x, y) = \|f\|_1 \cdot \|g\|_1. \end{aligned}$$

(b) Triviális.

(c) A  $y \mapsto z = x - y$  helyettesítéssel (ld. 22 tétel)

$$(f * g)(x) = \int_{y \in \mathbb{R}^p} f(y)g(x - y)d\lambda(y) = \int_{z \in \mathbb{R}^p} f(x - z)g(z)d\lambda(y) = (g * f)(x).$$

(d) m.m.  $x$ -re

$$\begin{aligned} ((f * g) * h)(x) &= \int_{y \in \mathbb{R}^p} (f * g)(y) \cdot h(x - y) d\lambda_p(y) \\ &= \int_{y \in \mathbb{R}^p} \left( \int_{z \in \mathbb{R}^p} f(z) \cdot g(y - z) d\lambda_p(z) \right) d\lambda_p(y) \\ &\stackrel{\text{Fubini}}{=} \int_{z \in \mathbb{R}^p} f(z) \left( \int_{y \in \mathbb{R}^p} g(y - z) \cdot h(x - y) d\lambda_p(y) \right) d\lambda_p(z) \\ &\stackrel{w = y - z}{=} \int_{z \in \mathbb{R}^p} f(z) \left( \int_{y \in \mathbb{R}^p} g(w) \cdot h(x - z - w) d\lambda_p(w) \right) d\lambda_p(z) \\ &= \int_{z \in \mathbb{R}^p} f(z)(g * h)(x - z) d\lambda_p(z) = (f * (g * h))(x). \end{aligned}$$

### Definíció

Banach-tér szorzással: *Banach-algebra*. Az  $L_1(\mathbb{R}^p)$  tér a konvolúcióval egy kommutatív Banach-algebra.

### Példa

Az  $L_\infty(X)$  tér a pontonkénti szorzással egy másik Banach-algebra.

## Konvolúció és Fourier-sorok

A Fourier-sorok konvergenciájának vizsgálata során is gyakran találkozunk konvolúcióval. Tegyük fel, hogy  $f(x)$  egy 1 szerint periodikus, integrálható függvény; ennek Fourier-együtthatói, mint láttuk,

$$c_k = \int_{[0,1]} e^{-2\pi i k x} f(x) d\lambda(x).$$

A Fourier-sor  $n$ -edik részletösszege

$$\begin{aligned} s_n(x) &= \sum_{k=-n}^n c_k e^{2\pi i k x} = \sum_{k=-n}^n \left( \int_{y \in [0,1]} e^{-2\pi i k y} f(y) d\lambda(y) \right) e^{2\pi i k x} \\ &= \int_{y \in [0,1]} f(y) \left( \sum_{k=-n}^n e^{2\pi i k(x-y)} \right) d\lambda(y). \end{aligned}$$



Az itt fellépő

$$D_n(t) = \sum_{k=-n}^n e^{2\pi ikt} = \frac{\sin(2n+1)\pi t}{\sin \pi t}$$

függvény az  $n$ -edik *Dirichlet-magfüggvény*. Ezzel a jelöléssel

$$s_n(x) = \int_{y \in [0,1]} f(y) D_n(x-y) \, d\lambda(y),$$

vagyis

$$s_n = f * D_n.$$

Az első  $n$  részletösszeg átlaga

$$\sigma_n = \frac{s_0 + s_1 + \dots + s_{n-1}}{n} = f * \frac{D_0 + D_1 + \dots + D_{n-1}}{n} = f * F_n,$$

ahol

$$F_n(t) = \frac{D_0(t) + \dots + D_{n-1}(t)}{n} = \sum_{k=-n+1}^{n-1} \left(1 - \frac{|k|}{n}\right) e^{2\pi ikt} = \frac{1}{n} \left(\frac{\sin n\pi t}{\sin \pi t}\right)^2$$

az  $n$ -edik *Fejér-magfüggvény*.

**Megjegyzés.** Ha nem 1, hanem  $2\pi$  szerint periodikus függvényeket vizsgálunk, akkor a képletek módosulnak:

$$D_n(t) = \sum_{k=-n}^n e^{ikt} = \frac{\sin(2n+1)\frac{t}{2}}{\sin \frac{t}{2}}, \quad F_n(t) = \sum_{k=-n+1}^{n-1} \left(1 - \frac{|k|}{n}\right) e^{ikt} = \frac{1}{n} \left(\frac{\sin \frac{nt}{2}}{\sin \frac{t}{2}}\right)^2.$$

Az indexelés sem egyértelmű; van, aki szerint  $F_n = \frac{D_0 + \dots + D_n}{n+1}$ .

## 36. Fourier-transzformált

Fourier-transzformált.  $L_1$ -függvények Fourier-transzformáltja. Konvolúció Fourier-transzformáltja a Fourier-transzformáltak szorzata. A Fourier-transzformált homomorfizmus az  $(L_1, *)$  és  $(L_p, \cdot)$  Banach-algebrák között. Inverz transzformált (bizonyítás nélkül). Véges Borel-mértékek Fourier-transzformáltja. Fourier-Stieltjes transzformált. [Halász, 1–2. o.]

- Amikor egy polinomba vagy hatványsorba behelyettesítünk egy egységnyi komplex számot, ezt a behelyettesített szám argumentumával is felírhatjuk:

$$t \mapsto f(t) = \sum_n a_n (e^{2\pi it})^n.$$

Két polinom szorzata esetén előbb vehetjük a két együtthatósorozat konvolúciát (Cauchy-szorzatát), és utána helyettesítünk be, vagy előbb külön-külön helyettesítünk, aztán a helyettesítési értékeket simán összeszorozzuk: ha van egy  $g(t) = \sum_n b_n (e^{2\pi it})^n$  függvényünk is, akkor

$$f(t) \cdot g(t) = \sum_n \left( \sum_{k+\ell=n} a_k b_\ell \right) (e^{2\pi it})^n.$$

- Nagyon hasonló a Fourier-sorok együtthatóképlete: ha  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  1 szerint periodikus, akkor az  $n$ -edik Fourier együtthatója

$$c_n = \int_{[0,1]} f(x) e^{-2\pi i n x} d\lambda(x).$$

**1 Definíció.** Egy  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$  függvény Fourier-transzformáltja az

$$\hat{f}(s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2\pi i s x} dx$$

paraméteres integrállal megadott függvény, ha ez valamilyen értelemben létezik.

### Megjegyzés

Az inverz transzformált képlete

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(s) e^{2\pi i x s} ds.$$

(Ennek az értelmezésével is érvényességével még több gond van...)

**Megjegyzés.** Ahány ház, annyi szokás, és ugyanannyi alternatív definíció. Ha nem a Fourier-sorok együtthatóformuláját, hanem a sorba való behelyettesítést tekintjük a Fourier-transzformált elődjének, akkor az inverz transzformált képletében lesz a kitevőben negatív előjel. Ha nem 1, hanem  $2\pi$  szerint periodikus függvények Fourier-sorából indulunk ki, akkor a kitevőben nincs  $2\pi$ , viszont valahol osztani kell  $2\pi$ -vel, vagy mindkét képletben osztunk  $\sqrt{2\pi}$ -vel.

<i>Fourier-transzformált</i>	<i>inverz transzformáció</i>
(a) $\hat{f}(s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-2\pi ixs} dx$	$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(s)e^{2\pi ixs} ds$
(b) $\hat{f}(s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{ixs} dx$	$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(s)e^{-ixs} ds$
(c) $\hat{f}(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{ixs} dx$	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(s)e^{-ixs} ds$

Az  $L_2(\mathbb{R})$  térben az (a) és (c) is izometria, megtartják a skaláris szorzatot; ezek *unitér* lineáris transzformációk.

## L1-függvények Fourier-transzformáltja

A 1 definícióban a *valamilyen értelem* jelentheti a klasszikus improprius integrált vagy  $\lim_{K \rightarrow \infty} \int_{-K}^K f(x)e^{-2\pi ixs} dx$  centrált változatát, vagy a Lebesgue-integrált, csak ezek túl kevés esetben lesznek értelmesek.

Az improprius integrálban szereplő határérték helyett vizsgálhatjuk az átlagnak a határértékét:

$$\lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{K} \int_{L=0}^K \left( \int_{-L}^L f(x)e^{-2\pi ixs} dx \right) dL = \lim_{K \rightarrow \infty} \int_{-K}^K \left( 1 - \frac{|x|}{K} \right) f(x)e^{-2\pi ixs} dx.$$

Ha az improprius integrál létezik, akkor ez az *Cesaro-átlag* is létezik, és ugyanannyi.

Ezt tovább általánosíthatjuk, vehetjük az átlag átlaga átlagának az átlagát, ezeknek egyfajta határértékét. A  $(1 - \frac{|x|}{K})$  helyén fellépő, egyre simább, de egyre bonyolultabb *magfüggvények* helyett haranggörbét ( $e^{-x^2/2K}$ ) vagy más sima, szintén gyorsan lecsengő függvényeket is bele lehet tenni a definícióba, így egyre többféle függvénynek lehet a Fourier-transzformáltjáról beszélni.

Most csak a legegyszerűbb esetet nézzük, amikor a függvény az egész  $\mathbb{R}$ -en integrálható.

## Definíció

Egy  $f \in L_1(\mathbb{R})$  függvény Fourier-transzformáltja

$$\widehat{f}(s) = \int_{\mathbb{R}} f(x)e^{-2\pi isx} d\lambda(x).$$

## Tétel

Ha  $f \in L_1(\mathbb{R})$ , akkor

- (a)  $\widehat{f}(s) = \int_{\mathbb{R}} f(x)e^{-2\pi isx} dx$  minden valós  $s$ -re létezik és  $\|\widehat{f}\|_{\infty} \leq \|f\|_1$ .
- (b)  $\widehat{cf + dg} = c\widehat{f} + d\widehat{g}$  (lineáris)
- (c)  $\widehat{f * g} = \widehat{f} \cdot \widehat{g}$ .
- (d)  $\widehat{f}$  folytonos.
- (e)  $\lim_{s \rightarrow \pm\infty} \widehat{f}(s) = 0$ .

Más szóval, a Fourier-transzformált egy homomorfizmus az  $(L_1, *)$  és  $(L_{\infty}, \cdot)$  kommutatív Banach-algebrák között.

**Bizonyítás.** (a,b) triviális.

(c) Bármely  $c \in \mathbb{R}$ -re

$$\begin{aligned} \widehat{f * g}(s) &= \int_{x \in \mathbb{R}} (f * g)(x) e^{-2\pi isx} d\lambda(x) \\ &= \int_{x \in \mathbb{R}} \left( \int_{y \in \mathbb{R}} f(y)g(x-y) d\lambda(y) \right) e^{-2\pi isx} d\lambda(x) \\ &= \int_{y \in \mathbb{R}} f(y) e^{-2\pi isy} \left( \int_{x \in \mathbb{R}} g(x-y) e^{-2\pi is(x-y)} d\lambda(x) \right) d\lambda(y) \\ &= \int_{y \in \mathbb{R}} f(y) e^{-2\pi isy} \cdot \widehat{g}(s) d\lambda(y) = \widehat{f}(s) \cdot \widehat{g}(s). \end{aligned}$$

(d) Átviteli elv. Vegyünk egy tetszőleges  $s_0 \in \mathbb{R}$  számot és egy hozzá konvergáló  $s_1, s_2, \dots$  sorozatot. Azt kell igazolni, hogy  $\widehat{f}(s_n) \rightarrow \widehat{f}(s_0)$ .

Legyen  $g_n(x) = f(x)e^{-2\pi is_n x}$ . Erre a függvényre  $g_n(x) \rightarrow g_0(x)$  pontonként, és a függvénysorozatot dominálja az integrálható  $|f(x)|$  függvény. A dominált konvergencia tétel miatt

$$\widehat{f}(s_n) = \int_{\mathbb{R}} g_n(x) d\lambda(x) \rightarrow \int_{\mathbb{R}} g_0(x) d\lambda(x) = \widehat{f}(s_0).$$

(e) Vegyünk egy tetszőleges  $\varepsilon > 0$  számot. Ehhez letezik egy olyan  $g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  szép függvény, ami véges sok korlátos intervallumon konstans és azon kívül 0, tehát  $g = \sum_{k=1}^n c_k \cdot \chi_{[a_k, b_k)}$ , és  $\|f - g\|_1 < \frac{\varepsilon}{2}$ . Az (a)-beli triviális becslés szerint

$$|\hat{f}(s) - \hat{g}(s)| \leq \|f - g\|_1 < \frac{\varepsilon}{2}.$$

Bármely  $s \neq 0$  esetén  $e^{-2\pi i s x}$  egy primitív függvénye  $-\frac{1}{2\pi i s} e^{-2\pi i s x}$ , ezért

$$\begin{aligned} |\hat{g}(s)| &= \left| \sum_{k=1}^n \int_{[a_k, b_k)} c_k e^{-2\pi i s x} d\lambda(x) \right| \leq \sum_{k=1}^n |c_k| \left| \int_{a_k}^{b_k} e^{-2\pi i s x} dx \right| \\ &\leq \sum_{k=1}^n |c_k| \left| \left[ -\frac{1}{2\pi i s} e^{-2\pi i s x} \right]_{a_k}^{b_k} \right| \leq \sum_{k=1}^n |c_k| \frac{1}{\pi |s|} = \frac{\sum |c_k|}{\pi |s|}, \end{aligned}$$

ami 0-hoz tart. Ezek után legyen  $K_\varepsilon = \frac{\sum |c_k|}{\varepsilon}$ ; erre a számra teljesül, hogy minden  $|s| > K_\varepsilon$  esetén  $|\hat{g}(s)| < \frac{\varepsilon}{2}$ , és akkor

$$|\hat{f}(s)| \leq |\hat{g}(s)| + |\hat{f}(s) - \hat{g}(s)| < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon. \quad \square$$

## Inverz transzformált

Az inverz transzformált képletének azt várjuk, hogy

$$f(x) = \int_{\mathbb{R}} \hat{f}(s) e^{2\pi i x s} d\lambda(s),$$

csak ez nem feltétlenül létezik, ugyanis  $\hat{f}(s)$  nagyon lassan is tarthat 0-hoz. Ráadásul ez a képlet is csak folytonos, 0-hoz tartó függvényeket állít elő, márpedig az  $f$  függvény nem feltétlenül ilyen. Szerencsére a Cesaro-szummázás működik.

### Tétel

Ha  $f \in L_1(\mathbb{R})$ , akkor

$$f(x) = \lim_{K \rightarrow \infty} \int_{-K}^K \left(1 - \frac{|s|}{K}\right) \hat{f}(s) e^{2\pi i x s} ds$$

majdnem minden  $x$ -re (pl. az  $f$  Lebesgue-pontjaira igaz.)

A tételt itt nem bizonyítjuk; elolvashatjátok a Halász-jegyzetben [Halász, 1–5].

## Következmény

Ha  $f \in L_1(\mathbb{R})$  és  $\hat{f} \in L_1(\mathbb{R})$ , akkor

$$f(x) = \int_{\mathbb{R}} \hat{f}(s) e^{2\pi i x s} d\lambda(s)$$

majdnem minden  $x$ -re.

## Mértékek Fourier-transzformáltja

A Radon–Nikodym tétel miatt az integrálható függvényeket azonosíthatjuk a véges, abszolút folytonos előjeles mértékekkel. Ha  $f \in L_1(\mathbb{R})$ , és  $\vartheta(H) = \int_H f d\lambda$  az  $f$  integrálásából származó előjeles mérték, akkor

$$\hat{f}(s) = \int_{\mathbb{R}} e^{2\pi i x s} f(x) d\lambda(x) = \int_{\mathbb{R}} e^{2\pi i x s} d\vartheta(x).$$

Ezt a képletet persze kiterjeszthetjük bármilyen véges mértékre.

### Definíció

- Ha  $\vartheta$  véges előjeles vagy komplex Borel-mérték  $\mathbb{R}$ -en, akkor a Fourier-transzformáltja

$$\hat{\vartheta}(s) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-2\pi i x s} d\vartheta(x).$$

- Ezzel ekvivalensen, ha a  $\vartheta$  egy eloszlásfüggvénye  $F$ , akkor

$$\hat{\vartheta}(s) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-2\pi i x s} dF(x).$$

Az utóbbi képletet hívhatjuk *az  $F$  függvény Fourier–Stieltjes transzformáltjának*.

## Definíció

- Ha  $\xi$  valós értékű valószínűségi változó, az eloszlása a  $P$  valószínűségi Borel-mérték, eloszlásfüggvénye  $F(x) = P(\xi < x)$ , akkor a  $\xi$  *karakterisztikus függvénye*

$$\varphi_{\xi}(s) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{ixs} dP(x) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{ixs} dF(x) = E(e^{is\xi}).$$

- Ha  $\xi$  abszolút folytonos, akkor létezik egy  $f$  sűrűségfüggvénye, és

$$\varphi_{\xi}(s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{ixs} d\lambda(x).$$

(Félre: Ez is mutatja, hogy a Fourier-transzformált összes változatára fel kell készülnünk,  $\pm 2\pi$ -vel és anélkül...)

A karakterisztikus függvényeknek azokban a határeloszlás-tételekben, amikor sok független valószínűségi változót adunk össze, fontos szerepük van. Ugyanis az összeg sűrűségfüggvénye a sűrűségfüggvények konvolúciója, és sokkal könnyebb a karakterisztikus függvényeket pontonként összeszorozni vagy éppen egyetlen függvényt hatványozni, mint konvolúcióhatványokat számolni.

# Valós analízis IV. tételjegyzék<sup>3</sup>

2022/2023, II. félév

1. Green-tétel
2. Integráltételek síkban
3. Integráltételek három dimenzióban
4. Halmazstruktúrák, Borel-halmazok
5. Halmazfüggvények, mértékek
6. Lebesgue-mérték
7. Relatív külső mértékek
8. Teljes mértékterek
9. A mértékkiterjesztési tétel
10. Lebesgue-Stieltjes mértékek egy dimenzióban
11. Lebesgue-Stieltjes mértékek véges dimenzióban.
12. Lokálisan véges Borel-mértékek regularitása
13. Mérhető függvények
14. Nemnegatív függvények integrálja
15. Nemnegatív függvénysorozatok integrálja
16. Valós és komplex értékű függvények integrálja
17. Függvénysorozatok integrálja
18. A Riemann-integrál létezésének feltételei
19. Előjeles mértékek variációi
20. Előjeles mértékek felbontási tétel
21. Lebesgue-felbontás
22. Radon–Nikodym derivált
23. Differenciálbázisok; előjeles mérték deriváltja
24. A maximális operátor tétele
25. Borel-mértékek differenciálása
26. A sűrűségi tétel
27. Abszolút folytonos függvények
28. Szinguláris függvények
29. Véges sok mértéktér szorzata
30. Végtelen sok mértéktér szorzata
31.  $L_p$ -terek
32. Riesz–Fischer tétel
33. Mértékben való konvergencia
34.  $L_2$ -terek, ortogonális függvénysorok
35.  $L_1$ -függvények konvolúciója
36.  $L_1$ -függvények Fourier-transzformáltja

Sorszám, név	Differenciális alak	Integrális alak
I. Gauss-törvény	$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$	$\oint_A \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \int_V \frac{\rho}{\varepsilon_0} \cdot dV = \frac{Q}{\varepsilon_0}$
II. Faraday–Lenz törvény	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$
III. Gauss mágneses törvénye	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\oint_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$
IV. Ampère-törvény	$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$	$\oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \int_A \mathbf{J} \cdot d\mathbf{A} + \frac{1}{c^2} \frac{d}{dt} \int_A \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A}$

<sup>3</sup>Ez csak tervezet, a félév végéig még változhat.



# Tájékoztató és részletes tételjegyzék az Analízis IV. vizsgához (sillabusz)<sup>4</sup>

2022/2023, II. félév

A vizsga részei:

- Felkészülés (legalább 40 perc)
- A tételjegyzék két tételének vázlatos kidolgozása és szóbeli előadása.
- Válaszadás a vizsgáztató szóbeli kérdéseire.

A vizsgán a tételjegyzéket használhatjátok, a sillabuszt nem.

Az elégséges osztályzathoz legalább ki kell tudni mondani a tananyagban szereplő tételeket (jegyzet nélkül).

Egyszerre 4-5 vizsgázó készülhet a teremben.

## Részletes tételjegyzék

### 1. Green-tétel

A vonalintegrál általánosításai. Síkvektorok keresztszorzata, irányított szöge. Egyszerű zárt görbék, Jordan-görbetétel (bizonyítás nélkül). Egyszerű zárt görbe irányítása. Green-tétel (bizonyítás normáltartományra, és a bizonyítás vázlata az általános esetben). [LTS2, 200–204. o.]

### 2. Integráltételek síkban

Külső normális egyszerű zárt görbe mentén. Newton-Leibniz formula síkban. Mese a kertünkben felőrő talajvíz forráserősségéről és -sűrűségéről. Divergencia (magasabb dimenzióban is). Gauss-Osztrogradszkij tétel 2-dimenzióban. Mese vektormező örvényerősségéről és -sűrűségéről. Rotáció 2-dimenzióban. Stokes-tétel 2-dimenzióban.

### 3. Integráltételek három dimenzióban

Folytonosan differenciálható paraméteres felületek. Területelem, normálvektor, felszín. Felszín szerinti és felületi integrálok. Függvénygrafikon mint paraméteres felület normálvektora. A Green-tétel térbeli megfelelője. 3-dimenziós Newton-Leibniz formula. Zárt felületeken a területvektor integrálja 0. Gauss-Osztrogradszkij tétel. Rotáció 3-dimenzióban. Stokes-tétel. Kelvin-Stokes tétel (bizonyítás nélkül). Kapcsolat a Maxwell-egyenletek differenciális és integrális alakjai között. (Magukat a Maxwell-egyenleteket nem kell megtanulni.) [LTS2, 211–221. o.]

---

<sup>4</sup>*Ez csak tervezet, a félév végéig még változhat.*

## 4. Halmazstruktúrák, Borel-halmazok

Nem létezik pozitív, eltolásinvariáns, normált,  $\sigma$ -additív függvény  $\mathcal{P}(\mathbb{R}^p)$ -n. Banach–Tarski paradoxon (bizonyítás nélkül); nem létezik pozitív, eltolásinvariáns, normált, additív függvény  $\mathcal{P}(\mathbb{R}^3)$ -ön. Halmazrendszerek: halmazgyűrű, algebra,  $\sigma$ -gyűrű,  $\sigma$ -algebra, modulus, félgűrű. Félgűrűben véges és megszámlálható unió átalakítása diszjunkt halmazok uniójára. Generált struktúrák. Megszorítás. Borel-halmazok topologikus terekben. [Petruska, 51–52, 55, 81–82. o.]

## 5. Halmazfüggvények, mértékek

Kiterjesztett számegegyenes. Halmazfüggvények. Monoton, additív  $\sigma$ -additív, szubadditív,  $\sigma$ -szubadditív halmazfüggvények. Mérték. Előjeles és komplex mértékek. Mértéktér. Számosságmérték, Dirac-mérték. A mértékek additivitása, monotonitása és folytonossága.

## 6. Lebesgue-mérték

A Lebesgue-féle külső mérték, kétféle ekvivalens definíció. Monotonitás. Kompakt halmazok és Jordan-mérhető halmazok külső mértéke. Egybevágóság és hasonlóság hatása.  $\sigma$ -szubadditivitás. A belső mérték lehetséges definíciója. Mérhetőség. A Lebesgue-mérhető halmazok  $\sigma$ -algebrát alkotnak, és ezen  $\bar{\lambda}$  mérték (bizonyítás nélkül). A Jordan-mérhető halmazok Lebesgue-mérhetőek is (bizonyítás nélkül). Nullmértékű halmazok.  $\mathbb{R}^p$ -ben.  $\mathcal{B} \neq \mathcal{L}$ . Minden pozitív külső mértékű halmaz tartalmaz nem mérhető részhalmazt.

## 7. Relatív külső mértékek

Relatív külső mértékből származó külső mérték. Nemnegatív halmazfüggvényhez asszociált külső mérték. A mérhető halmazok. A mérhető halmazok  $\sigma$ -algebrát alkotnak. A Lebesgue-mérhető halmazok  $\sigma$ -algebrát alkotnak.

## 8. Teljes mértékterek

Külső mérték szerint nullmértékű halmaz. A nullmértékű halmazok mérhetőek. Teljes mértéktér. Teljes mértéktér megszorítása teljes. A Lebesgue-mérték teljes. Minden mértéktér tejesse tehető.

## 9. A mértékkiterjesztési tétel

Félgűrűn additív relatív külső mérték kiterjeszthető a generált gyűrűre. Példa arra, hogy a kiterjesztés nem mindig egyértelmű.  $\sigma$ -végesség. Mértékkiterjesztési tétel. A kiterjesztés egyértelműsége  $\sigma$ -véges térben. Minden Jordan-mérhető és minden Borel-halmaz Lebesgue-mérhető. A  $\mathcal{L}_p =$ , illetve a  $\mathcal{B}$  algebrán a Lebesgue-mérték az egyetlen pozitív, normált, eltolásinvariáns mérték.

## 10. Lebesgue-Stieltjes mértékek egy dimenzióban

Lokálisan véges 1-dimenziós Borel-mérték. Eloszlásfüggvény. Az eloszlásfüggvény balról folytonos. A különböző típusú intervallumok mértékének kifejezése az eloszlásfüggvénnyel. Additív intervallumfüggvények. Megengedett végpontok. Egydimenziós Lebesgue-Stieltjes mértékek. Minden lokálisan véges Borel-mérték egy Lebesgue-Stieltjes mérték megszorítása a Borel-mérhető halmazokra.

## 11. Lebesgue-Stieltjes mértékek véges dimenzióban.

Kiterjesztés véges dimenzióban. Eloszlásfüggvény. Additív téglafüggvény. Folytonossági hipersík. A folytonossági hipersíkok halmaza megszámlálható. Lebesgue-Stieltjes mérték véges dimenzióban. Minden lokálisan véges Borel-mérték egy Lebesgue-Stieltjes mérték megszorítása a Borel-mérhető halmazokra.

## 12. Lokálisan véges Borel-mértékek regularitása

Mérhető halmaz közelítése nyílt, zárt, kompakt,  $G_\delta$  és  $F_\sigma$  halmazokkal. Mérhető halmazok "távolsága". Minden véges mértékű, Lebesgue-Stieltjes mérhető halmazhoz van tetszőlegesen közeli halmaz, ami véges sok (racionális koordinátájú) téglalap uniója.

## 13. Mérhető függvények

Mérhető függvények, a mérhetőség különböző ekvivalens feltételei félegyenesek ösképeivel. Mérhetőség és műveletek (min, max, alpműveletek, határérték, kompozíció), megszámlálható sok mérhető függvény pontonkénti szuprémuma, infimuma, liminfje, limsupja, a konvergenciahalmaz mérhetősége. Luzin tétele.

## 14. Nemnegatív függvények integrálja

$0 \cdot \infty = 0$ . Egyszerű függvények. Egyszerű függvény integrálja. Nemnegatív mérhető függvény integrálja. Műveletek.

## 15. Nemnegatív függvénysorozatok integrálja

Monoton konvergencia tétel. A MKT. nem igaz csökkenő sorozatra. Összeg integrálja. Beppo Levi tétele. Végtelen táblázat összege mint a BLT speciális esete. Fatou-lemma. Példák, amikor a Fatou-lemmában nincs egyenlőség, illetve limsuppal egyik irányban sem igaz. Rögzített mérhető, nemnegatív függvény integrálja mérték.

## 16. Valós és komplex értékű függvények integrálja

Előjeles és komplex függvények integrálja. Műveletek. Rögzített függvény integrálja, mint előjeles/komplex mérték.

## 17. Függvénysorozatok integrálja

Fatou-Lebesgue tétel. Korlátos kovergencia tétel. Dominált konvergencia tétel. Az integrál kiterjesztése majdnem mérhető függvényekre. Ha  $\sum \int |f_n|$  konvergens, akkor  $f_n \rightarrow 0$  m.m.

## 18. A Riemann-integrál létezésének feltételei

Alulról és felülről folytonos függvények. Alsó és felső burkoló. A burkolófüggvények Borel-mérhetősége. A Riemann-integrálhatóság Lebesgue-féle ekvivalens feltétele.

## 19. Előjeles mértékek variációi

Előjeles és komplex mértékek. Előjeles mérték nem veheti fel mindkét végtelent. Majoráns mérték. Pozitív, negatív és totális variáció. A totális variáció majorálja a pozitív és a negatív

## 20. Előjeles mértékek felbontási tételei

Előjeles mérték szerint létezik maximális és minimális mértékű halmaz. Hahn-felbontás. Jordan-felbontás.  $\tau = \pi + \nu$ . Minden előjeles előáll, mint a totális variációja szerinti integrál.

## 21. Lebesgue-felbontás

Mérték tartója. Abszolút folytonos és szinguláris mértékek. Adott mértéknél nem nagyobb maximális szinguláris mérték. Lebesgue-felbontás. Egyértelműség.

## 22. Radon–Nikodym derivált

Radon–Nikodym derivált. Radon–Nikodym tétel. Helyettesítéses integrálás. A totális variáció szerinti RN derivált. Előjeles és komplex mérték szerinti integrál definíciói.

## 23. Differenciálbázisok; előjeles mérték deriváltja

Differenciálbázis. Alsó és felső deriváltak. Műveletek.

## 24. A maximális operátor tétele

A maximális operátor, az alsó és a felső derivált mérhetősége. A maximális operátor tétele. Lokálisan véges mérték alsó és felső deriváltja m.m. véges.

## 25. Borel-mértékek differenciálása

Lebesgue-pont. Lokálisan integrálható függvénynek majdnem pontja Lebesgue-pont. Abszolút folytonos mérték m.m. differenciálható, és a deriváltja megegyezik a Radon–Nikodym deriválttal. A mértékek differenciálásnak fő tétele. Lokálisan véges Borel-mérték akkor és csak akkor szinguláris, ha a deriváltja m.m. 0.

## 26. A sűrűségi tétel

Mérhető burok. Alsó és felső sűrűség. Az alsó és felső sűrűség megegyezik az alsó és felső szimmetrikus deriválttal. Sűrűségi pont. Sűrűségi tétel.

## 27. Abszolút folytonos függvények

Abszolút folytonos függvény. A Lipschitz-tulajdonság, az abszolút folytonosság és a folytonosság kapcsolata. Monoton növekvő függvény abszolút folytonosságának átfogalmazása a megváltozásból származó mértékkel és Radon–Nikodym deriválttal.

## 28. Szinguláris függvények

Szinguláris függvény. Monoton növekvő függvény szingularitásának átfogalmazása a megváltozásból származó mértékkel. Lebesgue-felbontás. Minden monoton függvény m.m. differenciálható. Fubini-tétel monoton függvények összegének tagonkénti differenciálásáról. Newton–Leibniz formula.

## 29. Véges sok mértéktér szorzata

$\sigma$ -additivitás két mértéktér direkt szorzatán. Két mértéktér szorzata. Fubini-tétel (bizonyítás nélkül). Véges sok mértéktér szorzata.

## 30. Végtelen sok mértéktér szorzata

Akárhány valószínűségi mértéktér szorzata. Bizonyítás a  $\sigma$ -szubadditivitásra.

## 31. $L_p$ -terek

$L_p$ -normák. Konjugált kitevők, Hölder-, Cauchy–Schwarz és Minkowski-egyenlőtlenség. Valós és komplex  $\ell_p$  és  $L_p$  terek. Sűrű alterek  $L_p$ -terekben (egyszerű, szép (véges sok, téglán konstans), kompakt tartójú folytonos függvények alterei).  $L_p(\mathbb{R}^n)$ -ben  $p < \infty$  esetén sűrű halmazzal alkotnak a véges sok, racionális koordinátájú téglalapon racionális konstans függvények. Szeparabilitás. Példa arra, hogy  $L_\infty(\mathbb{R})$  nem szeparábilis. Példák arra, hogy  $L_p \not\subset L_q$ .

### 32. Riesz–Fischer tétel

Teljesség, Riesz-Fischer-tétel. Banach-tér. (Petruska II, 24. fej.)

### 33. Mértékben való konvergencia

Mértékben való konvergencia. Metrizálhatóság. Kapcsolat a mértékben való, az  $L_p$ -beli és a pontonkénti konvergencia között. Teljesség.

### 34. $L_2$ -terek, ortogonális függvénysorok

Skaláris szorzás. Az  $L_2$  és  $\ell_2$  Hilbert-terek. A Legendre- és a trigonometrikus polinomok rendszerének teljessége. Az  $L_2([a, b])$  izomorfiája az  $\ell_2$  térrel. (Petruska II, 24. fej.)

### 35. $L_1$ -függvények konvolúciója

$L_1$ -beli függvények konvolúciója. Műveletek.  $L_1$  mint kommutatív Banach-algebra.

### 36. $L_1$ -függvények Fourier-transzformáltja

Fourier-transzformált.  $L_1$ -függvények Fourier-transzformáltja. Konvolúció Fourier-transzformáltja a Fourier-transzformáltak szorzata. A Fourier-transzformált homomorfizmus az  $(L_1, *)$  és  $(L_\infty, \cdot)$  Banach-algebrák között. Inverz transzformált (bizonyítás nélkül). Véges Borel-mértékek Fourier-transzformáltja.

# Hivatkozások

- [LTS2] Laczkovich Miklós – T.Sós Vera: Analízis II. (ELTE jegyzet, Nemzeti Tankönyvkiadó)
- [Petruska] Petruska György: Analízis II. Egyetemi jegyzet, ELTE Eötvös Kiadó, 1988.
- [Halász] Halász Gábor: Fourier integrál. Egyetemi jegyzet, ELTE, 2005.
- [Friedmann] [H. Friedman: A consistent Fubini-Tonelli theorem for nonmeasurable functions.](#) Illinois J. Math., 24 (3): 390–395, MR 0573474