

Organizační úvod

TODO!!!

Úvod

TODO!!!

Definice 0.1

Zúplnění míry λ_B^n nazveme Lebesgueovou mírou v \mathbb{R}^n .

Poznámka 1. Lebesgueova míra je σ -konečná.

2. Množinu $\mathcal{B}_0(\mathbb{R}^n) := \sigma(\mathcal{B}(\mathbb{R}^n) \cup \mathcal{N})$ nazýváme σ -algebrou lebesgueovsky měřitelných množin. Platí $\mathcal{B}(\mathbb{R}^n) \subsetneq \mathcal{B}_0(\mathbb{R}^n) \subsetneq \mathcal{P}(\mathbb{R}^n)$.

3. Lebesgueova míra je regulární v následujícím smyslu:

$$\forall E \in \mathcal{B}_0(\mathbb{R}^n) \forall \varepsilon > 0 \exists \text{otevřená množina } G \exists \text{uzavřená množina } F : F \subset E \subset G \wedge \mu(G \setminus F) < \varepsilon.$$

Definice 0.2 (Značení)

Nechť X, Y jsou množiny a $f : X \rightarrow Y$. Je-li $\mathcal{S} \subset \mathcal{P}(Y)$, pak $f^{-1}(\mathcal{S}) := \{f^{-1}(S) | S \in \mathcal{S}\}$.

Věta 0.1 (O zobrazení $f : X \rightarrow Y$)

Nechť X, Y jsou množiny a $f : X \rightarrow Y$.

1. Je-li \mathcal{M} σ -algebra na Y , pak $f^{-1}(\mathcal{M})$ je σ -algebra na X .

2. Je-li $\mathcal{S} \subset \mathcal{P}(Y)$, pak $f^{-1}(\sigma(\mathcal{S})) = \sigma(f^{-1}(\mathcal{S}))$.

┌ *Důkaz*

└ Později.

□

1 Měřitelná zobrazení

Definice 1.1 (Měřitelné zobrazení)

Nechť (X, \mathcal{A}) , (Y, \mathcal{M}) jsou měřitelné prostory. Zobrazení $f : X \rightarrow Y$ nazveme měřitelným (vzhledem k \mathcal{A} a \mathcal{M}), jestliže $f^{-1}(\mathcal{M}) \subset \mathcal{A}$.

Jestliže některý z prostorů X, Y je metrický prostor, pak za příslušnou σ -algebru bereme σ -algebru borelovských podmnožin (pokud není řečeno jinak).

Měřitelné zobrazení mezi dvěma metrickými prostory se nazývá borelovsky měřitelné (krátce borelovské).

Poznámka 1. Snadno se ověří, e kompozice dvou měřitelných zobrazení je měřitelné zobrazení.

2. Z věty O zobrazení... plyne, že jsou-li $(X, \mathcal{A}), (Y, \mathcal{M})$ měřitelné prostory, pak zobrazení $f : X \rightarrow Y$ je měřitelné právě tehdy, když $f^{-1}(\mathcal{S}) \subset \mathcal{A}$, kde $\mathcal{S} \subset \mathcal{P}(Y)$ je generátor σ -algebry \mathcal{M} . Speciálně je-li (X, \mathcal{A}) a Y metrický prostor, pak zobrazení $f : X \rightarrow Y$ je měřitelné $\Leftrightarrow f^{-1}(G) \in \mathcal{A} \forall$ otevřenou množinu $G \subset Y$.

Důsledek

Každé spojitě zobrazení mezi dvěma metrickými prostory je měřitelné (borelovské).

┌

Důkaz

Z věty O zobrazení... (vzory otevřených množin při spojitěm zobrazení jsou otevřené množiny). □

Věta 1.1 (Generátory $\mathcal{B}^n := \mathcal{B}(\mathbb{R}^n)$)

Borelovská σ -algebra \mathcal{B}^n je generována

1. *otevřenými intervaly $(a_1, b_1) \times \dots \times (a_n, b_n)$, kde $-\infty < a_i < b_i < +\infty$,*
2. *systémem $\mathcal{S} := \{(-\infty, a_1) \times \dots \times (-\infty, a_n)\}$, kde $a_i \in \mathbb{R}$.*

Věta 1.2 (O měřitelných zobrazeních)

Nechť (X, \mathcal{A}) je měřitelný prostor.

1. *Jsou-li $f : X \rightarrow \mathbb{R}^n$ a $g : X \rightarrow \mathbb{R}^m$ měřitelná zobrazení, pak zobrazení $(f, g) : X \rightarrow \mathbb{R}^{n+m}$ je měřitelné.*
2. *Jsou-li $f, g : X \rightarrow \mathbb{R}^n$ měřitelná zobrazení, pak zobrazení $f \pm g$ jsou měřitelná zobrazení.*
3. *Jsou-li $f, g : X \rightarrow \mathbb{R}$ měřitelné funkce, pak také $f \cdot g, \max(f, g), \min(f, g)$ jsou měřitelné.*

Poznámka

Prostor \mathbb{R}^* je metrický prostor s metrikou např. $\varrho^*(x, y) = |\varphi(x) - \varphi(y)|$, kde $\varphi(x) := \frac{x}{1+|x|}$ pro konečné x a $\varphi(\pm\infty) = \pm 1$ (tzv. redukováná metrika).

Redukovaná metrika má následující vlastnosti (viz Jarník – Diferenciální počet 2, str. 245, 246):

1. V množině \mathbb{R} je ekvivalentní s eukleidovskou metrikou.
2. Konvergence v prostoru $(\mathbb{R}^*, \varrho^*)$ splývá s konvergencí zavedenou v \mathbb{R}^* pomocí okolí bodů.

Platí $\mathcal{B}^* := \mathcal{B}(\mathbb{R}^*) = \sigma(\{\langle -\infty, a \rangle \mid a \in \mathbb{R}\})$. Plyne z:

1. \forall otevřenou množinu $G \subset \mathbb{R}^*$ lze psát jako spočetné sjednocení intervalů typu $\langle -\infty, a \rangle, (a, b), (b, \infty)$.
2. $\langle -\infty, a \rangle$ je stejný jako v \mathbb{R}^* .
3. $(a, +\infty)$ je $\mathbb{R}^* \setminus \langle -\infty, a \rangle$.
4. $(a, +\infty) = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} \langle a + \frac{1}{n}, +\infty \rangle$.
5. $(a, b) = \langle -\infty, b \rangle \cap (a, +\infty)$.

Věta 1.3 (O měřitelných funkcích)

Bud' (X, \mathcal{A}) měřitelný prostor. Pak platí

1. $f : (X, \mathcal{A}) \rightarrow \mathbb{R}$ je měřitelná funkce právě tehdy, když $f^{-1}((-\infty, a)) \in \mathcal{A}, \forall a \in \mathbb{R}$.
2. $f : (X, \mathcal{A}) \rightarrow \mathbb{R}^*$ je měřitelná funkce právě tehdy, když $f^{-1}(\langle -\infty, a \rangle) \in \mathcal{A}, \forall a \in \mathbb{R}$.

Důsledek

Nechť $f, g : (X, \mathcal{A}) \rightarrow \mathbb{R}^*$ jsou měřitelné funkce. Pak

1. množiny $\{x \in X \mid f(x) < g(x)\}, \{f \leq g\}, \{f = g\}$ jsou měřitelné.
2. funkce $\max(f, g), \min(f, g)$ jsou měřitelné funkce.

Věta 1.4 (O měřitelných funkcích podruhé)

Jsou-li funkce $(f_n)_{n=1}^\infty$ množiny (X, \mathcal{A}) do \mathbb{R}^ měřitelné funkce, pak funkce $\sup_{n \in \mathbb{N}} f_n, \inf_{n \in \mathbb{N}} f_n, \limsup_{n \in \mathbb{N}} f_n, \liminf_{n \in \mathbb{N}} f_n$ jsou měřitelné.*

Definice 1.2 (Jednoduchá funkce)

Funkce $S : X \rightarrow [0, +\infty)$ se nazývá jednoduchá, jestliže množina $S(X)$ je konečná.

Platí, že $s(x) = \sum_{\alpha \in S(X)} \alpha \cdot \chi_{S=\alpha}$. Součet na pravé straně této rovnosti nazveme kanonickým vyjádřením jednoduché funkce.

2 Abstraktní Lebesgueův integrál

Věta 2.1 (O nezáporné měřitelné funkci)

Nechť $f : (X, \mathcal{A}) \rightarrow \langle 0, +\infty \rangle$ je měřitelná funkce. Pak existuje posloupnost jednoduchých (nezáporných) měřitelných funkcí $\{s_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ tak, že $s_n \nearrow f$ (konverguje nahoru).

Jestliže navíc f je omezená, pak $s_n \Rightarrow f$.

Definice 2.1

Nechť (X, \mathcal{A}, μ) je prostor s mírou.

1. Je-li $s : (X, \mathcal{A}) \rightarrow [0, +\infty)$ jednoduchá měřitelná funkce, zapíšeme ji v kanonickém tvaru $s = \sum_{j=1}^k \alpha_j \chi_{E_j}$ a definujeme

$$\int_X s d\mu = \int_X s(x) d\mu(x) := \sum_{j=1}^k \alpha_j \mu(E_j).$$

2. Je-li $f : (X, \mathcal{A}) \rightarrow [0, +\infty]$ měřitelná funkce, pak definujeme

$$\int_X f d\mu = \sup \left\{ \int_X s d\mu \mid 0 \leq s \leq f \wedge s \text{ je jednoduchá} \right\}.$$

3. Je-li $f : (X, \mathcal{A}) \rightarrow \mathbb{R}^*$, pak definujeme

$$\int_X f d\mu = \int_X f^+ d\mu - \int_X f^- d\mu, \text{ má li pravá strana smysl.}$$

Poznámka

Je-li (X, \mathcal{A}, μ) prostor s mírou a f, g jsou nezáporné měřitelné funkce na X splňující $0 \leq f < g$ na X , pak $0 \leq \int_X f d\mu \leq \int_X g d\mu$.

Je-li (X, \mathcal{A}, μ) prostor s mírou a $E \in \mathcal{A}$, pak $\mathcal{A}_E := \{A \cap E, A \in \mathcal{A}\}$ je σ -algebra na E a (E, \mathcal{A}_E, μ) je prostor s mírou ($\implies \int_E f d\mu$ je definován).

Je-li f měřitelná funkce na X a $E \in \mathcal{A}$, pak $\int_X (f \chi_E) d\mu = \int_E f d\mu$.

Věta 2.2 (Leviho)

Je-li (X, \mathcal{A}, μ) prostor s mírou a $f_n, n \in \mathbb{N}$, jsou nezáporné měřitelné funkce na X splňující $f_n \nearrow f$, pak $\int_X f_n d\mu \nearrow \int_X f d\mu$.

┌ Důkaz

└ Později. □

Věta 2.3 (Fatouovo lemma)

Je-li (X, \mathcal{A}, μ) prostor s mírou a $f_n, n \in \mathbb{N}$, jsou nezáporné měřitelné funkce, pak

$$\int_X (\liminf_{n \rightarrow \infty} f_n) d\mu \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_X f_n d\mu.$$

┌ Důkaz

└ Později. □

Definice 2.2 (Skoro všude)

Buď (X, \mathcal{A}, μ) prostor s mírou, $E \in \mathcal{A}$, $x \in X$. Nechť $V(x)$ je nějaká vlastnost, kterou bod x může, ale nemusí mít. Řekneme, že $V(x)$ platí μ -skoro všude na E , jestliže

$$\exists N \in \mathcal{A}, N \subset E, \mu(N) = 0 : V(x) \text{ platí } \forall x \in E \setminus N.$$

Je-li $E = X$, pak místo μ -skoro všude na E , píšeme pouze μ -skoro všude. Nehrozí li nedorozumění, o jakou míru se jedná, pak místo μ -skoro všude píšeme skoro všude.

Lemma 2.4

Buď (X, \mathcal{A}, μ) prostor s mírou a f, g měřitelné funkce na X takové, že $f = g$ skoro všude, pak $\int_X f d\mu = \int_X g d\mu$, jakmile má jedna strana rovnosti smysl.

Definice 2.3 (Měřitelná funkce (skoro všude))

Buď (X, \mathcal{A}, μ) prostor s mírou, $D \in \mathcal{A}$, $\mu(D^c) = 0$ a $f : D \rightarrow \mathbb{R}^*$. Řekneme, že f je měřitelná, jestliže \forall otevřenou množinu $G \subset \mathbb{R}$ platí $f^{-1}(G) \cap D \in \mathcal{A}$.

Pro měřitelnou funkci f pak definujeme $\int_X f d\mu := \int_X \tilde{f} d\mu$, kde $\tilde{f} = \begin{cases} f & \text{na } D, \\ 0 & \text{na } D^c. \end{cases}$

Definice 2.4 (Prostory \mathcal{L})

Označíme $\mathcal{L}^*(\mu) := \{f : X \rightarrow \mathbb{R}^* | f \text{ je měřitelná na } X \wedge \exists \int_X f d\mu\}$.

Dále $\mathcal{L}^1(\mu) := \{f \in \mathcal{L}^*(\mu) | \int_X |f| d\mu \in \mathbb{R}\}$.

Věta 2.5 (Linearita integrálů)

Buď (X, \mathcal{A}, μ) prostor s mírou, $f, g \in \mathcal{L}^*(\mu)$ a $\lambda \in \mathbb{R}$. Pak

$$\int_X (\lambda f) d\mu = \lambda \int_X f d\mu,$$
$$\int_X (f + g) d\mu = \int_X f d\mu + \int_X g d\mu, \text{ pokud má pravá strana smysl.}$$

Důkaz

Později. □

Poznámka

Má-li pravá strana druhého bodu smysl, pak nemůže nastat případ, kdy by jedna funkcí f, g je rovna $+\infty$ a druhá $-\infty$ na množině kladné míry. Odtud plyne, že součet $f + g$ je definován skoro všude.

Důsledek

Buď (X, \mathcal{A}, μ) prostor s mírou a $f_n, n \in \mathbb{N}$, nezáporné měřitelné funkce. Pak

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

Důkaz

Z minulé věty pro libovolné $k \in \mathbb{N}$ platí $\int_X \left(\sum_{n=1}^k f_n \right) d\mu = \sum_{n=1}^k \int_X f_n d\mu$. Použitím limitního přechodu pro $k \rightarrow \infty$ a Leviho věty dostaneme příslušnou rovnost. □

Věta 2.6 (Zobecněná Leviho)

Buď (X, \mathcal{A}, μ) prostor s mírou a $f_n, n \in \mathbb{N}$, měřitelné funkce na X splňující $f_n \nearrow f$ a $\int_X f_1 > -\infty$. Pak

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_X f_n d\mu = \int_X f d\mu.$$

Důkaz

$g_n = f_n - f_1 \geq 0$. Z Leviho věty pak snadno plyne tato. □

Důsledek

Buď (X, \mathcal{A}, μ) prostor s mírou a $f_n, n \in \mathbb{N}$, měřitelné funkce splňující $f_n \searrow f$ a $\int_X f_1 < +\infty$. Pak též můžeme prohodit limitu a integrál.

Důkaz

Aplikace předchozí věty na $-f_n$.

□

Věta 2.7 (Lebesgue)

Je-li (X, \mathcal{A}, μ) prostor s mírou a $f_n, n \in \mathbb{N}$, jsou měřitelné funkce takové, že $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n = f$ na X , a existuje $g \in \mathcal{L}^1(\mu) : |f_n| \leq g$ skoro všude $\forall n \in \mathbb{N}$. Pak

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_X f_n d\mu = \int_X f d\mu.$$

Důkaz

Později.

□

Důsledek

Nechť (X, \mathcal{A}, μ) je prostor s mírou a $f_n, n \in \mathbb{N}$, jsou měřitelné funkce na X takové, že $\sum_{n=1}^{\infty} f_n$ konverguje skoro všude. Jestliže existuje $g \in \mathcal{L}^1(\mu)$ tak, že $|\sum_{n=1}^k f_n| \leq g$ skoro všude $\forall k \in \mathbb{N}$, pak $\sum_{n=1}^{\infty} f_n \in \mathcal{L}^1(\mu)$ a platí:

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

Důkaz

Aplikace předchozí věty na posloupnost částečných součtů řady $\sum_{n=1}^{\infty} f_n$.

□

Věta 2.8 (Další vlastnosti měřitelných funkcí a integrálu)

Buď (X, \mathcal{A}, μ) prostor s mírou.

- Je-li f nezáporná měřitelná funkce na X a $\int_X f d\mu = 0$, pak $f = 0$ skoro všude.
- Je-li $f \in \mathcal{L}^1(\mu)$ a $\int_E f d\mu = 0 \forall E \in \mathcal{A}$, pak $f = 0$ skoro všude.
- Je-li f měřitelná, pak $\int_X f d\mu \in \mathbb{R} \Leftrightarrow \int_X |f| d\mu$.
- Je-li $f \in \mathcal{L}^1(\mu)$, pak $|\int_X f d\mu| \leq \int_X |f| d\mu$.
- Je-li $f \in \mathcal{L}^1(\mu)$, pak f je konečná skoro všude.

Důkaz

Později.

□

2.1 Lebesgueův integrál v \mathbb{R}

Poznámka (Značení)

Restrikci míry λ^1 na interval $I \subset \mathbb{R}$ opět značíme λ^1 .

Je-li $I = (a, b) \subset \mathbb{R}$, $a < b$, pak

$$\int_a^b f d\lambda^1 := \int_{(a,b)} f d\lambda^1.$$

Věta 2.9 (Vztah Riemannova a Lebesgueova integrálu)

Je-li $-\infty < a < b < +\infty$ a $f : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ taková, že $(R) \int_a^b f$ existuje, pak $\int_a^b f d\mu^1 \in \mathbb{R}$ a platí

$$\int_a^b f d\lambda^1 = (R) \int_a^b f.$$

Věta 2.10 (Vztah Newtonova a Lebesgueova integrálu)

Nechť $-\infty \leq a < b \leq +\infty$ a $f : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ je spojitá a nezáporná. Pak následující tvrzení jsou ekvivalentní:

- $(N) \int_a^b$ existuje.
- $\int_a^b f d\lambda^1 \in \mathbb{R}$.

Zároveň pokud je jedna (tj. obě) z těchto podmínek splněna, potom

$$\int_a^b f d\lambda^1 = (N) \int_a^b f.$$

TODO!!!

Definice 2.5

Systém $\mathcal{D} \subset \mathcal{P}(X)$ nazveme d-systém (nebo Dynkinův systém) na X , jestliže

- $\emptyset \in \mathcal{D}$,
- $D \in \mathcal{D} \implies D^c \in \mathcal{D}$,
- $D_n \in \mathcal{D} \forall n \in \mathbb{N}, D_n \cap D_m \neq \emptyset \implies \bigcup_n D_n \in \mathcal{D}$.

Poznámka

Každá σ -algebra je d-systém.

D-systém je uzavřený na konečné sjednocení disjunktních množin (jelikož $\emptyset \in \mathcal{D}$).

Je-li $A, B \in \mathcal{D}$, $A \subset B$, pak $B \setminus A \in \mathcal{D}$, neboť $B \setminus A = X \setminus ((X \setminus B) \cup A)$.

Jsou-li μ a ν dvě míry na (X, \mathcal{A}) , pak $\mathcal{D} := \{A \in \mathcal{A} | \mu(A) = \nu(A)\}$ je d-systém.

Věta 2.11 (O průniku d-systémů)

Nechť \mathcal{D}_α , $\alpha \in I$, jsou d-systémy na X (I je libovolná množina indexů). Pak $\bigcap_{\alpha \in I} \mathcal{D}_\alpha$ je d-systém.

┌

Důkaz

└ Přenechán čtenáři. □

Důsledek

Je-li $\mathcal{S} \subset \mathcal{P}(X)$, pak existuje nejmenší d-systém $d\mathcal{S}$ obsahující systém \mathcal{S} .

Poznámka

Je-li $\mathcal{S} \subset \mathcal{P}(X)$, pak $d\mathcal{S} \subset \sigma\mathcal{S}$.

Definice 2.6

Systém $\mathcal{S} \subset \mathcal{P}(X)$ nazveme π -systém, jestliže systém \mathcal{S} je uzavřen na konečné průniky množin z \mathcal{S} .

Věta 2.12 (O rovnosti $d\mathcal{S} = \sigma\mathcal{S}$)

Je-li $\mathcal{S} \subset \mathcal{P}(X)$ zároveň π -systémem, pak $d\mathcal{S} = \sigma\mathcal{S}$.

┌

Důkaz

Využijeme následující 2 tvrzení. $d\mathcal{S}$ je d-systém, tedy z druhého tvrzení $d\mathcal{S}$ je π -systém. Z prvního tvrzení pak $d\mathcal{S}$ je σ algebra, tedy $\sigma\mathcal{S} \subset d\mathcal{S}$. Opačná implikace plyne z poznámky výše, $d\mathcal{S} \subset \sigma\mathcal{S}$, tedy $d\mathcal{S} = \sigma\mathcal{S}$. □

└

Tvrzení 2.13

Je-li d-systém \mathcal{D} na X zároveň π -systémem, pak \mathcal{D} je σ -algebra na X .

┌

Důkaz

└ Ověříme body σ -algebry. □

Tvrzení 2.14

Je-li $\mathcal{S} \subset \mathcal{P}(X)$ π -systém, pak $d\mathcal{S}$ je π -systém.

┌

Důkaz

Ověříme, že $\mathcal{D} := \{D \in d\mathcal{S} \mid D \cap S \in d\mathcal{S} \forall S \in \mathcal{S}\}$ je d -systém. Zřejmě $\mathcal{D} = d\mathcal{D}$. Nyní buď $D \in d\mathcal{S}$ pevné a definujeme $\mathcal{D}_D := \{E \in \mathcal{P}(X) \mid E \cap D \in d\mathcal{S}\}$. O tom dokážeme, že je to d -systém. Následně dokážeme $\mathcal{S} \subset \mathcal{D}_D$, tedy $D = \mathcal{D}_D$. Vítězství! \square

└

TODO?

Věta 2.15 (O jednoznačnosti míry)

Nechť $\mathcal{S} \subset \mathcal{P}(X)$ je π -systém a μ, γ jsou dvě míry na $\sigma\mathcal{S}$ splňující $\mu(S) = \gamma(S)$, $\forall S \in \mathcal{S}$. Jestliže existují množiny $X_n \in \mathcal{S}$, $X_n \nearrow X$, $\mu(X_n) < +\infty$, $\forall n \in \mathbb{N}$, pak $\mu = \gamma$ na $\sigma\mathcal{S}$.

┌

Důkaz

Nejprve předpokládejme, že $\mu(X) < +\infty$. Pak definujeme systém $\mathcal{D} := \{A \in \sigma\mathcal{S} \mid \mu(A) = \gamma(A)\}$. Platí $\mathcal{S} \subset \mathcal{D}$, tedy $d\mathcal{S} \subset d\mathcal{D} = \mathcal{D} \subset \sigma\mathcal{S}$, tedy $\mathcal{D} = \sigma\mathcal{S}$.

Je-li $\mu(X) = +\infty$, pak definujeme $\mathcal{D}_n := \{A \in \sigma\mathcal{S} \mid \mu(A \cap X_n) = \gamma(A \cap X_n)\}$, $n \in \mathbb{N}$. Platí \mathcal{D}_n je d -systém $\forall n \in \mathbb{N}$ (ověř!). $\mathcal{S} \subset \mathcal{D}_n$, $\forall n \in \mathbb{N}$, neboť $S \in \mathcal{S} : \mu(S \cap X_n) = \gamma(S \cap X_n)$. $d\mathcal{S} \subset d\mathcal{D}_n = \mathcal{D}_n \subset \sigma\mathcal{S}$, tedy $\mathcal{D}_n = \sigma\mathcal{S}$, $\forall n \in \mathbb{N}$.

Nechť $A \in \sigma\mathcal{S}$. Pak $\mu(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(A \cap X_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \gamma(A \cap X_n) = \gamma(A)$. Tedy $\mu = \gamma$ na $\sigma\mathcal{S}$. \square

└

3 Součin měr a Fubiniova věta

Poznámka (Předpoklady pro další 2 přednášky)

Nechť (X, \mathcal{A}, μ) , resp. (Y, \mathcal{B}, γ) , je prostor se σ konečnou mírou μ , resp. γ .

Definice 3.1 (Měřitelný obdélník, \mathcal{O})

Množinu $A \times B \subset X \times Y$, kde $A \in \mathcal{A}$, $B \in \mathcal{B}$, nazveme měřitelným obdélníkem.

Symbolem \mathcal{O} označíme systém všech měřitelných obdélníků.

Definice 3.2 (Součinnová σ -algebra)

Definujeme σ -algebru $\mathcal{A} \otimes \mathcal{B}$ předpisem $\mathcal{A} \otimes \mathcal{B} := \sigma\mathcal{O}$.

$\forall E \in \mathcal{A} \otimes \mathcal{B} \forall x \in X \forall y \in Y$ definujeme řezy E_x, E^y množiny E takto:

$$E_x := \{y \in Y \mid [x, y] \in E\}, \quad E^y := \{x \in X \mid [x, y] \in E\}.$$

Věta 3.1 (O součinnové σ -algebře $\mathcal{A} \otimes \mathcal{B}$)

Je-li $E \in \mathcal{A} \otimes \mathcal{B}$, tak

1. $\forall x \in X : E_x \in \mathcal{B}$,
2. $\forall y \in Y : E^y \in \mathcal{A}$,
3. funkce $x \mapsto \gamma(E_x)$ je měřitelná na (X, \mathcal{A}) ,
4. funkce $y \mapsto \mu(E^y)$ je měřitelná na (Y, \mathcal{B}) .

Je-li funkce $f : (X \times Y, \mathcal{A} \otimes \mathcal{B}) \rightarrow \mathbb{R}^$ měřitelná, pak*

1. $\forall x \in X$ je funkce $f_x : y \mapsto f(x, y)$ je měřitelná na (Y, \mathcal{B}) ,
2. $\forall y \in Y$ je funkce $f_y : x \mapsto f(x, y)$ je měřitelná na (X, \mathcal{A}) .

┌

Důkaz (Pouze lichá tvrzení, sudá jsou analogická)

Definujeme $\mathcal{E} = \{E \in \mathcal{A} \otimes \mathcal{B} \mid E_x \in \mathcal{B}\}$. Ověříme, že \mathcal{E} je σ -algebra.

└

TODO!!!

□

Věta 3.2 (Existence a jednoznačnost součinnové míry)

Existuje právě jedna míra $\mu \otimes \nu$ (tzv. součinnová míra) na $\mathcal{A} \otimes \mathcal{B}$ splňující $(\mu \otimes \nu)(A \times B) = \mu(A) \cdot \nu(B)$, $\forall A \in \mathcal{A}, \forall B \in \mathcal{B}$.

Pro tuto míru platí

$$E \in \mathcal{A} \otimes \mathcal{B} \implies (\mu \otimes \nu)(E) = \int_X \nu(E_x) d\mu(x) \quad \left(= \int_Y \mu(E^y) d\nu(y) \right).$$

┌ *Důkaz*

1. Existence: Je-li $E \in \mathcal{A} \otimes \mathcal{B}$, pak definujeme $(\mu \otimes \nu)(E) = \int_X \nu(E_x) d\mu(x)$. O té dokážeme, že je mírou a že splňuje předpis v definici.

2. Jednoznačnost: Nechť τ je míra na $\mathcal{A} \otimes \mathcal{B}$, která splňuje $\tau(A \times B) = \mu(A)\nu(B)$, $\forall A \in \mathcal{A}, \forall B \in \mathcal{B}$, tedy $\tau = \mu \otimes \nu$ na \mathcal{O} to je π -systém. Prostory (X, \mathcal{A}, μ) , (Y, \mathcal{B}, ν) jsou prostory s σ -konečnými mírami. Tj.

$$\exists X_n \in \mathcal{A} \forall n \in \mathbb{N}, X_n \nearrow X, \mu(X_n) < +\infty \forall n \in \mathbb{N} \wedge$$

$$\wedge \exists Y_n \in \mathcal{B} \forall n \in \mathbb{N}, Y_n \nearrow Y, \nu(Y_n) < +\infty \forall n \in \mathbb{N} \Leftrightarrow$$

TODO.

└

□

Poznámka

Jsou-li (X, \mathcal{A}, μ) a (Y, \mathcal{B}, ν) prostory s úplnými σ -konečnými mírami, pak $\mu \otimes \nu$ nemusí být úplná.

Věta 3.3 (Fubiniova)

Pro $\forall f \in \mathcal{L}^(\mu \otimes \nu)$ platí*

1. $x \mapsto \int_Y f(x, y) d\nu(y)$ je měřitelná na X ,
2. $y \mapsto \int_X f(x, y) d\mu(x)$ je měřitelná na Y ,
3. $\int_{X \times Y} f d(\mu \otimes \nu) = \int_X \left(\int_Y f(x, y) d\nu(y) \right) d\mu(x) = \int_Y \left(\int_X f(x, y) d\mu(x) \right) d\nu(y)$.

┌ *Důkaz*

1) $f = \chi_E$, $E \in \mathcal{A} \otimes \mathcal{B}$: $\nu(E_x) = \int_Y$ TODO!!! (Dokáže se nejprve pro charakteristickou funkci, pak pro jednoduché nezáporné, nakonec pro všechny.) □

Poznámka (Značení)

Místo $(\mathcal{A} \otimes \mathcal{B})_0$ značíme $\mathcal{A} \overset{0}{\otimes} \mathcal{B}$ (budu značit $\mathcal{A} \otimes_0 \mathcal{B}$). A místo $(\mu \otimes \nu)_0$ píšeme ... (já píšu $\mathcal{A} \otimes_0 \nu$).

Věta 3.4 (Fubiniova věta pro zúplnění součinné míry)

Nechť (X, \mathcal{A}, μ) , (Y, \mathcal{B}, ν) jsou prostory s úplnými σ -konečnými mírami. Je-li $f \in \mathcal{L}^(\mu \otimes_0 \nu)$, pak*

- funkce $x \mapsto f(x, y)$ je měřitelná na X pro μ -skoro všechna $y \in Y$,
- funkce $y \mapsto f(x, y)$ je měřitelná na Y pro μ -skoro všechna $x \in X$,

- funkce $x \mapsto \int_Y f(x, y) d\nu(y)$ je měřitelná na X ,
- funkce $y \mapsto \int_X f(x, y) d\nu(x)$ je měřitelná na Y ,
- $\int_{X \times Y} f d(\mu \otimes \nu) = \int_X \left(\int_Y f(x, y) d\nu(y) \right) d\mu(x) = \int_Y \left(\int_X f(x, y) d\mu(x) \right) d\nu(y)$.

┌ Důkaz

└ Z 2 následujících tvrzení a Fubiniovy věty se věta snadno dokáže. □

Tvrzení 3.5

Bud' $(Z, \mathcal{C}, \varrho)$ prostor s mírou a $(Z, \mathcal{C}_0, \varrho_0)$ jeho zúplnění. Je-li $f : (Z, \mathcal{C}_0) \rightarrow \mathbb{R}^$ ϱ_0 měřitelná funkce, pak existuje ϱ měřitelná funkce $g : (Z, \mathcal{C}) \rightarrow \mathbb{R}^*$ tak, že $f = g$ ϱ -skoro všude na Z .*

┌ Důkaz

└ Vynechán. □

Tvrzení 3.6

Nechť (X, \mathcal{A}, μ) a (Y, \mathcal{B}, ν) jsou prostory s úplnými σ -konečnými mírami. Nechť $h : (X \times Y, \mathcal{A} \otimes \mathcal{B}) \rightarrow \mathbb{R}^$ je $(\mu \otimes \nu)$ -měřitelná funkce a $h(x, y) = 0$ $\mu \otimes \nu$ -skoro všude na $X \times Y$. Pak pro μ -skoro všechna $x \in X$ je $h(x, y)$ rovno 0 pro ν -skoro všechna $y \in Y$.*

(Tzn, že pro μ -skoro všechna $x \in X$ je funkce h_x rovna 0 ν -skoro všude na Y .)

Speciálně, funkce h_x je měřitelná na X pro ν -skoro všechna $y \in Y$.

┌ Důkaz

└ Vynechán. □

Definice 3.3

$$\lambda^n = (\lambda_{\mathcal{B}}^*)_0$$

Věta 3.7 (O míře $\lambda^p \otimes \lambda^q$)

Nechť $p, q \in \mathbb{N}$. Pak

- $\mathcal{B}(\mathbb{R}^{p+q}) = \mathcal{B}(\mathbb{R}^p) \otimes \mathcal{B}(\mathbb{R}^q)$,
- $\lambda^{p+q} = \lambda^p \otimes \lambda^q$.

┌ Důkaz

└ Neuveden. □

Věta 3.8 (Fubiniova věta pro λ^{p+q})

Nechť $f \in \mathcal{L}^*(\lambda^{p+q})$, $p, q \in \mathbb{N}$. Pak

$$\int_{\mathbb{R}^{p+q}} f d\lambda^{p+q} = \int_{\mathbb{R}^p} \left(\int_{\mathbb{R}^q} f(x, y) d\lambda^q(y) \right) \lambda^p(x) = \int_{\mathbb{R}^q} \left(\int_{\mathbb{R}^p} f(x, y) d\lambda^p(x) \right) \lambda^q(y).$$

Definice 3.4 (Značení)

$p, q \in \mathbb{N}$, $x \in \mathbb{R}^p$, $y \in \mathbb{R}^q$. Definujeme projekce

$$\pi_1(x, y) = x, \quad \pi_2(x, y) = y.$$

Důsledek

Nechť $p, q \in \mathbb{N}$, $A \in \mathcal{B}_0^{p+q} := \mathcal{B}(\mathbb{R}^{p+q})_0$. Je-li $f \in \mathcal{L}^*(\lambda^{p+q})$ a projekce $\pi_1 A, \pi_2 A$ jsou měřitelné, pak

$$\int_A f d\lambda^{p+q} = \int_{\pi_1 A} \left(\int_{\pi_2 A} f(x, y) d\lambda^q(y) \right) \lambda^p(x) = \int_{\pi_2 A} \left(\int_{\pi_1 A} f(x, y) d\lambda^p(x) \right) \lambda^q(y).$$

Poznámka (Značení)

Místo $d\lambda^p(x)$ píšeme dx a místo $d\lambda^q(y)$ píšeme dy .

Lemma 3.9

Lebesgueova míra λ^n je translačně invariantní (tzn. $\lambda^n(B + r) = \lambda^n(B)$).

┌

Důkaz

λ^n a $\mu(B) := \lambda^n(B + r)$, $\forall B \in \mathcal{B}_0^n$, $r \in \mathbb{R}^n$, jsou míry, které se shodují na systémech otevřených intervalů v \mathbb{R}^n . Ty spolu s prázdnou množinou tvoří π -systém, takže se míry shodují i na Borelovských množinách \implies jsou shodné. \square

└

Věta 3.10 (O obrazu míry)

Nechť (X, \mathcal{A}, μ) je prostor s mírou a (Y, \mathcal{B}) je měřitelný prostor. Buď $\varphi : (X, \mathcal{A}) \rightarrow (Y, \mathcal{B})$ měřitelné zobrazení. Pak množinová funkce $\varphi(\mu)$ daná předpisem

$$\varphi(\mu)(B) = \mu(\varphi^{-1}(B)), \forall B \in \mathcal{B}$$

je míra na Y (nazýváme ji obraz míry μ při zobrazení φ) a platí (má-li alespoň jedna strana smysl):

$$\int_Y f d\varphi(\mu) = \int_X f(\varphi(x)) d\mu(x).$$

┌
Důkaz

Ověří se, že je to míra (bod po bodu). Rovnost integrálů pak postupně ověříme na charakteristické funkce, pro jednoduché funkce, pro „jednoznaménkové“ (jako monotónní limity jednoduchých) a potom pro všechny (jako součty kladných a záporných funkcí).

Pro charakteristické funkce:

$$\int_X f(\varphi(x))d\mu(x) = \int_X \chi_B(\varphi(x))d\mu(x) = \int_X \chi_{\varphi^{-1}(B)}(x) d\mu(x) = \mu(\varphi^{-1}(B)) =$$

$$\varphi(\mu)(B) = \int_Y \chi_B d\varphi(\mu) = \int_Y f d\varphi(\mu).$$

└

□

Věta 3.11

Nechť $L : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ je invertibilní lineární zobrazení.

1. *Je-li $\nu(A) := \lambda^n(L(A))$, $\forall A \in \mathcal{B}^n := \mathcal{B}(\mathbb{R}^n)$, pak ν je míra a platí $\nu = |\det L| \lambda_{\mathcal{B}}^n$.*
2. *Je-li $\mu := |\det L| \lambda_{\mathcal{B}}^n$, pak $L\mu = \lambda_{\mathcal{B}}^n$ a $\forall f \in \mathcal{L}^*(\lambda_{\mathcal{B}}^n)$ platí*

$$\int_{\mathbb{R}^n} f d\lambda^n = \int_{\mathbb{R}^n} (f \circ L) |\det L| d\lambda_{\mathcal{B}}^n.$$

┌
Důkaz

1. L je lineární zobrazení z \mathbb{R}^n do \mathbb{R}^n , a tedy L je spojitý. L je invertibilní $\implies \exists$ inverzní zobrazení L^{-1} , které je opět lineární a spojitý. Tedy L je měřitelný.

$$(L^{-1}\lambda^n)(A) = \lambda^n(L(A)) = \nu(A), \forall A \in \mathcal{B}^n$$

$\implies \nu$ je míra dle předchozí věty.

Z lineární algebry je známo, že L lze vyjádřit jako kompozici konečně mnoha „elementárních“ lineárních zobrazení jednoho z následujících typů: $L_1(x_1, \dots, x_n) = (\alpha x_1, x_2, \dots, x_n)$, $\forall (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$, kde $\alpha \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$, $L_2(x_1, \dots, x_n) = (x_1, \dots, x_j, \dots, x_i, \dots, x_n)$, $\forall (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$, $j > i \in \mathbb{N}$, $L_3(x_1, \dots, x_n) = (x_1 + x_2, x_2, \dots, x_n)$, $\forall (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$, $i, j \in \mathbb{N}$.

Protože determinant součinu matic se rovná součinu determinantů, stačí tvrzení ověřit pro „elementární“ zobrazení. Ověříme na intervalech, L_1 ho jen natáhne o α , tedy na determinant násobek, L_2 „otočí“ interval, ale λ^n se otočením nezmění, L_3 posune a zdeformuje interval, ale tím se λ^n nezmění (dokážeme přes Fubiniovu větu). Všechny 3 zobrazení stejně operují na prázdné množině, takže i na π systému $I \cup \{\emptyset\}$, tedy míry se rovnají všude.

2.

$$(L(\mu))(A) \stackrel{1.}{=} \mu(L^{-1}(A)) = |\det L| \lambda_B^n(L^{-1}(A)) = |\det L| \cdot |\det L^{-1}| \lambda_B^n(A) = \lambda_B^n(A) \forall A \in \mathcal{B}^n,$$

tedy $L(\mu) = \lambda_B^n$. Z předchozí věty pak plyne rovnost integrálů. □

Lemma 3.12

Bud' $T : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ zobrazení splňující Li. podmínku (tzn. $\exists C \in (0, +\infty) : \|T(x) - T(y)\| \leq C\|x - y\|, \forall x, y \in \mathbb{R}^n$). Je-li A λ^n -měřitelná, pak také $T(A)$ je λ^n -měřitelná množina.

┌
Důkaz

Bez důkazu (není čas a důkaz je jednoduchý). □

Věta 3.13

Je-li L invertibilní zobrazení \mathbb{R}^n do \mathbb{R}^n , pak

$$\int_{\mathbb{R}^n} f d\lambda^n = \int_{\mathbb{R}^n} (f \circ L) |\det L| d\lambda^n,$$

má-li alespoň jedna strana smysl.

Tvrzení 3.14 (Opakování)

Je-li $G \subset \mathbb{R}^n$ otevřená množina a $T : G \rightarrow \mathbb{R}^n$ je zobrazení třídy C^1 na G , pak $Tx - Tx_0$,

kde $x_0 \in G$, lze lokálně aproximovat lineárním zobrazením, jehož matice je $(\frac{\partial T_i}{\partial x_j}(x_0))_{i,j=1}^n$ a jehož determinant je $\text{Jac}(T)(x_0)$.

Lemma 3.15

$$\lambda^n(\mathbb{R}^{n-1}) = 0.$$

Věta 3.16 (O substituci)

Bud' $G \subset \mathbb{R}^n$ otevřená množina a $\varphi : G \rightarrow \mathbb{R}^n$ difeomorfismus. Je-li $f : \varphi(G) \rightarrow \mathbb{R}$ λ^n -měřitelná funkce, pak

$$\int_G f(\varphi(x)) |\text{Jac } \varphi(x)| dx = \int_{\varphi(G)} f(y) dy,$$

má-li alespoň jedna strana smysl.

┌ Důkaz

└ Bez důkazu.

□