Конспект Шорохова Сергея

Если нашли опечатку/ошибку - пишите @le9endwp

Содержание

1 Глава 9. Теория меры

1.1 §1. Системы множеств

Definition 1.1. Объемлющее множество

X – объемлющее множество. Будем рассматривать $A \subset X$

Declaration 1.1. Обозначения

$A \sqcup B$ – объединение множеств A и B и множества A и B не пересекаются

$\bigsqcup\limits_{k=1}^{n} A_k$ – объединение и $A_i \cap A_j = \varnothing$

Дизъюнктные множества = непересекающиеся множества

Definition 1.2. Разбиение множества

Множества $E_\alpha,\ \alpha \in I$ – разбиение множества E, если $E = \bigsqcup\limits_{a \in I} E_\alpha$

Definition 1.3. Система подмножеств и ее свойства

$\mathcal{A}$ – система подмножеств X (т.е. $\mathcal{A} \subset 2^X$)

1. $\mathcal{A}$ имеет свойство σ_0, если $\forall A, B \in \mathcal{A} \Rightarrow A \cup B \in \mathcal{A}$
2. $\mathcal{A}$ имеет свойство δ_0, если $\forall A, B \in \mathcal{A} \Rightarrow A \cap B \in \mathcal{A}$
3. $\mathcal{A}$ имеет свойство σ, если $\forall A_1, A_2 \ldots \in \mathcal{A} \Rightarrow \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} A_n \in \mathcal{A}$
4. $\mathcal{A}$ имеет свойство δ, если $\forall A_1, A_2 \ldots \in \mathcal{A} \Rightarrow \bigcap\limits_{n=1}^{\infty} A_n \in \mathcal{A}$
5. $\mathcal{A}$ – симметричная система, если $\forall A \in \mathcal{A} \Rightarrow X \setminus A \in \mathcal{A}$

Reminder 1.1.

$X \setminus \bigcup\limits_{\alpha \in I} A_\alpha = \bigcap\limits_{\alpha \in I} X \setminus A_\alpha$

$X \setminus \bigcap\limits_{\alpha \in I} A_\alpha = \bigcup\limits_{\alpha \in I} X \setminus A_\alpha$

Proposition 1.1.

Если $\mathcal{A}$ симметричная система, то $\begin{matrix} (\sigma_0) \Leftrightarrow (\delta_0) \\ (\sigma) \Leftrightarrow (\delta) \end{matrix}$

Definition 1.4. Алгебра

$\mathcal{A}$ – алгебра, если

1. $\varnothing \in \mathcal{A}$
2. $\mathcal{A}$ – симметричная система
3. Есть свойства (σ_0) и (δ_0)

Definition 1.5. σ-алгебра

$\mathcal{A}$ – σ-алгебра, если

1. $\varnothing \in \mathcal{A}$
2. $\mathcal{A}$ – симметричная система
3. Есть свойства (σ) и (δ)

Theorem 1.1. Свойства

1. Если $\mathcal{A}$ – алгебра и $A_1 \dots A_n \in \mathcal{A}$, то $\bigcup\limits_{k=1}^{n} A_k$ и $\bigcap\limits_{k=1}^{n} A_k \in \mathcal{A}$
2. Если $\mathcal{A}$ – σ-алгебра, то $\mathcal{A}$ – алгебра
3. Если $\mathcal{A}$ – алгебра и $A, B \in \mathcal{A}$, то $\underbrace{A \setminus B}_{A \cap (X \setminus B)} \in \mathcal{A}$

Example 1.1.

1. $X = \mathbb{R}^n$
   $\mathcal{A}$ – все ограниченные множества и их дополнения. Это алгебра, но не σ-алгебра
2. 2^X – σ-алгебра
3. Индуцированная $(\sigma$-$)$алгебра
   $Y \subset X,\ \mathcal{A}$ – $(\sigma$-$)$алгебра подмножеств X
   $\mathcal{B} := \{A \cap Y : A \in \mathcal{A}\}$ – $(\sigma$-$)$алгебра подмножеств Y
4. $X \supset A, B$
   $\mathcal{A}$ – алгебра подмножеств X
   $\varnothing, X, A, B, A \cup B, A \cap B, A \setminus B, B \setminus A, X \setminus A, X \setminus B, A \triangle B, X \setminus (A \cap B), X \setminus (A \cup B),$
   $X \setminus (A \triangle B), X \setminus (A \setminus B), X \setminus (B \setminus A)$
5. A_α – $(\sigma$-$)$алгебра подмножеств X
   Тогда $\mathcal{B} = \bigcap\limits_{\alpha \in I} \mathcal{A}_\alpha$ – $(\sigma$-$)$алгебра подмножеств X
   Доказательство:
   (a) $\varnothing \in \mathcal{A}_\alpha \Rightarrow \varnothing \in \mathcal{B}$
   (b) $A \in \mathcal{B} \Rightarrow A \in \mathcal{A}_\alpha \forall \alpha \Rightarrow X \setminus A \in \mathcal{A}_\alpha \forall \alpha \Rightarrow X \setminus A \in \mathcal{B}$

Theorem 1.2.

Пусть $\mathcal{E}$ – система подмножеств X
Тогда существует наименьшая по включению $(\sigma$-$)$алгебра $\mathcal{A}$, содержащая $\mathcal{E}$

Доказательство:

Пусть $\mathcal{A}_\alpha$ – всевозможные алгебры, содержащие $\mathcal{E}$ (2^X подходит)

$\mathcal{A} := \bigcap\limits_{\alpha \in I} \mathcal{A}_\alpha$ – алгебра и $\mathcal{A} \subset \mathcal{A}_\alpha \forall \alpha$

Definition 1.6. Борелевская оболочка

$\mathcal{E}$ – система подмножеств X
Борелевская оболочка системы $\mathcal{E}$ – наименьшая по включению σ-алгебра, содержащая $\mathcal{E}$

Declaration 1.2. Обозначение

$\mathcal{B}(\mathcal{E})$

Definition 1.7. Борелевская σ-алгебра

Борелевская σ-алгебра – это $\mathcal{B}(\mathcal{E})$, где $\mathcal{E}$ – всевозможные открытые множества в $\mathbb{R}^n$

Declaration 1.3. Обозначение

$\mathcal{B}^n$

Remark 1.1.

$\mathcal{B}^n \neq 2^{\mathbb{R}^n}$

Definition 1.8. Кольцо

$\mathcal{A}$ – семейство подмножеств X
$\mathcal{A}$ – кольцо, если

1. $\varnothing \in \mathcal{A}$
2. $A, B \in \mathcal{A} \Rightarrow A \cap B \in \mathcal{A},\ A \cup B \in \mathcal{A}$
3. $A, B \in \mathcal{A} \Rightarrow A \setminus B \in \mathcal{A}$

Remark 1.2.

$\mathcal{A}$ – алгебра $\Leftrightarrow$ $\mathcal{A}$ – кольцо и $X \in \mathcal{A}$

Definition 1.9.

$\mathcal{P}$ – семейство подмножеств X
$\mathcal{P}$ – полукольцо, если

1. $\varnothing \in \mathcal{P}$
2. $\forall A, B \in \mathcal{P} \Rightarrow A \cap B \in \mathcal{P}$
3. $\forall A, B \in \mathcal{P}\ \exists Q_1 \ldots Q_m \in \mathcal{P}$, т.ч. $A \setminus B = \bigsqcup\limits_{k=1}^{m} Q_k$

Example 1.2.

1. $X = \mathbb{R};\ \mathcal{P} := \{(a, b] : a, b \in \mathbb{R}\}$ – полукольцо
2. $X = \mathbb{R};\ \mathcal{P} := \{(a, b] : a, b \in \mathbb{Q}\}$ – полукольцо

Lemma 1.1.

$$\bigcup_{k=1}^{n} A_k = \bigsqcup_{k=1}^{n} \underbrace{(A_k \setminus \bigcup_{j=1}^{k-1} A_j)}_{B_k} \text{ (для } \infty \text{ вместо } n \text{ тоже верно)}$$

Доказательство:

- $B_k \subset A_k \Rightarrow \supset$ верно
- $\subset$ возьмем $x \in \bigcup\limits_{k=1}^{n} A_k \Rightarrow$ найдется наименьший индекс m, т.ч. $x \in A_m$ и $x \notin A_{m-1} \dots A_1 \Rightarrow$ $\Rightarrow x \in B_m$
- Дизъюнктность $k < m \Rightarrow B_k \cap B_m = \varnothing$

  $B_m = A_m \setminus \bigcup\limits_{j=1}^{m-1} A_j \subset A_m \setminus A_k \subset A_m \setminus B_k$

  $B_k \subset A_k$

Theorem 1.3.

$\mathcal{P}$ – полукольцо. Тогда

1. $P, P_1 \dots P_n \in \mathcal{P} \Rightarrow \exists Q_1 \dots Q_m \in \mathcal{P}$, т.ч. $P \setminus \bigcup\limits_{k=1}^{n} P_k = \bigsqcup\limits_{j=1}^{m} Q_j$
2. $P_1, P_2 \dots \in \mathcal{P} \Rightarrow \exists Q_{ij} \in \mathcal{P}$, т.ч. $\bigcup\limits_{k=1}^{n} P_k = \bigsqcup\limits_{k=1}^{n} \bigsqcup\limits_{j=1}^{m_k} Q_{kj}$, где $Q_{kj} \subset P_k \forall\ k, j$
3. В п. 2 можно вместо n написать ∞

Доказательство:

1. Индукция. База $n = 1$ – определение полукольца

   Переход $n \to n + 1$

   $$P \setminus \bigcup_{k=1}^{n+1} P_k = \underbrace{(P \setminus \bigcup_{k=1}^{n} P_k)}_{\text{инд. предполож.}} \setminus P_{n+1} = \underbrace{(\bigsqcup_{j=1}^{m} Q_j)}_{\text{где } Q_j \in \mathcal{P}} \setminus P_{n+1} = \bigsqcup_{j=1}^{m} Q_j \setminus P_{n+1} = \bigsqcup_{j=1}^{m} \bigsqcup_{i=1}^{m_j} Q_{ji}$$

2. $\bigcup\limits_{k=1}^{n} P_k = \bigsqcup\limits_{k=1}^{n} \underbrace{(P_k \setminus \bigcup\limits_{j=1}^{k-1} P_j)}_{\text{п. } 1}$

Definition 1.10.

$\mathcal{P}$ – полукольцо подмножеств X

$\mathcal{Q}$ – полукольцо подмножеств Y

$\mathcal{P} \times \mathcal{Q} := \{A \times B : A \in \mathcal{P} \text{ и } B \in \mathcal{Q}\}$ – декартово произведение полуколец $\mathcal{P}$ и $\mathcal{Q}$

Theorem 1.4.

Декартово произведение полуколец – полукольцо

Доказательство:

1. Пустые очев
2. $C \times D$ и $A \times B \in \mathcal{P} \times \mathcal{Q} \Rightarrow (A \times B) \cap (C \times D) = \underbrace{(A \cap C)}_{\in \mathcal{P}} \times \underbrace{(B \cap D)}_{\in \mathcal{Q}}$
3. $A \times B, C \times D \in \mathcal{P} \times \mathcal{Q} \overset{?}{\Rightarrow} (A \times B) \setminus (C \times D) = \bigsqcup\limits_{k=1}^{m} \underbrace{P_k}_{\in \mathcal{P}} \times \underbrace{Q_k}_{\in \mathcal{Q}}$

   $(A \times B) \setminus (C \times D) = \underbrace{(A \setminus C)}_{\bigsqcup\limits_{j=1}^{m} P_j} \times \underbrace{B}_{\in \mathcal{Q}} \sqcup \underbrace{(A \cap C)}_{\in \mathcal{P}} \times \underbrace{(B \setminus D)}_{\bigsqcup\limits_{i=1}^{n} Q_i}$

Definition 1.11. Замкнутый и открытый параллелепипеды

$a, b \in \mathbb{R}^n$
Замкнутый параллелепипед $[a, b] := [a_1, b_1] \times \ldots \times [a_n, b_n]$
Открытый параллелепипед $(a, b) := (a_1, b_1) \times \ldots \times (a_n, b_n)$

Definition 1.12. Ячейка

$a, b \in \mathbb{R}^n$
Ячейка $(a, b] := (a_1, b_1] \times \ldots \times (a_n, b_n]$

Remark 1.3.

$(a, b) \subset (a, b] \subset [a, b]$

Proposition 1.2.

1. Непустая ячейка – объединение возрастающей (по включению) последовательности замкнутых параллелепипедов
2. Непустая ячейка – пересечение убывающей (по включению) последовательности открытых параллелепипедов

Доказательство:

1. $A_k := [a_1 - \frac{1}{k}, b_1] \times [a_2 - \frac{1}{k}, b_2] \times \ldots \times [a_n - \frac{1}{k}, b_n]$

   $A_{k+1} \supset A_k$ и $\bigcup\limits_{k=1}^{\infty} A_k = (a, b]$
2. $B_k := (a_1, b_1 + \frac{1}{k}) \times (a_2, b_2 + \frac{1}{k}) \times \ldots \times (a_n, b_n + \frac{1}{k})$

   $B_{k+1} \subset B_k$ и $\bigcap\limits_{k=1}^{\infty} B_k = (a, b]$

Declaration 1.4. Обозначения

$\mathcal{P}^n := \{(a, b] : a, b \in \mathbb{R}^n\}$
$\mathcal{P}^n_{\mathbb{Q}} := \{(a, b] : a, b \in \mathbb{Q}^n\}$

Proposition 1.3.

$\mathcal{P}^n$ и $\mathcal{P}^n_{\mathbb{Q}}$ – полукольца

Доказательство:

$\mathcal{P}^n = \underbrace{\mathcal{P}^1 \times \mathcal{P}^1 \times \ldots \times \mathcal{P}^1}_{\text{полукольца}}$

Theorem 1.5.

G – непустое открытое множество в $\mathbb{R}^m$

Тогда G представимо в виде счетного дизъюнктного объединения ячеек с рациональными координатами вершин

Доказательство:

У АИ тут рисуночки, посмотрите запись!

Для $x \in G$ построим ячейку P_x с рациональными координатами вершин, т.ч. $P_x \in G$ и $x \in P_x$

$\bigcup\limits_{x \in G} P_x = G$

Ячеек с рациональными координатами вершин счетное число. Значит если выкинуть повторы из объединения выше, то останется счетное объединение

$G = \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} P_{x_n} = \coprod\limits_{n=1}^{\infty} \coprod\limits_{j=1}^{m_n} Q_{nj}$ – ячейки с рациональными координатами вершин

Theorem 1.6. Следствие

$\mathcal{B}^m = \mathcal{B}(\mathcal{P}^m) = \mathcal{B}(\mathcal{P}^m_{\mathbb{Q}})$

Доказательство:

1. $\mathcal{B}^m \supset \mathcal{B}(\mathcal{P}^m)$. Достаточно доказать, что $\mathcal{B}^m \supset \mathcal{P}^m$
   $(a, b]$ – счетное пересечение открытых параллелепипедов (т.к. открытых множеств) $\Rightarrow$ $(a, b]$ лежит в σ-алгебре, содержащей все открытые множества
2. $\mathcal{B}(\mathcal{P}^m) \supset \mathcal{B}(\mathcal{P}^m_{\mathbb{Q}})$. Достаточно доказать, что $\mathcal{B}(\mathcal{P}^m) \supset \mathcal{P}^m_{\mathbb{Q}}$, но $\mathcal{B}(\mathcal{P}^m) \supset \mathcal{P}^m \supset \mathcal{P}^m_{\mathbb{Q}}$
3. $\mathcal{B}(\mathcal{P}^m_{\mathbb{Q}}) \supset \mathcal{B}^m$. Достаточно доказать, что $\mathcal{B}(\mathcal{P}^m_{\mathbb{Q}})$ содержит все открытые множества. Это следует из теоремы 1.5.

1.2 §2. Объем и мера

Definition 1.13. Объем

$\mathcal{P}$ – полукольцо. $\mu : \mathcal{P} \to [0, +\infty]$
μ – объем, если

1. $\mu\varnothing = 0$
2. Если $A_1, \dots A_n$ и $\bigsqcup\limits_{k=1}^{n} A_k \in \mathcal{P}$, то $\mu(\bigsqcup\limits_{k=1}^{n} A_k) = \sum\limits_{k=1}^{n} \mu A_k$

Definition 1.14. Мера

$\mathcal{P}$ – полукольцо. $\mu : \mathcal{P} \to [0, +\infty]$
μ – мера, если

1. $\mu\varnothing = 0$
2. Если $A_1, A_2 \dots$ и $\bigsqcup\limits_{k=1}^{\infty} A_k$, то $\mu(\bigsqcup\limits_{k=1}^{\infty} A_k) = \sum\limits_{k=1}^{\infty} \mu A_k$

Exercise 1.1.

Если $\mu\varnothing \neq +\infty$, то $\mu\varnothing = 0$ из свойства 2

Example 1.3. Примеры объемов

1. $X = \mathbb{R},\ \mathcal{P}^1$. Длина – объем. $\mu(a, b] = b - a$
2. $X = \mathbb{R},\ \mathcal{P}^1$. $g : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ – нестрого возрастающая функция
   $\nu_g(a, b] := g(b) - g(a)$
3. Классический объем на $\mathcal{P}^m$
   $\lambda_m(a, b] = (b_1 - a_1)(b_2 - a_2) \dots (b_m - a_m)$ – объем и даже мера (докажем позже)
4. $x_0 \in X;\ \mu A = \begin{cases} 0 & x_0 \notin A \\ 1 & x_0 \in A \end{cases}$
5. $X = \mathbb{R}^2;\ \mathcal{P}$ – ограниченные множества и их дополнения
   $\mu A = \begin{cases} 0 & A \text{ – ограничена} \\ 1 & A \text{ дополнение ограничено} \end{cases}$ – объем, но не мера

Theorem 1.7. Свойства объема

$\mathcal{P}$ – полукольцо, μ – объем на $\mathcal{P}$. Тогда

1. Монотонность
   $P, \tilde{P} \in \mathcal{P}$ и $P \subset \tilde{P} \Rightarrow \mu P \leq \mu\tilde{P}$
2. Усиленная монотонность
   $P_1, P_2 \dots P_n, \tilde{P} \in \mathcal{P}$ и $\bigsqcup\limits_{k=1}^{n} P_k \subset \tilde{P} \Rightarrow \sum\limits_{k=1}^{n} \mu P_k \leq \mu\tilde{P}$

2'. $P_1, P_2 \dots, \tilde{P} \in \mathcal{P}$ и $\bigsqcup\limits_{k=1}^{\infty} P \subset \tilde{P} \Rightarrow \sum\limits_{k=1}^{\infty} \mu P_k \leq \mu\tilde{P}$

3. Конечная полуаддитивность
   $P_1 \dots P_n, P \in \mathcal{P}$ и $P \subset \bigcup\limits_{k=1}^{n} P_k \Rightarrow \mu P \leq \sum\limits_{k=1}^{n} \mu P_k$

Доказательство:

2. $\tilde{P} \setminus \bigsqcup\limits_{k=1}^{n} P_k = \bigsqcup\limits_{j=1}^{m} Q_j$, где $Q_j \in \mathcal{P}$

   $\tilde{P} = \bigsqcup\limits_{k=1}^{n} P_k \sqcup \bigsqcup\limits_{j=1}^{m} Q_j \Rightarrow \mu\tilde{P} = \sum\limits_{k=1}^{n} \mu P_k + \underbrace{\sum\limits_{j=1}^{m} \mu Q_j}_{\geq 0} \geq \sum\limits_{k=1}^{n} \mu P_k$

2'. Предельный переход в неравенстве

3. $P_k' := P_k \cap P \in \mathcal{P} \Rightarrow P = \bigcup\limits_{k=1}^{n} P_k' \underbrace{=}_{\text{th.}} \bigsqcup\limits_{k=1}^{n} \bigsqcup\limits_{j=1}^{m_k} Q_{kj}$ (они из $\mathcal{P}$) $\Rightarrow \mu P = \sum\limits_{k=1}^{n} \sum\limits_{j=1}^{m_k} \mu Q_{kj}$

   $P_k \supset P_k' \supset \bigsqcup\limits_{j=1}^{m_k} Q_{kj} \Rightarrow \mu P_k \geq \sum\limits_{j=1}^{m_k} \mu Q_{kj}$

Remark 1.4.

1. Если μ – объем на алгебре $\mathcal{A}$, $A \subset B;\ A, B \in \mathcal{A}$ и $\mu A < +\infty$, то $\mu(B \setminus A) = \mu B - \mu A$
   Доказательство: Т.к. $B = A \sqcup (B \setminus A)$
2. Объем на полукольце можно продолжить на кольцо, состоящего из всевозможных объединений элементов полукольца

Theorem 1.8.

$\mathcal{P}$ и $\mathcal{Q}$ – полукольца подмножеств X и Y. μ и ν – объемы на $\mathcal{P}$ и $\mathcal{Q}$
$\lambda\underbrace{(P \times Q)}_{P \in \mathcal{P};\ Q \in \mathcal{Q}} := \mu P \cdot \nu Q$ (считаем, что $0 \cdot +\infty = +\infty \cdot 0 = 0$)
Тогда λ – объем на $\mathcal{P} \times \mathcal{Q}$

Theorem 1.9. Следствие

Классический объем λ_m – объем

Доказательство:

Случай 1. $P = \bigsqcup\limits_{j=1}^{m} P_j$ и $Q = \bigsqcup\limits_{k=1}^{n} Q_k$

Тогда $P \times Q = \bigsqcup\limits_{j=1}^{m} \bigsqcup\limits_{k=1}^{n} P_j \times Q_k$

$\lambda(P \times Q) = \mu P \cdot \nu Q = \sum\limits_{j=1}^{m} \mu P_j \cdot \sum\limits_{k=1}^{n} \nu Q_k = \sum\limits_{j=1}^{m} \sum\limits_{k=1}^{n} \mu P_j \cdot \nu Q_k = \sum\limits_{j=1}^{m} \sum\limits_{k=1}^{n} \lambda(P_j \times Q_k)$

Случай 2. $P \times Q = \bigsqcup\limits_{k=1}^{n} P_k \times Q_k \overset{?}{\Rightarrow} \lambda(P \times Q) = \sum\limits_{k=1}^{n} \lambda(P_k \times Q_k)$

Разбиваем P на кусочки $P = \bigsqcup\limits_{j=1}^{m} P_j'$ и каждая P_k – дизъюнктное объединение каких-то P_j'

Example 1.4. Примеры мер

1. λ_m – мера (потом докажем)
2. $g : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ – нестрого возрастающая и непрерывная справа во всех точках
   $\nu_g(a, b] := g(b) - g(a)$ – мера
3. $x_0 \in X;\ \mu A = \begin{cases} 1 & x_0 \in A \\ 0 & x_0 \notin A \end{cases}$ – мера на 2^X
4. Считающая мера = количество элементов в множестве
5. $X;\ \begin{matrix} t_1, t_2 \ldots \in X \\ w_1, w_2 \ldots \geq 0 \end{matrix};\ \mu A := \sum\limits_{k: t_k \in A} w_k$ – мера на 2^X

   Счетная аддитивность: $A = \bigsqcup\limits_{k=1}^{\infty} A_k \overset{?}{\Rightarrow} \mu A = \sum\limits_{k=1}^{\infty} \mu A_k$

   В множестве A_k гирьки $w_{k_1}, w_{k_2} \ldots$

   $\mu A_k = \sum\limits_{j=1}^{\infty} w_{k_j}$ и $\mu A = \sum w_{k_j}$

   Надо понять, что $\sum\limits_{k=1}^{\infty} \sum\limits_{j=1}^{\infty} w_{k_j} = \sum w_{k_j}$

   $\leq$: $\underbrace{\sum\limits_{k=1}^{K} \sum\limits_{j=1}^{\infty} w_{k_j}}_{\sum\limits_{j=1}^{\infty} \sum\limits_{k=1}^{K} w_{k_j}} \leq R \Rightarrow L \leq R$

   $\geq$: Берем частичную сумму S для R. Надо доказать, что $S \leq L$
   $\begin{matrix} K = \max k \text{ в этой частичной сумме} \\ J = \max j \text{ в этой частичной сумме} \end{matrix} \Rightarrow S \leq \sum\limits_{k=1}^{K} \sum\limits_{j=1}^{J} w_{k_j} \leq L$

Theorem 1.10.

$\mu : \mathcal{P} \to [0, +\infty]$ – объем на полукольце $\mathcal{P}$. Тогда
μ – мера $\Leftrightarrow$ (счетная полуаддитивность)
$(P, P_k \in \mathcal{P})\ \forall P \subset \bigcup\limits_{k=1}^{\infty} P_k \Rightarrow \mu P \leq \sum\limits_{k=1}^{\infty} \mu P_k$

Доказательство:

$\Leftarrow$: $P = \bigsqcup\limits_{k=1}^{\infty} P_k \xRightarrow[\text{сч. полуадд.}]{} \mu P \leq \sum\limits_{k=1}^{\infty} \mu P_k$

$P = \bigsqcup\limits_{k=1}^{\infty} P_k \xRightarrow[\text{усил. монот.}]{} \mu P \geq \sum\limits_{k=1}^{\infty} \mu P_k$

$\Rightarrow$: $P_k' := P \cap P_k \Rightarrow P = \bigcup\limits_{k=1}^{\infty} P_k' = \bigsqcup\limits_{k=1}^{\infty} \bigsqcup\limits_{j=1}^{m_k} Q_{k_j}$, где $Q_{k_j} \subset P_k' \subset P_k \xRightarrow[\mu \text{ – мера}]{} \mu P = \sum\limits_{k=1}^{\infty} \underbrace{\sum\limits_{j=1}^{m_k} \mu Q_{k_j}}_{\leq \mu P_k}$

$\bigsqcup\limits_{j=1}^{m_k} Q_{k_j} \subset P_k \xRightarrow[\text{усил. монот.}]{} \mu P_k \geq \sum\limits_{j=1}^{m_k} \mu Q_{k_j}$

Theorem 1.11. Следствие

μ – мера на σ-алгебре. Тогда счетное объединение множеств нулевой меры – множество нулевой меры

Доказательство:

$\mu A = 0;\ A := \bigcup\limits_{k=1}^{\infty} A_k \Rightarrow \mu A \le \sum\limits_{k=1}^{\infty} \mu A_k = 0 \Rightarrow \mu A = 0$

Theorem 1.12. Непрерывность меры снизу

μ – объем на σ-алгебре $\mathcal{A}$. Тогда равносильны

1. μ – мера
2. $A_1 \subset A_2 \subset A_3 \subset \dots;\ A_k \in \mathcal{A}$. Тогда $\mu(\bigcup\limits_{k=1}^{\infty} A_k) = \lim\limits_{k\to\infty} \mu A_k$

Доказательство:

$1 \Rightarrow 2:\ A_0 \ne \varnothing$ и $B_k := A_k \setminus A_{k-1};\ A := \bigcup\limits_{k=1}^{\infty} A_k$

$$\text{Тогда } A = \bigsqcup_{k=1}^{\infty} B_k \Rightarrow \mu A = \sum_{k=1}^{\infty} \mu B_k = \lim_{n\to\infty} \underbrace{\sum_{k=1}^{n} \mu B_k}_{\mu(\bigsqcup\limits_{k=1}^{n} B_k)} = \lim_{n\to\infty} \mu A_n$$

$2 \Rightarrow 1:$ Пусть $A = \bigsqcup\limits_{k=1}^{\infty} C_k;\ A_n := \bigsqcup\limits_{k=1}^{n} C_k \Rightarrow A_1 \subset A_2 \subset \dots \Rightarrow \mu A = \lim\limits_{n\to\infty} \mu A_n = \lim\limits_{n\to\infty} \mu(\bigsqcup\limits_{k=1}^{n} C_k) =$
$= \lim\limits_{n\to\infty} \sum\limits_{k=1}^{n} \mu C_k = \sum\limits_{k=1}^{\infty} \mu C_k$

Theorem 1.13. Непрерывность меры сверху

μ – объем на σ-алгебре $\mathcal{A}$ и $\mu X < +\infty$. Следующие условия равносильны

1. μ – мера
2. Непрерывность меры сверху

   $A_1 \supset A_2 \supset A_3 \supset \dots;\ A_k \in \mathcal{A} \Rightarrow \mu(\bigcap\limits_{k=1}^{\infty} A_k) = \lim\limits_{k\to\infty} \mu A_k$
3. Непрерывность меры сверху на пустом множестве

   $A_1 \supset A_2 \supset A_3 \supset \dots;\ A_k \in \mathcal{A}$ и $\bigcap\limits_{k=1}^{\infty} A_k = 0 \Rightarrow \lim\limits_{k\to\infty} \mu A_k = 0$

Доказательство:

$1 \Rightarrow 2:\ B_k := A_1 \setminus A_k;\ B_1 \subset B_2 \subset B_3 \subset \dots$

$$\bigcup_{k=1}^{\infty} B_k = A_1 \setminus \bigcap_{k=1}^{\infty} A_k. \text{ По предыдущей теореме } \underbrace{\mu(\bigcup_{k=1}^{\infty} B_k)}_{\mu A_1 - \mu(\bigcap\limits_{k=1}^{\infty} A_k)} = \lim_{k\to\infty} \mu B_k = \mu A_1 - \lim_{k\to\infty} \mu A_k$$

$2 \Rightarrow 3:$ Очев, 3. – частный случай 2.

$3 \Rightarrow 1: \ A = \bigsqcup\limits_{k=1}^{\infty} C_k; A_n := \bigsqcup\limits_{k=n+1}^{\infty} C_k; \ \bigcap\limits_{n=1}^{\infty} A_n = \varnothing$ и $A_1 \supset A_2 \supset A_3 \supset \ldots \Rightarrow \lim \mu A_n = 0$

$$A = \bigsqcup_{k=1}^{n} C_k \sqcup A_n \Rightarrow \mu A = \underbrace{\sum_{k=1}^{n} \mu C_k}_{\to \sum\limits_{k=1}^{\infty} \mu C_k} + \underbrace{\mu A_n}_{\to 0}$$

Theorem 1.14. Следствие

μ – мера на σ-алгебре $\mathcal{A}$ и $A_1 \supset A_2 \supset A_3 \supset \ldots$ и $\mu A_m < +\infty$ для некоторого m

Тогда $\mu(\bigcap\limits_{k=1}^{\infty} A_k) = \lim \mu A_k$

Доказательство:

Пишем $A_m \setminus A_k$ вместо $A_1 \setminus A_k$

Remark 1.5.

Условие $\mu X < +\infty$ важно. $A_n := [n, +\infty)$ и $\lambda_1 A_n = +\infty$; $\bigcap\limits_{n=1}^{\infty} [n, +\infty) = \varnothing$

Exercise 1.2.

Придумать объем, не являющийся мерой, который обладает свойством из следствия

1.3 §3. Продолжение меры

Definition 1.15. Субмера

$\nu : 2^X \to [0, +\infty]$ – субмера, если

1. $\nu\varnothing = 0$
2. Монотонность: $A \subset B \Rightarrow \nu A \le \nu B$
3. Счетная полуаддитивность: $A \subset \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} A_n \Rightarrow \nu A \le \sum\limits_{n=1}^{\infty} \nu A_n$

Remark 1.6.

2. – частный случай 3.

Definition 1.16. Полная мера

μ – мера на $\mathcal{A}$. μ – полная мера, если
$A \in \mathcal{A}$, т.ч. $\mu A = 0 \Rightarrow \forall B \subset A\ B \in \mathcal{A}$ (и тогда $\mu B = 0$)

Definition 1.17.

ν – субмера. $E \subset X$
E – ν-измеримое множество, если $\forall A \subset X \Rightarrow \nu A = \nu(A \cap E) + \nu(A \setminus E)$

Remark 1.7.

1. Достаточно требовать $\ge$, т.к. $\le$ из полуаддитивности
2. $E_1, E_2 \dots E_n$ – ν-измеримые и $E = \bigsqcup\limits_{k=1}^{n} E_k \Rightarrow \nu(A \cap E) = \sum\limits_{k=1}^{n} \nu(A \cap E_k)$

   Индукция по n. $n \to n+1$

   $$\nu(A \cap \bigsqcup_{k=1}^{n+1} E_k) = \nu\,\underbrace{\left((A \cap \bigsqcup_{k=1}^{n+1} E_k) \cap E_{n+1}\right)}_{A\cap E_{n+1}} + \nu\,\underbrace{\left((A \cap \bigsqcup_{k=1}^{n+1} E_k) \setminus E_{n+1}\right)}_{A \cap \bigsqcup\limits_{k=1}^{n} E_k}$$

Theorem 1.15. Теорема Каратеодори

ν – субмера. Тогда

1. ν-измеримые множества образуют σ-алгебру
2. Сужение ν на эту σ-алгебру – полная мера

Доказательство:

$\mathcal{A}$ – семейство всех ν-измеримых множеств

1. Маленькими шагами :)

Шаг 1. Если $\nu E = 0$, то E будет ν-измеримым

$$\nu\underbrace{(A \cap E)}_{\subset E} + \nu\underbrace{(A \setminus E)}_{\subset A} \le \nu E + \nu A = 0 + \nu A = \nu A$$

Шаг 2. $\mathcal{A}$ – симметричная, т.к. если $E \in \mathcal{A}$, то $X \setminus E \in \mathcal{A}$

$A \cap (X \setminus E) = A \setminus E$; $A \setminus (X \setminus E) = A \cap E$

Шаг 3. Если E и $F \in \mathcal{A}$, то $E \cup F \in \mathcal{A}$

$$\nu A = \nu(A \cap E) + \nu(A \setminus E) = \nu(A \cap E) + \nu((A \setminus E) \cap F) + \nu \underbrace{((A \setminus E) \setminus F)}_{A \setminus (E \cup F)} \geq$$

$$\geq \nu(A \cap (E \cup F)) + \nu(A \setminus (E \cup F))$$

Шаг 4. $\mathcal{A}$ – алгебра

Шаг 5. $E = \bigsqcup\limits_{n=1}^{\infty} E_n$ и $E_n \in \mathcal{A} \overset{?}{\Rightarrow} E \in \mathcal{A}$

$$\nu A = \nu(A \cap \bigsqcup_{k=1}^{n} E_k) + \nu(A \setminus \bigsqcup_{k=1}^{n} E_k) \geq \nu(A \cap \bigsqcup_{k=1}^{n} E_k) + \nu(A \setminus E) = \underbrace{\sum_{k=1}^{n} \nu(A \cap E_k)}_{\to \sum\limits_{k=1}^{\infty}} + \nu(A \setminus E) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \nu A \geq \sum_{k=1}^{\infty} \nu(A \cap E_k) + \nu(A \setminus E) \geq \nu(\underbrace{\bigcup_{k=1}^{\infty} (A \cap E_k)}_{A \cap E}) + \nu(A \setminus E)$$

Шаг 6. $E = \bigcup\limits_{k=1}^{\infty} E_k$

Переделаем в дизъюнктное объединение

Т.е. $\mathcal{A}$ – σ-алгебра

2. $\nu |_{\mathcal{A}}$ – мера, т.к. это объем и счетная полуаддитивная

   $\nu(A \cap \bigsqcup\limits_{k=1}^{n} E_k) = \sum\limits_{k=1}^{n} \nu(A \cap E_k)$; $A = X \Rightarrow$ объем

   $\nu |_{\mathcal{A}}$ – полная мера. Если $\nu B = 0$ и $A \subset B$, то $\nu A = 0$ и тогда $A \in \mathcal{A}$ по шагу 1

Definition 1.18. Внешняя мера

μ – мера на полукольце $\mathcal{P}$. Внешняя мера, порожденная μ называется

$\mu^* A := \inf\{\sum\limits_{k=1}^{\infty} \mu A_k : A \subset \bigcup\limits_{k=1}^{\infty} A_k, A_k \in \mathcal{P}\}$

Если такого покрытия для A нет, то $\mu^* A = +\infty$

Remark 1.8.

1. Можем рассматривать только покрытия дизъюнктными множествами

   $\bigcup\limits_{k=1}^{\infty} A_k = \bigsqcup\limits_{k=1}^{\infty} \bigsqcup\limits_{j=1}^{m_k} Q_{k_j}$ и $\bigsqcup\limits_{j=1}^{m_k} Q_{k_j} \subset A_k$
2. Если μ – мера на σ-алгебре, то $\mu^* A = \inf\{\mu B : B \supset A$ и $B \in \mathcal{A}\}$

Theorem 1.16.

μ^* – субмера, совпадающая с μ на $\mathcal{P}$

Доказательство:

Шаг 1. Если $A \in \mathcal{P}$, то $\mu A = \mu^* A$

$\geq$ Берем покрытие $A, \varnothing, \varnothing, \ldots$. $\mu^* A = \inf \leq \mu A$

$\leq$ $A \subset \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} A_n \Rightarrow \mu A \leq \sum\limits_{n=1}^{\infty} \mu A_n$ (счетная полуаддитивность меры) $\Rightarrow \mu A \leq \inf = \mu^* A$

Шаг 2. μ^* – субмера

Надо проверить, если $A \subset \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} A_n \Rightarrow \mu^* A \leq \sum\limits_{n=1}^{\infty} \mu^* A_n$

Если справа есть $+\infty$, то все очев. Считаем, что $\mu^* A_n < +\infty$

Возьмем покрытие $A_n \subset \bigcup\limits_{k=1}^{\infty} C_{nk}$, т.ч. $C_{nk} \in \mathcal{P}$ и $\sum\limits_{k=1}^{\infty} \mu C_{nk} < \mu^* A_n + \frac{\varepsilon}{2^n} \Rightarrow A \subset \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} \bigcup\limits_{k=1}^{\infty} C_{nk}$

$\mu^* A \leq \sum\limits_{n=1}^{\infty} \sum\limits_{k=1}^{\infty} \mu C_{nk} < \sum\limits_{n=1}^{\infty} \mu^*(A_n + \frac{\varepsilon}{2^n}) = \varepsilon + \sum\limits_{n=1}^{\infty} \mu^* A_n$

Definition 1.19. Стандартное продолжение меры

μ_0 – мера на полукольце $\mathcal{P}$
μ_0^* – внешняя мера, построенная по μ_0 – субмера
μ – сужение субмеры μ_0^* на μ_0^*-измеримые множества
μ называется стандартным продолжением μ_0

Declaration 1.5.

Будем писать μ-измеримые, вместо μ_0^*-измеримые

Theorem 1.17.

Это действительно продолжение. Т.е. множества из $\mathcal{P}$ будут μ-измеримы

Доказательство:

Шаг 1. Если E и $A \in \mathcal{P}$, то $\mu_0^* A \geq \mu_0^*(A \cap E) + \mu_0^*(A \setminus E)$

$\mu_0^* A = \mu_0 A$ и $\mu_0^*(A \cap E) = \mu_0(A \cap E)$

$A \setminus E = \bigsqcup\limits_{k=1}^{m} Q_k$, где $Q_k \in \mathcal{P} \Rightarrow A = (A \cap E) \sqcup \bigsqcup\limits_{k=1}^{m} Q_k \Rightarrow \mu_0 A = \mu_0(A \cap E) + \underbrace{\sum\limits_{k=1}^{m} \mu_0^* Q_k}_{\geq \mu_0^*(A \setminus E)} \geq$

$\geq \mu_0^*(A \cap E) + \mu_0^*(A \setminus E)$

Шаг 2. Если $E \in \mathcal{P}$, а $A \notin \mathcal{P}$

Если $\mu_0^* A = +\infty$, то неравенство очевидно. Считаем, что $\mu_0^* A < +\infty$

Возьмем покрытие $A \subset \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} P_n$, т.ч. $\sum\limits_{k=1}^{\infty} \mu_0 P_k < \mu_0^* A + \varepsilon$ ($P_n \in \mathcal{P}$)

$\mu_0 P_k \geq \mu_0^*(P_k \cap E) + \mu_0^*(P_k \setminus E)$

$\varepsilon + \mu_0^* A > \sum\limits_{k=1}^{\infty} \mu_0 P_k \geq \sum\limits_{k=1}^{\infty} \mu_0^*(P_k \cap E) + \sum\limits_{k=1}^{\infty} \mu_0^*(P_k \setminus E) \geq \mu_0^* \underbrace{(\bigcup\limits_{k=1}^{\infty} (P_k \cap E))}_{\supset A \cap E} + \mu_0^* \underbrace{(\bigcup\limits_{k=1}^{\infty} (P_k \setminus E))}_{\supset A \setminus E} \geq$

$\geq \mu_0^*(A \cap E) + \mu_0^*(A \setminus E)$

Definition 1.20. σ-конечная мера

Мера μ – σ-конечная, если $X = \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} X_n$, т.ч. $\mu X_n < +\infty$

Remark 1.9.

1. Меру и ее стандартное продолжение будем обозначать одинаково
2. μ задана на σ-алгебре
   $\mu A = \inf\{\sum\limits_{k=1}^{\infty} \mu P_k : P_k \in \mathcal{P},\ \bigcup\limits_{k=1}^{\infty} P_k \supset A\}$
3. Применение стандартного продолжения к стандартному продолжению меры не дает ничего нового
4. Можно ли продолжить меру на более широкий класс множеств?
   Обычно да, но нет однозначности продолжения
5. Можно ли по-другому продолжить меру на σ-алгебру μ-измеримых множеств?
   Если μ_0 – σ-конечная мера, то нет!
6. Обязательно ли полная мера задана на σ-алгебре μ-измеримых множеств?
   Если μ_0 – σ-конечная, то да

Exercise 1.3.

Доказать замечание 1.9.3.
Подсказка: нужно доказать, что $\mu_0^* = \mu^*$

Theorem 1.18.

$\mathcal{P}$ – полукольцо, μ – стандартное продолжение с полукольца
μ^* – внешняя мера. A – множество, т.ч. $\mu^* A < +\infty$. Тогда существует $B_{nk} \in \mathcal{P}$, т.ч. $C_n := \bigcup\limits_{k=1}^{\infty} B_{nk},\ C := \bigcap\limits_{n=1}^{\infty} C_n,\ C \supset A$ и $\mu C = \mu^* A$

Доказательство:

$\mu^* A = \inf\{\sum\limits_{k=1}^{\infty} \mu P_k : P_k \in \mathcal{P}$ и $\bigcup\limits_{k=1}^{\infty} P_k \supset A\}$

Пусть $B_{nk} \in \mathcal{P}$, т.ч. $\sum\limits_{k=1}^{\infty} \mu B_{nk} < \mu^* A + \frac{1}{n}$ и $\bigcup\limits_{k=1}^{\infty} B_{nk} \supset A$

$A \subset C_n = \bigcup\limits_{k=1}^{\infty} B_{nk} \Rightarrow \mu C_n \leq \sum\limits_{k=1}^{\infty} \mu B_{nk} < \mu^* A + \frac{1}{n}$

$A \subset C = \bigcap\limits_{n=1}^{\infty} C_n \subset C_n;\ \mu C \leq \mu C_n < \mu^* A + \frac{1}{n} \Rightarrow \mu C \leq \mu^* A$

$C \supset A \Rightarrow \mu^* A \leq \mu^* C = \mu C$

Theorem 1.19. Следствие

$\mathcal{P}$ – полукольцо, μ – стандартное продолжение с $\mathcal{P}$, A – μ-измеримое множество.
$\mu A < +\infty$. Тогда существует $B \in \mathcal{B}(\mathcal{P})$ и e – μ-измеримое, т.ч. $A = B \sqcup e$ и $\mu e = 0$

Доказательство:

По теореме существует $C \in \mathcal{B}(\mathcal{P})$, т.ч. $A \subset C$ и $\mu A = \mu C$

$e_1 := C \setminus A;\ \mu e_1 = \mu C - \mu A = 0$

По теореме найдется $e_2 \in \mathcal{B}(\mathcal{P})$, т.ч. $e_1 \subset e_2$ и $\mu e_2 = \mu e_1 = 0 \Rightarrow A \supset C \setminus e_2$

$\mu(\underbrace{C \setminus e_2}_{B}) = \mu C = \mu A$

$e := A \setminus B \Rightarrow \mu e = \mu A - \mu B = 0$

Theorem 1.20. Единственность продолжения

$\mathcal{P}$ – полукольцо, μ – стандартное продолжение с полукольца, $\mathcal{A}$ – σ-алгебра, на которой задана μ. ν – мера на $\mathcal{A}$, т.ч. $\mu P = \nu P \ \forall P \in \mathcal{P}$
Если мера μ – σ-конечна, то $\mu A = \nu A \ \forall A \in \mathcal{A}$

Reminder 1.2. σ-конечность

μ – σ-конечна, если $X = \bigsqcup\limits_{n=1}^{\infty} X_n$, т.ч. $\mu X_n < +\infty$

Доказательство:

Шаг 1. $\mu A \geq \nu A \ \forall A \in \mathcal{A}$

$\mu A = \inf\{\underbrace{\sum\limits_{k=1}^{\infty} \mu P_k}_{\geq \nu A} : A \subset \bigcup\limits_{k=1}^{\infty} P_k \text{ и } P_k \in \mathcal{P}\}$. По усиленной монотонности меры ν

$\nu A \leq \sum\limits_{k=1}^{\infty} \nu P_k = \sum\limits_{k=1}^{\infty} \mu P_k \Rightarrow \mu A \geq \nu A$

Шаг 2. Если $E \in \mathcal{A}$ и $\mu P < +\infty$, то $\mu(P \cap E) = \nu(P \cap E) \ \forall P \in \mathcal{P}$

$\mu P = \underbrace{\mu(P \cap E)}_{\geq \nu(P \cap E)} + \underbrace{\mu(P \setminus E)}_{\geq \nu(P \setminus E)} \geq \nu(P \cap E) + \nu(P \setminus E) = \nu P \Rightarrow \mu(P \cap E) = \nu(P \cap E)$

Шаг 3. $\mu A = \nu A \ \forall A \in \mathcal{A}$

μ – σ-конечная $\Rightarrow X = \bigsqcup\limits_{n=1}^{\infty} P_n$, т.ч. $P_n \in \mathcal{P}$ и $\mu P_n < +\infty$

Тогда $A = \bigsqcup\limits_{n=1}^{\infty} (A \cap P_n)$

$\mu A = \sum\limits_{n=1}^{\infty} \mu(A \cap P_n) = \sum\limits_{n=1}^{\infty} \nu(A \cap P_n) = \nu A$

1.4 §4. Мера Лебега

Theorem 1.21.

λ_m (классический объем в $\mathbb{R}^m$) – σ-конечная мера

Доказательство: (на записи рисуночки!)

Достаточно проверить счетную полуаддитивность λ_m, т.е. если $(a,b] \subset \bigcup\limits_{n=1}^{\infty}(a_n,b_n]$, то $\lambda_m(a,b] \le \sum\limits_{n=1}^{\infty}\lambda_m(a_n,b_n]$

Возьмем $a' \in (a,b]$, т.ч. $\lambda_m(a',b] > \lambda_m(a,b] - \varepsilon \Rightarrow [a',b] \subset (a,b]$

Возьмем b'_n, т.ч. $(a_n,b_n] \subset (a_n,b'_n)$ и $\lambda_m(a_n,b'_n] < \lambda_m(a_n,b_n] + \frac{\varepsilon}{2^n}$

$$\underbrace{[a',b]}_{\text{замкн. паралл. – компакт}} \subset (a,b] \subset \bigcup_{n=1}^{\infty}(a_n,b_n] \subset \bigcup_{n=1}^{\infty}\underbrace{(a_n,b'_n)}_{\text{откр. паралл. – откр. мн-ва}}$$

Выберем конечное подпокрытие $(a',b] \subset [a',b] \subset \bigcup\limits_{n=1}^{N}(a_n,b'_n) \subset \bigcup\limits_{n=1}^{N}(a_n,b'_n]$

По конечной полуаддитивности объема:

$\lambda_m(a,b] - \varepsilon < \lambda_m(a',b] \le \sum\limits_{n=1}^{N}\lambda_m(a_n,b'_n] < \sum\limits_{n=1}^{N}(\lambda_m(a_n,b_n] + \frac{\varepsilon}{2^n}) < \varepsilon + \sum\limits_{n=1}^{\infty}\lambda_m(a_n,b_n]$ и устремляем ε к 0

Definition 1.21. Мера Лебега

Мера Лебега – стандартное продолжение классического объема

Declaration 1.6. Обозначение

$\mathcal{L}^m$ – σ-алгебра, на которую продолжили
Лебеговская σ-алгебра

Remark 1.10.

1. Если $A \in \mathcal{L}^m$, то $\lambda_m A = \inf\{\sum\limits_{k=1}^{\infty}\lambda_m P_k : A \subset \bigcup\limits_{k=1}^{\infty} P_k$ и P_k – ячейки$\}$
2. Можно брать ячейки из $\mathcal{P}^m_{\mathbb{Q}}$

Theorem 1.22. Свойства меры Лебега

1. Открытые множества измеримы и меры непустого открытого > 0
2. Замкнутые множества измеримы
3. Мера одноточечного множества равна 0
4. Мера ограниченного измеримого множества конечна
5. Всякое измеримое множество – счетное объединение множеств конечной меры
   Картинка! $\mathbb{R}^m = \bigsqcup_{k=1}^{\infty} P_k$, P_k – единичные ячейки. $A = \bigsqcup_{k=1}^{\infty} (P_k \cap A)$ и $\lambda_m(P_k \cap A) \leq$ $\leq \lambda_m P_k = 1$
6. Пусть $E \subset \mathbb{R}^m : \forall \varepsilon > 0$ найдутся $A_\varepsilon, B_\varepsilon \in \mathcal{L}^m$, т.ч. $A_\varepsilon \subset E \subset B_\varepsilon$ и $\lambda_m(B_\varepsilon \setminus A_\varepsilon) < \varepsilon$. Тогда $E \in \mathcal{L}^m$

   Remark 1.11.

   Это свойство любой полной меры

7. Пусть $e \subset \mathbb{R}^m$, т.ч. $\forall \varepsilon > 0$ найдется $B_\varepsilon \in \mathcal{L}^m$, т.ч. $e \subset B_\varepsilon$ и $\lambda_m B_\varepsilon < \varepsilon$
   Тогда $E \in \mathcal{L}^m$ и $\lambda_m e = 0$
8. Счетное объединение множеств нулевой меры – множество нулевой меры
9. Счетное множество имеет нулевую меру
10. Множество нулевой меры не имеет внутренних точек
11. $\lambda_m e = 0$ и $\varepsilon > 0$. Тогда найдутся кубические ячейки Q_k, т.ч. $e \subset \bigcup_{k=1}^{\infty} Q_k$ и $\sum_{k=1}^{\infty} \lambda_m Q_k < \varepsilon$
12. Пусть $m \geq 2$. $H_k(c) = \{x \in \mathbb{R}^m : x_k = c\}$. Тогда $\lambda_m(H_k(c)) = 0$
13. Пусть $m \geq 2$. Множество, содержащееся в нбчс объединении гиперплоскостей $H_k(c)$, имеет меру 0
14. $\lambda_m(a, b] = \lambda_m(a, b) = \lambda_m[a, b]$

Доказательство:

1. Открытые множества лежат в $\mathcal{B}(\mathcal{P}^m)$. Картинка на записи! $\lambda_m \delta > \lambda_m(\text{ячейка}) > 0$
3. Картинка! $\lambda_m(\text{точка}) < \lambda_m(\text{ячейка}) = \varepsilon^m$
4. Картинка! A – ограничено. $\lambda_m A \leq \lambda_m(\text{шар}) \leq \lambda_m(\text{ячейка}) < +\infty$
6. $A_{\frac{1}{n}} \subset E \subset B_{\frac{1}{n}}$; $\lambda_m(B_{\frac{1}{n}} \setminus A_{\frac{1}{n}}) < \frac{1}{n}$
   $A := \bigcup_{n=1}^{\infty} A_{\frac{1}{n}} \in \mathcal{L}^m$ и $B := \bigcap_{n=1}^{\infty} B_{\frac{1}{n}} \in \mathcal{L}^m$
   $B \setminus A \subset B_{\frac{1}{n}} \setminus A_{\frac{1}{n}}$; $\lambda_m(B \setminus A) \leq \lambda_m(B_{\frac{1}{n}} \setminus A_{\frac{1}{n}}) < \frac{1}{n} \Rightarrow \lambda_m(B \setminus A) = 0$
   Тогда т.к. $E \setminus A \subset B \setminus A \Rightarrow E \setminus A \in \mathcal{L}^m$
   Тогда $E = \underbrace{A}_{\in \mathcal{L}^m} \cup \underbrace{(E \setminus A)}_{\in \mathcal{L}^m}$
7. $A_\varepsilon = \varnothing$ в свойстве 6
10. От противного. Если a – внутренняя точка A. Рисунок! $\Rightarrow \lambda_m A \geq \lambda_m(\text{ячейка}) > 0$
11. $0 = \lambda_m e = \inf\{\sum_{k=1}^{\infty} \lambda_m P_k : e \subset \bigcup_{k=1}^{\infty} P_k \text{ и } P_k \in \mathcal{P}^m_{\mathbb{Q}}\}$
    Возьмем такие $P_k \in \mathcal{P}^m_{\mathbb{Q}}$, что $e \subset \bigcup_{k=1}^{\infty} P_k$ и $\sum_{k=1}^{\infty} \lambda_m P_k < \varepsilon$
    Рассмотрим P_k, у нее все стороны имеют рациональную длину. $d = \frac{1}{\text{НОК знаменателей}}$
    $\Rightarrow$ каждая сторона кратна $d \Rightarrow$ нарежем P_k на кубики со стороной d

12. $A_n := (-n,n]^m \cap H_k(c) \Rightarrow H_k(c) = \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} A_n$

Достаточно доказать, что $\lambda_n A_n = 0$. $A_n \subset (-n,n] \times \ldots \times (-n,n] \times (c-\varepsilon, c] \times (-n,n] \times \ldots$

$\lambda_m(\text{ячейка}) = (2n)^{m-1} \cdot \varepsilon$

Remark 1.12.

1. Существуют несчетные множество нулевой меры

   При $m \geq 2$ подойдет $H_1(0)$

   При $m = 1$ подойдет Канторово множество:

   $1 = \lambda(0,1] = \lambda K + \underbrace{\frac{1}{3} + 2 \cdot \frac{1}{9} + 4 \cdot \frac{1}{27} + \ldots + 2^n \cdot \frac{1}{3^{n+1}}}_{\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{1-\frac{2}{3}} = 1} \Rightarrow \lambda K = 0$

   $(0,1]$ запишем в троичной системе счисления. Запрещаем запись $\ldots\underbrace{000}_{\text{нули}}$

   Т.к. $0,2000\ldots = 0,1222\ldots$

   $(\underset{\frac{1}{3}}{}\ \underset{\frac{2}{3}}{}]$ – числа, у которых первая цифра после запятой – 1

   $(\underset{\frac{1}{9}}{}\ \underset{\frac{2}{9}}{}]$ и $(\underset{\frac{7}{9}}{}\ \underset{\frac{8}{9}}{}]$ – числа, у которых вторая цифра после запятой – 1

   И так далее

   K – числа из $(0,1]$, у которых в троичной записи нет 1. Биекция между K и $(0,1]$:

   $0 \mapsto 0$; $2 \mapsto 1$; троичная $\mapsto$ двоичная
2. Существуют неизмеримые множества (т.е. $\mathcal{L}^m \neq 2^{\mathbb{R}^m}$)

Theorem 1.23. Регулярность меры Лебега

$E \in \mathcal{L}^m$. Тогда существует G – открытое, $G \supset E$, т.ч. $\lambda_m(G \setminus E) < \varepsilon$

Доказательство:

$\lambda_m E < +\infty$. $\lambda_m E = \inf\{\sum\limits_{k=1}^{\infty} \lambda_n P_k : P_k \text{ – ячейки и } E \subset \bigcup\limits_{k=1}^{\infty} P_k\}$

Возьмем такие ячейки, что $\sum\limits_{k=1}^{\infty} \lambda_m P_k < \lambda_m E + \varepsilon$ и $E \subset \bigcup\limits_{k=1}^{\infty} P_k$

Возьмем $(a_k, b_k) \supset P_k$, т.ч. $\lambda_m(a_k, b_k) < \lambda_m P_k + \frac{\varepsilon}{2^k}$

$E \subset G := \bigcup\limits_{k=1}^{\infty} (a_k, b_k)$ – открытое

$\lambda_m G \leq \sum\limits_{k=1}^{\infty} \lambda_m(a_k, b_k) \leq \sum\limits_{k=1}^{\infty} (\lambda_m P_k + \frac{\varepsilon}{2^k}) = \varepsilon + \sum\limits_{k=1}^{\infty} \lambda_m P_k < 2\varepsilon + \lambda_m E$

$\lambda_m(G \setminus E) = \lambda_m G - \lambda_m E < 2\varepsilon$

$\lambda_m E = +\infty$. $E = \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} E_n$, т.ч. $\lambda_m E_n < +\infty$

По предыдущему случаю $\exists G_n$ – открытое, $G_n \supset E_n$ и $\lambda_m(G_n \setminus E_n) < \frac{\varepsilon}{2^n}$

$G := \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} G_n$ – открытое

$G \setminus E \subset \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} G_n \setminus E_n \Rightarrow \lambda_m(G \setminus E) \leq \sum\limits_{n=1}^{\infty} \lambda_m(G_n \setminus E_n) < \sum\limits_{n=1}^{\infty} \frac{\varepsilon}{2^n} = \varepsilon$

Theorem 1.24. Следствие 1

$\varepsilon > 0,\ E \in \mathcal{L}^m$. Тогда существует замкнутое F, т.ч. $F \subset E$ и $\lambda_m(E \setminus F) < \varepsilon$

Доказательство:

По теореме найдется G – открытое, т.ч. $G \supset \mathbb{R}^m \setminus E$ и $\lambda_m(G \setminus (\mathbb{R}^m \setminus E)) < \varepsilon \Rightarrow$
$\Rightarrow F := \mathbb{R}^m \setminus G$ – замкнутое, $F \subset E$ и $E \setminus F = G \setminus (\mathbb{R}^m \setminus E)$

Theorem 1.25. Следствие 2

$E \in \mathcal{L}^m$. Тогда
$\lambda_m E = \inf\{\lambda_m G : G$ – открытое и $E \subset G\}$
$\lambda_m E = \sup\{\lambda_m F : F$ – замкнутое и $E \supset F\}$
$\lambda_m E = \sup\{\lambda_m K : K$ – компакт и $K \subset E\}$

Доказательство:

1. Из теоремы $\Rightarrow \exists G \supset E$ – открытое, т.ч. $\lambda_m(G \setminus E) < \varepsilon \Rightarrow \lambda_m G < \lambda_m E + \varepsilon$
2. Если $\lambda_m E < +\infty$, то по следствию 1 $\exists F \subset E$ – замкнутое, т.ч. $\lambda_m(E \setminus F) < \varepsilon \Rightarrow \lambda_m F > \lambda_m E - \varepsilon$
   Если $\lambda_m E = +\infty \ldots\ldots \Rightarrow \lambda_m F = +\infty$
3. Выберем замкнутое $F \subset E$, т.ч. $\lambda_m F > \lambda_m E - \varepsilon$
   $K_n := \underbrace{[-n, n]^m}_{\text{компакт}} \cap F$
   $K_1 \subset K_2 \subset \ldots$ и $\bigcup\limits_{n=1}^{\infty} K_n = F \xRightarrow[\text{непр. меры снизу}]{} \lambda_m K_n \to \lambda_m F > \lambda_m E - \varepsilon \Rightarrow$ найдется K_n, т.ч. $\lambda_m K_n > \lambda_m F - \varepsilon$
   В случае с $\lambda_m E = +\infty$ доказательство меняется несильно

Theorem 1.26. Следствие 3

$E \in \mathcal{L}^m$. Тогда существуют компакты $K_1 \subset K_2 \subset \ldots$ и e нулевой меры, т.ч. $E = e \sqcup \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} K_n$

Доказательство:

$\lambda_m E < +\infty$. Возьмем $K_n \subset E$ – компакт, т.ч. $\lambda_m K_n > \lambda_m E - \frac{1}{n}$

$$\bigcup_{n=1}^{\infty} K_n \subset E \text{ и } \underbrace{E \setminus \bigcup_{n=1}^{\infty} K_n}_{e} \subset E \setminus K_n \Rightarrow \lambda_m e < \lambda_m(E \setminus K) = \lambda_m E - \lambda_m K_n < \frac{1}{n} \Rightarrow \lambda_m e = 0$$

Как сделать вложенность? $K_1, K_1 \cup K_2, K_1 \cup K_2 \cup K_3, \ldots$

$\lambda_m E = +\infty$. $E = \bigsqcup\limits_{n=1}^{\infty} E_n$; $\lambda_m E_n < +\infty$. Тогда $\exists K_{n1}, K_{n2} \ldots$ – компакты и $\lambda_m e_n = 0$,

$$\text{т.ч. } E_n = e_n \sqcup \bigcup_{k=1}^{\infty} K_{nk} \Rightarrow E = \underbrace{\bigcup_{n=1}^{\infty} e_n}_{e} \sqcup \bigcup_{n=1}^{\infty} \bigcup_{k=1}^{\infty} K_{nk}$$

Theorem 1.27. Инвариантность меры Лебега относительно сдвига

$E \subset \mathbb{R}^m$ – измеримое относительно меры Лебега, $v \in \mathbb{R}^m$
Тогда $E + v$ – измеримо и $\lambda E = \lambda(E + v)$

Доказательство:

$\mu E := \lambda(E + v)$

μ и λ совпадают на ячейках $\Rightarrow$ μ^* и λ^* совпадают $\Rightarrow$ совпадают измеримые множества для μ^* и λ^* $\Rightarrow$ E и $E + v$ одновременно измеримые (или нет) и их меры равны

Theorem 1.28.

Пусть μ задана на $\mathcal{L}^m$. Если

1. μ инвариантна относительно сдвигов
2. μ конечна на ячейках (= μ конечна на ограниченных измеримых множествах)

то существует $k \in [0, +\infty)$, т.ч. $\mu = k \cdot \lambda$

Доказательство:

$Q := (0, 1]^m$; $k := \mu Q$

$k = 1$: Тогда $\mu Q = 1$
$Q_n := (0, \frac{1}{n}]^m$. Из n^m копий Q_n можно собрать $Q \Rightarrow n^m \mu Q_n = \mu Q = \lambda Q = n^m \lambda Q_n \Rightarrow$
$\Rightarrow \mu Q_n = \lambda Q_n$
Рассмотрим ячейку из $\mathcal{P}^m_{\mathbb{Q}}$. Все длины сторон у нее рациональные
$n =$ НОК всех знаменателей длин сторон. Эта ячейка собирается из сдвигов $Q_n \Rightarrow$
$\Rightarrow \mu = \lambda$ на $\mathcal{P}^m_{\mathbb{Q}} \xRightarrow[\text{единств. продолж.}]{} \mu = \lambda$

$k > 0$: $\tilde{\mu} := \frac{1}{k}\mu \Rightarrow \tilde{\mu} Q = 1 \Rightarrow \tilde{\mu} = \lambda \Rightarrow \mu = k\lambda$

$k = 0$: $\mu Q = 0$
$\mathbb{R}^m$ – счетное объединение сдвигов $Q \Rightarrow \mu \mathbb{R}^m = 0 \Rightarrow \mu \equiv 0$

Theorem 1.29.

$G \subset \mathbb{R}^m$ – открытое. $\Phi : G \to \mathbb{R}^m$ – непрерывно дифференцируема. Тогда

1. Если $e \subset G$, т.ч. $\lambda e = 0$, то $\lambda(\Phi(e)) = 0$
2. Если $E \subset G$, т.ч. E – измеримое, то $\Phi(E)$ – измеримое

Доказательство:

1. • Случай $e \subset P \subset \operatorname{Cl} P \subset G$, где P – ячейка
$\operatorname{Cl} P$ – компакт, $\Phi'(x)$ – непрерывна на $\operatorname{Cl} P$
$||\Phi'(x)||$ непрерывна на $\operatorname{Cl} P \Rightarrow ||\Phi'(x)|| \leq M \ \forall x \in \operatorname{Cl} P \Rightarrow ||\Phi(x) - \Phi(y)|| \leq M||x - y||$
$\lambda e = 0 \Rightarrow e$ можно покрыть кубическими ячейками Q_n так, что $\sum\limits_{n=1}^{\infty} \lambda Q_n < \varepsilon$;
$(e \subset \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} Q_n) \Rightarrow \Phi(e) \subset \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} \Phi(Q_n) \subset \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} \tilde{Q_n}$
Пусть a_n – длина ребра Q_n
Если x и $y \in Q_n$, то $||x - y|| < \sqrt{m} a_n \Rightarrow ||\Phi(x) - \Phi(y)|| < \sqrt{m} M a_n \Rightarrow \Phi(y)$ лежит в шаре радиуса $\sqrt{m} M a_n$ с центром в $\Phi(x) \Rightarrow \Phi(y)$ лежит в кубической ячейке $\tilde{Q_n}$ со стороной $2\sqrt{m} M a_n$ (с центром в $\Phi(x)$)

$$\sum_{n=1}^{\infty} \lambda\tilde{Q_n} = \sum_{n=1}^{\infty}(2\sqrt{m}Ma_n)^m = (2\sqrt{m}M)^m \sum_{n=1}^{\infty}(a_n)^m = (2\sqrt{m}M)^m \underbrace{\sum_{n=1}^{\infty} \lambda Q_n}_{<\varepsilon} < \varepsilon\cdot(2\sqrt{m}M)^m \Rightarrow$$

$\Rightarrow \lambda\Phi(e) = 0$

- Случай произвольный
  Представим G в виде $\bigsqcup\limits_{j=1}^{\infty} P_j$, где P_j – ячейки и $\operatorname{Cl} P_j \subset G$
  $e_j := e \cap P_j$; $\lambda e_j = 0$ и e_j подходит под предыдущий случай $\Rightarrow \lambda\Phi(e_j) = 0$, но
  $\Phi(e) = \bigcup\limits_{j=1}^{\infty} \Phi(e_j) \Rightarrow \lambda\Phi(e) = 0$

2. E – измеримое $\Rightarrow E = e \sqcup \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} K_n$, где $\lambda e = 0$ и K_n – компакты $\Rightarrow$

$$\Rightarrow \Phi(E) = \underbrace{\Phi(e)}_{\text{мера 0, т.е. измеримы}} \cup \bigcup_{n=1}^{\infty} \underbrace{\Phi(K_n)}_{\text{компакты, т.е. измеримы}}$$

Theorem 1.30.

Мера Лебега инвариантна относительно движения

Доказательство:

Движение – композиция сдвигов и поворотов. Надо понять, что λ не меняется при повороте
U – поворот вокруг 0. Если E – измеримо, то $U(E)$ – измеримо
$\mu E := \lambda(U(E))$. μ задана на $\mathcal{L}^m$
Проверим, что μ инвариантна относительно сдвигов
$\mu(E+v) = \lambda(U(E+v)) = \lambda(U(E)+U(v)) = \lambda(U(E)) = \mu E$
μ конечна на ограниченных измеримых множествах $\Rightarrow \mu = k\lambda$
Но U переводит в себя единичный шарик с центром в 0 $\Rightarrow k = 1$
B – единичный шар. $\underbrace{\mu B}_{k\lambda B} = \lambda(\underbrace{U(B)}_{B}) = \lambda B$

Theorem 1.31. Об изменении меры Лебега при линейной отображении

$T : \mathbb{R}^m \to \mathbb{R}^m$; E – измеримое. Тогда $T(E)$ – измеримое и $\lambda(T(E)) = |\det T| \cdot \lambda E$

Доказательство:

$\mu E := \lambda(T(E))$ – инвариантна относительно сдвигов
μ – конечна на ограниченных измеримых множествах $\Rightarrow \mu = k\lambda$
Нужно найти k. Возьмем Q – единичный куб. Q был куб, натянутым на вектора. T повернул эти вектора, получили $T(Q)$ – косоугольный параллелепипед и $|\det T|$ – его объем

Remark 1.13.

λ и объем на параллелепипеде из алгебры – одно и то же (рисунок на записи)

Example 1.5. Неизмеримое множество для λ_1

$[0,1];\ x \sim y$, если $x - y \in \mathbb{Q}$
В каждом классе эквивалентности возьмем по одному представителю
A – получившееся множество
Предположим, что A – измеримо. Тогда у него есть конечная мера

- $\lambda A = 0$:
  $\bigsqcup\limits_{r\in\mathbb{Q}} (A+r) \supset [0,1]$
  $(A+r_1)\cap(A+r_2) \neq \varnothing \Rightarrow x + r_1 = y + r_2$, где $x, y \in A \Rightarrow x \sim y \Rightarrow x = y \Rightarrow$
  $\Rightarrow \underbrace{\lambda_1[0,1]}_{1} \leq \sum\limits_{r\in\mathbb{Q}} \underbrace{\lambda(A+r)}_{\lambda A = 0} = 0$. Противоречие
- $\lambda A > 0$:
  $\bigsqcup\limits_{r\in\mathbb{Q}\cap[0,1]} (A+r) \subset [0,2] \Rightarrow \underbrace{\lambda[0,2]}_{2} \geq \sum\limits_{r\in\mathbb{Q}\cap[0,1]} \underbrace{\lambda(A+r)}_{\lambda A} = +\infty$. Противоречие

1.5 §5. Измеримые функции

Notation 1.1.

Теперь все меры заданы на σ-алгебрах
Измеримые множества – множества из σ-алгебры, где задана мера

Definition 1.22. Лебеговы множества

$f : E \to \overline{\mathbb{R}}$. Лебеговы множества для функции f
$E\{f \leq a\} := f^{-1}[-\infty, a] = \{x \in E : f(x) \leq a\}$
$E\{f < a\} := f^{-1}[-\infty, a) = \{x \in E : f(x) < a\}$
$E\{f \geq a\} := f^{-1}[a, +\infty] = \{x \in E : f(x) \geq a\}$
$E\{f > a\} := f^{-1}(a, +\infty] = \{x \in E : f(x) > a\}$

Theorem 1.32.

Пусть E – измеримое множество. Тогда равносильно следующее:

1. $E\{f \leq a\}$ – измеримы $\forall a \in \mathbb{R}$
2. $E\{f < a\}$ – измеримы $\forall a \in \mathbb{R}$
3. $E\{f \geq a\}$ – измеримы $\forall a \in \mathbb{R}$
4. $E\{f > a\}$ – измеримы $\forall a \in \mathbb{R}$

Доказательство:

$1 \Leftrightarrow 4$: $E\{f > a\} = E \setminus E\{f \leq a\}$
$2 \Leftrightarrow 3$: $E\{f < a\} = E \setminus E\{f \geq a\}$
$1 \Rightarrow 2$: $E\{f < a\} = \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} E\{f \leq a - \frac{1}{n}\}$
$3 \Rightarrow 4$: $E\{f > a\} = \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} E\{f \geq a + \frac{1}{n}\}$

Definition 1.23. Измеримая функция

$f : E \to \overline{\mathbb{R}}$ – измерима, если измеримы все ее Лебеговы множества

Remark 1.14.

$f : E \to \overline{\mathbb{R}}$
f – измерима $\Leftrightarrow$ E – измеримо и $\forall a \in \mathbb{R}$ измеримы все лебеговы множества одного типа

Доказательство:

$\Leftarrow$: Теорема
$\Rightarrow$: $E = E\{f < a\} \cup E\{f \geq a\}$

Example 1.6.

1. Константа
2. A, E – измеримые; $f(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \cap E \\ 0, & x \in E \setminus A \end{cases}$
3. $f \in C(\mathbb{R}^m)$. Тогда f – измерима относительно λ_m
   Доказательство:
   $\mathbb{R}^m\{f < a\} = f^{-1} \underbrace{(-\infty, a)}_{\text{откр.}}$ – открыто $\Rightarrow$ измеримо

Theorem 1.33. Свойства измеримых функций

$f : E \to \overline{\mathbb{R}}$ – измеримая

1. E – измеримо
2. $E\{f = -\infty\} = \bigcap\limits_{n=1}^{\infty} E\{f < -n\}$ и $E\{f = +\infty\} = \bigcap\limits_{n=1}^{\infty} E\{f > n\}$ – измеримы
3. Прообразы любого промежутка измеримы
   $\underbrace{E\{a < f < b\}}_{E\{f<b\} \setminus E\{f \leq a\}}, E\{a \leq f \leq b\}, \ldots$
4. $E\{f = c\}$ – измеримы
5. Прообразы любого открытого множества измеримы
   Доказательство:
   $G \subset \mathbb{R}$ – открытое $\Rightarrow G = \bigsqcup\limits_{k=1}^{\infty} (a_k, b_k] \Rightarrow f^{-1}(G) = \bigsqcup\limits_{k=1}^{\infty} f^{-1}(a_k, b_k]$
6. $-f$ и $|f|$ – измеримы
   Доказательство:
   $E\{-f < a\} = E\{f > -a\}$
   $E\{|f| < a\} = \begin{cases} \varnothing & a \leq 0 \\ E\{-a < f < a\} & a > 0 \end{cases}$
7. $f, g : E \to \overline{\mathbb{R}}$ – измеримы
   Тогда $\max\{f, g\}$ и $\min\{f, g\}$ – измеримы
   ($\max\{f, g\}$ – такая $h : E \to \overline{\mathbb{R}}$, что $h(x) = \max\{f(x), g(x)\}$)
   Доказательство:
   $E\{max\{f, g\} < a\} = E\{f < a\} \cap E\{g < a\}$
8. $f_+ := \max\{f, 0\}$ и $f_- := \max\{-f, 0\}$ – измеримы
9. $E = \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} E_n$, E_n – измеримы, $f : E \to \overline{\mathbb{R}}$. Если $f\,|_{E_n}$ – измеримо, то f – измерима
   Доказательство:
   $E\{f < a\} = \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} E_n\{f < a\}$
10. $f : E \to \overline{\mathbb{R}}$ – измеримая, тогда $f = g\,|_E$, где $g : X \to \overline{\mathbb{R}}$ – измеримая
    Доказательство:
    $g(x) := \begin{cases} f(x) & x \in E \\ 0 & x \notin E \end{cases}$

Theorem 1.34.

$f_1, f_2, \ldots : E \to \overline{\mathbb{R}}$ – последовательность измеримых функций. Тогда

1. $\sup f_n, \inf f_n$ – измеримы
   ($\sup f_n$ – такая функция h, что $h(x) = \sup\limits_{n\in\mathbb{N}}\{f_n(x)\}$)
2. $\underline{\lim} f_n$ и $\overline{\lim} f_n$ – измеримы
3. Если существует $\lim f_n$, то он измерим

Доказательство:

1. $h := \sup\{f_n\}$
   $E\{h \le a\} = \bigcap\limits_{n=1}^{\infty} E\{f_n \le a\}$
   Если $x \in E\{h \le a\}$, то $\sup\limits_{n\in\mathbb{N}} f_n(x) \le a \Leftrightarrow f_n(x) \le a\ \forall n$
   $E\{\inf f_n \ge a\} = \bigcap\limits_{n=1}^{\infty} E\{f_n \ge a\}$
2. $\underline{\lim} f_n(x) = \sup\limits_{n\in\mathbb{N}} \underbrace{\inf\limits_{k\ge n} f_k(x)}_{\text{измеримо}}$
   $\overline{\lim} f_n(x) = \inf\limits_{n\in\mathbb{N}} \underbrace{\sup\limits_{k\ge n} f_k(x)}_{\text{измеримо}}$
3. Если lim существует, то он совпадает с $\overline{\lim}$ и с $\underline{\lim}$

Theorem 1.35.

$f : E \to H \subset \mathbb{R}^m;\ f_1, f_2, \ldots, f_m$ – измеримы
$\varphi : H \to \mathbb{R}$, т.ч. $\varphi \in C(H)$
Тогда $F(x) := \varphi(f_1(x), f_2(x), \ldots, f_m(x))$ – измерима

Доказательство:

$E\{F < a\} = F^{-1}(-\infty, a) = f^{-1}(\varphi^{-1}(-\infty, a))$

$\varphi^{-1}(-\infty, a)$ – прообраз открытого множества – открытое в H множество, т.е. это пересечение некоторого открытого $G \subset \mathbb{R}^m$ с H

$\varphi^{-1}(-\infty, a) = G \cap H$, т.е. $E\{F < a\} = f^{-1}(G \cap H) = f^{-1}(G)$

Т.е. надо для открытого G понять, что $f^{-1}(G)$ – измеримо

$G = \bigsqcup\limits_{k=1}^{\infty} \underbrace{(a_k, b_k]}_{\text{ячейки в } \mathbb{R}^m}$, т.е. надо понять, что $f^{-1}(c, d]$ – измеримо

$(c, d] = (c_1, d_1] \times (c_2, d_2] \times \ldots \times (c_m, d_m]$

$f^{-1}(c, d] = \{x \in E : c_1 < f_1(x) \le d_1, \ldots, c_m < f_m(x) \le d_m\} = \bigcap\limits_{k=1}^{\infty} E\{c_k < f_k \le d_k\}$

Notation 1.2. Операции с $\pm\infty$

1. $\pm\infty + a = \pm\infty \ \forall a \in \mathbb{R}$
2. $\pm\infty \cdot a = \pm\infty \ \forall a > 0$
   $\pm\infty \cdot a = \mp\infty \ \forall a < 0$
3. $\pm\infty \cdot 0 = 0$
4. $+\infty - (+\infty) = (-\infty) - (-\infty) = +\infty + (-\infty) = 0$
5. $\frac{a}{\pm\infty} = 0 \ \forall a \in \overline{\mathbb{R}}$
6. Деление на 0 не определено

Theorem 1.36.

1. Произведение и сумма измеримых функций – измеримы
2. φ – непрерывна, f – измерима, $\varphi \circ f$ – измерима
3. $p > 0$, f – измерима и $\geq 0 \Rightarrow f^p$ – измерима (считаем, что $(+\infty)^p = +\infty$)
4. Если f – измерима, то $\frac{1}{f}$ измерима на $E\{f \neq 0\}$

Доказательство:

1. $f, g : E \to \overline{\mathbb{R}}$ – измеримые
   $E\{f = +\infty\}, E\{f = -\infty\}$ и $E\{f \in \mathbb{R}\}$ и аналогично для g
   На $E\{f \in \mathbb{R}\} \cap E\{g \in \mathbb{R}\} : f + g$ – измерима
   $\varphi(x, y) = x + y;\ f + g = \varphi(f, g)$
   На остальных пересечениях $f + g$ – постоянна
2. Частный случай теоремы
3. $\{f^p \leq a\} = \begin{cases} \varnothing & a \leq 0 \\ E\{f \leq a^{\frac{1}{p}}\} & a > 0 \end{cases}$
4. $\tilde{E} := E\{f \neq 0\}$
   $$\tilde{E}\{\tfrac{1}{f} \leq a\} = \begin{cases} E\{\frac{1}{a} \leq f < 0\} & a < 0 \\ E\{f < 0\} & a = 0 \\ E\{f \leq 0\} \cup E\{\frac{1}{a} \leq f\} & a > 0 \end{cases}$$

Theorem 1.37. Следствия

1. Произведение конечного числа измеримых – измеримая
2. Натуральная степень измеримых – измеримая
3. Линейная комбинация измеримых – измеримая

Theorem 1.38.

$E \subset \mathbb{R}^m$ – измеримо относительно меры Лебега
$f \in C(E)$. Тогда f – измерима относительно меры Лебега

Доказательство:

$E\{f < a\} = f^{-1}(-\infty, a)$ – открыто в E, т.е. $E \cap G$ для некоторого $G \subset \mathbb{R}^m$ – открытое

Definition 1.24. Простая функция

$f : E \to \mathbb{R}$ – измеримая
f – простая, если она принимает конечное число значений

Definition 1.25. Допустимое разбиение

$E = \bigsqcup\limits_{k=1}^{n} A_n$, т.ч. $f\mid_{A_k}$ – константа и A_k – измеримые $\forall k$

Theorem 1.39. Свойства

1. Если $E = \bigsqcup\limits_{k=1}^{n} A_k,\ A_k$ – измеримы $\forall k,\ f\mid_{A_k}$ – константы, то f – простая
2. Для любой пары простых функций есть общее допустимое разбиение
   Доказательство:
   $E = \bigsqcup\limits_{k=1}^{m} A_k$ – допустимое разбиение для f
   $E = \bigsqcup\limits_{j=1}^{n} B_j$ – допустимое разбиение для g
   $\bigsqcup\limits_{k=1}^{m} \bigsqcup\limits_{j=1}^{n} A_k \cap B_j$ – допустимое разбиение для f и g
3. Сумма, разность и произведение простых функций – простая функция
4. Линейная комбинация простых функций – простая функция
5. max и min конечного числа простых функций – простая функция
   Доказательство:
   Для двух функций – общее допустимое разбиение

Theorem 1.40. Теорема о приближении измеримых функций

$F : E \to \overline{\mathbb{R}}$ – неотрицательная измеримая
Тогда существует последовательность $\varphi_1 \le \varphi_2 \le \varphi_3 \le \dots$ простых функций $\varphi_n : E \to \mathbb{R}$, т.ч. $f = \lim \varphi_n$ (поточечный предел)
Если f ограниченная, то можно выбрать φ_n так, что $\varphi_n \rightrightarrows f$ на E

Доказательство:
$[0, +\infty]$ нарежем на множества $\Delta_k^{(n)} := [\frac{k}{n}, \frac{k+1}{n})$ и $\Delta_{n^2}^{(n)} := [n, +\infty]$ при $k = 0, 1, \dots, n^2 - 1$

$[0, +\infty] = \bigsqcup\limits_{k=0}^{n^2} \Delta_k^{(n)}$

Возьмем $A_k^{(n)} := f^{-1}(\Delta_k^{(n)})$ – измеримые множества $\Rightarrow E = \bigsqcup\limits_{k=0}^{n^2} A_k^{(n)}$. Положим φ_n на $A_k^{(n)}$ равной $\frac{k}{n}$. Тогда $\varphi \le f$. Покажем, что $\lim \varphi_n(x) = f(x)$

- Случай $f(x) = +\infty$
  Тогда $f(x) \in \Delta_{n^2}^{(n)} \Rightarrow \varphi_n(x) = n \to +\infty = f(x)$
- Случай $f(x) < +\infty$
  При больших n $f(x) < n \Rightarrow f(x) \in \Delta_k^{(n)}$ при $k < n^2 \Rightarrow x \in A_k^{(n)}$
  $\varphi_n(x) \le f(x) < \varphi_n(x) + \frac{1}{n} \Rightarrow |\varphi_n(x) - f(x)| < \frac{1}{n} \Rightarrow \lim \varphi_n(x) = f(x)$
  Монотонной будет последовательность $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_4, \varphi_8, \dots, \varphi_{2^n}, \dots$

$$\Delta_k^{(2^n)} = [\tfrac{k}{2^n}, \tfrac{k+1}{2^n});\ \Delta_{2k}^{(2^{n+1})} = [\underbrace{\frac{2k}{2^{n+1}}}_{\frac{k}{2^n}}, \tfrac{2k+1}{2^{n+1}});\ \Delta_{2k+1}^{(2^{n+1})} = [\underbrace{\frac{2k+1}{2^{n+1}}}_{>\frac{k}{2^n}}, \tfrac{2k+2}{2^{n+1}})$$

Если f ограничена, то $0 \le f \le M$ и при $n > M$ $f(x) \in \Delta_k^{(n)}$ при $k < n^2 \Rightarrow |f(x) - \varphi_n(x)| < \frac{1}{n} \Rightarrow$
$\Rightarrow \varphi_n \rightrightarrows f$ на E

1.6 §6. Последовательности функций

Reminder 1.3.

1. Поточечная сходимость. $f_n, f : E \to \overline{\mathbb{R}}$
   f_n сходится к f поточечно, если $\lim f_n(x) = f(x)\ \forall x \in E$
2. Равномерная сходимость. $f_n, f : E \to \mathbb{R}$
   $f_n \rightrightarrows f$ на E, если $\forall \varepsilon > 0\ \exists N : \forall n \geq N\ \forall x \in E \Rightarrow |f_n(x) - f(x)| < \varepsilon$
   (можно написать, что $\sup\limits_{x \in E} |f_n(x) - f(x)| \xrightarrow[n\to\infty]{} 0$)

Remark 1.15.

Знаем, что из равномерной сходимости следует поточечная

Declaration 1.7.

$\mathcal{L}(E, \mu)$ – множество функций $f : E \to \overline{\mathbb{R}}$, измеримых и $\mu E\{f = \pm\infty\} = 0$

Definition 1.26. Сходимость почти везде

$f_n, f : E \to \mathbb{R}$ – измеримые
f_n сходится к f почти везде на E, если существует $e \subset E$, т.ч. $\lim f_n(x) = f(x)\ \forall x \in E \setminus e$ и $\mu e = 0$

Definition 1.27. Сходимость по мере

$f_n, f \in \mathcal{L}(E, \mu)$
f_n сходится по мере к f ($f_n \xrightarrow{\mu} f$) если $\forall \varepsilon > 0\ \mu E\{|f_n - f| > \varepsilon\} \xrightarrow[n\to\infty]{} 0$

Remark 1.16.

Равномерная сходимость $\Rightarrow$ поточечная сходимость $\Rightarrow$ сходимость почти везде
Равномерная сходимость $\Rightarrow$ сходимость по мере

Proposition 1.4.

1. Если $f_n \to f$ и $f_n \to g$ почти везде, то $\mu E\{f \neq g\} = 0$
2. Если $f_n \xrightarrow{\mu} f$ и $f_n \xrightarrow{\mu} g$, то $\mu E\{f \neq g\} = 0$

Доказательство:

1. $\begin{cases} e_1 \subset E\ \mu e_1 = 0 \text{ и на } E \setminus e_1\ f_n(x) \to f(x) \\ e_2 \subset E\ \mu e_2 = 0 \text{ и на } E \setminus e_2\ f_n(x) \to g(x) \end{cases} \Rightarrow \text{на } E \setminus (e_1 \cup e_2)$
   $f_n(x) \to f(x)$ и $f_n(x) \to g(x) \Rightarrow f(x) = g(x)$ на $E \setminus (e_1 \cup e_2) \Rightarrow E\{f \neq g\} \subset e_1 \cup e_2$
2. $E\{f \neq g\} = \bigcup\limits_{m=1}^{\infty} E\{|f - g| > \frac{1}{m}\}$. Надо доказать, что $\mu E\{|f - g| > \frac{1}{m}\} = 0$
   $E\{|f - g| > \frac{1}{m}\} \subset E\{|f - f_n| > \frac{1}{2m}\} \cup E\{|g - f_n| > \frac{1}{2m}\} \Rightarrow$
   $\Rightarrow \mu E\{|f - g| > \frac{1}{m}\} \leq \underbrace{\mu E\{|f - f_n| > \dfrac{1}{2m}\}}_{\to 0} + \underbrace{\mu E\{|g - f_n| > \dfrac{1}{2m}\}}_{\to 0} \Rightarrow \mu E\{|f - g| > \frac{1}{m}\} = 0$

Theorem 1.41. Теорема Лебега

Пусть $\mu E < +\infty$. Тогда если f_n сходится к f почти везде, то $f_n \xrightarrow{\mu} f$

Доказательство:

Возьмем множество, где нет сходимости $f_n(x) \to f(x)$ и переопределим функции так, что сходимость появится

Шаг 1. $f \equiv 0$ $f_1 \geq f_2 \geq f_3 \geq \dots$ и $\lim f_n(x) = 0$

$E_n := E\{|f_n - f| > \varepsilon\} = E\{f_n > \varepsilon\}$ из монотонности $f_n \Rightarrow E_1 \supset E_2 \supset \dots$

$\bigcap\limits_{n=1}^{\infty} E_n = \varnothing$, т.к. $f_n(x) \to 0$; при больших n $f_n(x) < \varepsilon$ и $x_n \notin E_n$

По непрерывности меры сверху $\lim \mu E_n = 0 \Rightarrow f_n \xrightarrow{\mu} 0$

Шаг 2. Общий случай. $\lim |f_n(x) - f(x)| = 0 \Rightarrow \underbrace{\overline{\lim} |f_n(x) - f(x)| = 0}_{\lim \sup\limits_{k \geq n} |f_k(x) - f(x)| =: \lim g_n(x)}$

Тогда $\lim g_n(x) = 0$ и $g_1 \geq g_2 \geq g_3 \geq \dots \xRightarrow[\text{Шаг 1}]{} g_n \xrightarrow{\mu} 0$, т.е. $\underbrace{\mu E\{g_n > \varepsilon\}}_{\geq \mu E\{|f_n - f| > \varepsilon\}} \to 0$

$E\{g_n > \varepsilon\} \supset E\{|f_n - f| > \varepsilon\}$

Reminder 1.4.

$$\mathbb{1}_A(x) = \begin{cases} 1 & x \in A \\ 0 & x \notin A \end{cases}$$

Remark 1.17.

1. Без условия $\mu E < +\infty$ неверно
   $\mu = \lambda_1,\ E = [0, +\infty),\ f_n = \mathbb{1}_{[n, +\infty)},\ f_n \to 0$ поточечно
   $\lambda_1 E\{f_n > \varepsilon\} = \lambda_1 [n, +\infty) = +\infty$
2. Обратное утверждение неверно
   $\mu = \lambda_1,\ E = (0, 1]$
   $\mathbb{1}_{(0,1]},\ \mathbb{1}_{(0,\frac{1}{2}]},\ \mathbb{1}_{(\frac{1}{2},1]}, \mathbb{1}_{(0,\frac{1}{3}]},\ \mathbb{1}_{(\frac{1}{3},\frac{2}{3}]},\ \mathbb{1}_{(\frac{2}{3},1]}, \mathbb{1}_{(0,\frac{1}{4}]},\ \dots$
   По мере последовательность стремится к $\equiv 0$
   Но в последовательности $f_n(x)$ сколь угодно далеко есть как нули, так и единицы

Theorem 1.42. Теорема Рисса

$f_n, f \in \mathcal{L}(E, \mu)$ и $f_n \xrightarrow{\mu} f$. Тогда существует подпоследовательность f_{n_k}, т.ч. $f_{n_k} \to f$ почти везде

Доказательство:

$\mu E\{|f_n - f| > \varepsilon\} \xrightarrow[n \to \infty]{} 0$

Подставим $\varepsilon = \frac{1}{k}$. Найдется такое $n_{k-1} < n_k$, что $\mu \underbrace{E\{|f_{n_k} - f| > \frac{1}{k}\}}_{=: A_k} < \frac{1}{2^k}$

$B_m := \bigcup\limits_{k=m}^{\infty} A_k,\ \mu B_m \leq \sum\limits_{k=m}^{\infty} \mu A_k < \sum\limits_{k=m}^{\infty} \frac{1}{2^k} = \frac{1}{2^{m-1}}$

$B_1 \supset B_2 \supset B_3 \supset \dots;\ B := \bigcap\limits_{m=1}^{\infty} B_m;\ \mu B \le \mu B_m < \frac{1}{2^{m-1}} \Rightarrow \mu B = 0$

Покажем, что если $x \in E \setminus B$, то $f_{n_k}(x) \to f(x)$

$x \in E \setminus B \Rightarrow x \notin B \Rightarrow x \notin B_m \Rightarrow x \notin A_k$ при $k \ge m \Rightarrow x \in E\{f_{n_k} - f \le \frac{1}{k}\}$ при $k \ge m \Rightarrow$
$\Rightarrow |f_{n_k}(x) - f(x)| \le \frac{1}{k}$ при $k \ge m \Rightarrow |f_{n_k}(x) - f(x)| \xrightarrow[k\to\infty]{} 0$

Theorem 1.43. Следствие

$f_n \le g$ во всех точках и $f_n \xrightarrow{\mu} f$. Тогда $f \le g$ аз исключением множества нулевой меры

Доказательство:

Выбираем подпоследовательность $g \ge f_{n_k} \to f$ поточечно за исключением множества нулевой меры $\Rightarrow f(x) \le g(x)$ для тех x, где есть сходимость

Theorem 1.44. Теорема Егорова

$f_n, f \in \mathcal{L}(E, \mu)$ и $f_n \to f$ почти везде, $\varepsilon > 0$. Тогда найдется $e \subset E$, т.ч. $\mu e < \varepsilon$ и $f_n \rightrightarrows f$ на $E \setminus e$

Theorem 1.45. Теорема Фреше

$f : \mathbb{R}^m \to \mathbb{R}$ измеримая. Тогда существует $f_n \in C(\mathbb{R}^m)$, т.ч. $f_n \to f$ почти везде (относительно λ_m)

Theorem 1.46. Теорема Лузина

$f : E \to \mathbb{R}$, $E \subset \mathbb{R}^m$ измеримая, $\varepsilon > 0$. Тогда найдется $e \subset E$, т.ч. $\lambda_m e < \varepsilon$ и $f\ |_{E\setminus e}$ – непрерывно

Exercise 1.4.

Вывести Лузина из Егорова и Фреше

2 Глава 10. Интеграл Лебега

2.1 §1. Определение интеграла

Lemma 2.1.

$f \geq 0$ простая. $X = \bigsqcup\limits_{j=1}^{m} A_j = \bigsqcup\limits_{k=1}^{n} B_k$ – допустимые разбиения. E – измеримое множество. a_j и b_k соответствующие значения

Тогда $\sum\limits_{j=1}^{m} a_j\mu(E \cap A_j) = \sum\limits_{k=1}^{n} b_k\mu(E \cap B_k)$

Доказательство:

$E \cap A_j = \bigsqcup\limits_{k=1}^{n} E \cap A_j \cap B_k$; $\mu(E \cap A_j) = \sum\limits_{k=1}^{n} \mu(E \cap A_j \cap B_k)$

$\sum\limits_{j=1}^{m} a_j\mu(E \cap A_j) = \sum\limits_{j=1}^{m}\sum\limits_{k=1}^{n} \underbrace{a_j\mu(A_j \cap B_k \cap E)}_{b_k\mu(A_j \cap B_k \cap E)} = \sum\limits_{k=1}^{n}\sum\limits_{j=1}^{m} b_k\mu(A_j \cap B_k \cap E) = \sum\limits_{k=1}^{n} b_k\mu(B_k \cap E)$

Если $A_j \cap B_k \neq \varnothing$, то $a_j = b_k$

Definition 2.1. Интеграл Лебега от простой функции

$f \geq 0$ простая

$\int\limits_E f d\mu = \int\limits_E f(x)d\mu(x) := \sum\limits_{j=1}^{m} a_j\mu(E \cap A_j)$, где $X = \bigsqcup\limits_{j=1}^{m} A_j$ – допустимое разбиение, a_j значение f на A_j

Theorem 2.1. Свойства

1. $c \geq 0 \Rightarrow \int\limits_E cf d\mu = c\int\limits_E f d\mu$
2. $c \geq 0$, $\int\limits_E c d\mu = c\mu E$
3. $\int\limits_E (f+g)d\mu = \int\limits_E f d\mu + \int\limits_E g d\mu$, f и $g \geq 0$ простые
4. Если $0 \leq f \leq g$ – простые, то $\int\limits_E f d\mu \leq \int\limits_E g d\mu$

Доказательство:

Берем общее допустимое разбиение $\bigsqcup A_j$, a_j – значение f на A_j, b_j – значение g на A_j

$\int\limits_E f d\mu = \sum a_j\mu(E \cap A_j)$

$\int\limits_E g d\mu = \sum b_j\mu(E \cap A_j)$

Definition 2.2. Интеграл Лебега от неотрицательной измеримой функции

$\int\limits_E f d\mu := \sup\{\int\limits_E \varphi d\mu : 0 \leq \varphi \leq f$ и φ – простая$\}$

Remark 2.1.

Новое определение на простых функция дает тот же результат, что был
Если f – простая, то $\varphi = f$ можно взять
$0 \le \varphi \le f$ (простая) $\int\limits_E \varphi d\mu \le \int\limits_E f d\mu$

Theorem 2.2. Свойства

1. Если $\mu E = 0$, то $\int\limits_E f d\mu = 0$
2. Если $0 \le f \le g$ измеримые, то $\int\limits_E f d\mu \le \int\limits_E g d\mu$

   Доказательство:
   Т.к. если φ подходит для f, т.е. $0 \le \varphi \le f$, то она подходит и для $g \Rightarrow \sup$ для g берется по большему множеству
3. $f \ge 0$ измеримая, $\int\limits_E f d\mu = \int\limits_X \mathbb{1}_E f d\mu$

   Доказательство:
   Если $0 \le \varphi \le f$ на E, то φ можно продолжить нулем на X и $0 \le \varphi \le \mathbb{1}_E f$
4. $f \ge 0$ измеримая, $A \subset B \Rightarrow \int\limits_A f d\mu \le \int\limits_B f d\mu$

   Доказательство:
   $\int\limits_A f d\mu = \int\limits_X \mathbb{1}_A f d\mu \le \int\limits_X \mathbb{1}_B f d\mu = \int\limits_B f d\mu$

Theorem 2.3. Теорема Леви (Беппо Леви)

$0 \le f_1 \le f_2 \le f_3 \le \dots$ измеримые и f_n поточечно сходится к f
Тогда $\lim \int\limits_E f_n d\mu = \int\limits_E f d\mu$

Доказательство:

$f_n \le f_{n+1} \Rightarrow \int\limits_E f_n d\mu \le \int\limits_E f_{n+1} d\mu \Rightarrow$ существует $\lim \int\limits_E f_n d\mu =: L \in [0, +\infty]$

$$f_n \le f \Rightarrow \underbrace{\int\limits_E f_n d\mu}_{\to L} \le \int\limits_E f d\mu \Rightarrow L \le \int\limits_E f d\mu$$

Нужно доказать обратное неравенство $L \ge \int\limits_E f d\mu = \sup\{\int\limits_E \varphi d\mu : 0 \le \varphi \le f,\ \varphi - \text{простая}\}$

Возьмем $0 \le \varphi \le f,\ \varphi$ – простая и докажем неравенство $L \ge \int\limits_E \varphi d\mu$

Возьмем $\Theta \in (0, 1)$ и докажем неравенство $L \ge \Theta \int\limits_E \varphi d\mu = \int\limits_E \Theta\varphi d\mu$

$\lim f_n(x) = f(x) \ge \varphi(x)$
$E_n := E\{f_n \ge \Theta\varphi\} \Rightarrow E_n \subset E_{n+1}$
$\bigcup\limits_{n=1}^{\infty} E_n = E$, берем $x \in E$. Если $\varphi(x) = 0$, то $x \in E_n\ \forall n$
Если $\varphi(x) > 0$, то $\Theta\varphi(x) < \varphi(x) \le f(x) = \lim f_n(x) \Rightarrow$ для больших n $f_n(x) > \Theta\varphi(x) \Rightarrow x \in E_n$ при больших n

Берем допустимое разбиение для φ. A_j – множества, a_j – значения

$$\underbrace{\int\limits_E f_n d\mu}_{\to L} \geq \int\limits_{E_n} f_n d\mu \geq \int\limits_{E_n} \Theta\varphi d\mu = \Theta \sum_{j=1}^{m} a_j \underbrace{\mu(A_j \cap E_n)}_{\to\mu(A_j\cap E)} \xrightarrow[n\to\infty]{} \Theta \sum_{j=1}^{m} a_j \mu(A_j \cap E) = \Theta \int\limits_E \varphi d\mu \Rightarrow$$

$$\Rightarrow L \geq \Theta \int\limits_E \varphi d\mu$$

Theorem 2.4. Продолжение свойств

5. Аддитивность интеграла. $f, g \geq 0$ измеримые $\Rightarrow \int\limits_E (f+g)d\mu = \int\limits_E f d\mu + \int\limits_E g d\mu$

   Доказательство:
   Возьмем последовательность простых $0 \leq \varphi_1 \leq \varphi_2 \leq \ldots$, т.ч. $\varphi_n \to f$ поточечно и $0 \leq \psi_1 \leq \psi_2 \leq \ldots$, т.ч. $\psi_n \to g$ поточечно
   $0 \leq \varphi_1 + \psi_1 \leq \varphi_2 + \psi_2 \leq \ldots$ и $\varphi_n + \psi_n \to f + g$
   $$\underbrace{\int\limits_E (\varphi_n + \psi_n) d\mu}_{\to\int\limits_E (f+g)d\mu} = \underbrace{\int\limits_E \varphi_n d\mu}_{\to\int\limits_E f d\mu} + \underbrace{\int\limits_E \psi_n d\mu}_{\to\int\limits_E g d\mu}$$

6. Однородность интеграла. $c \geq 0, f \geq 0$ измеримая $\Rightarrow \int\limits_E c f d\mu = c \int\limits_E f d\mu$

7. Аддитивность интеграла по множеству $E = A \sqcup B$. $f \geq 0$ измеримая $\Rightarrow$
   $\Rightarrow \int\limits_{A\sqcup B} f d\mu = \int\limits_A f d\mu + \int\limits_B f d\mu$

   Доказательство:
   $\mathbb{1}_A f + \mathbb{1}_B f = \mathbb{1}_{A\sqcup B} f \Rightarrow \int\limits_X \mathbb{1}_{A\sqcup B} f d\mu = \int\limits_X \mathbb{1}_A f d\mu + \int\limits_X \mathbb{1}_B f d\mu$

8. Если $f > 0$ измеримая и $\mu E > 0$, то $\int\limits_E f d\mu > 0$

   Доказательство:
   $E_n := E\{f > \frac{1}{n}\}$, $E_1 \subset E_2 \subset \ldots$ и $\bigcup\limits_{n=1}^{\infty} E_n = E \Rightarrow \lim \mu E_n = \mu E > 0 \Rightarrow$ Найдется n, для которого $\mu E_n > 0$
   $\int\limits_E f d\mu \geq \int\limits_{E_n} f d\mu \geq \int\limits_{E_n} \frac{1}{n} d\mu = \frac{1}{n}\mu E_n > 0$

Example 2.1.

$T = \{t_1, t_2, \ldots\}$; $w_1, w_2, \ldots \geq 0$
$\mu A := \sum\limits_{j: t_j \in A} w_j$. Поймем, что $\int\limits_E f d\mu = \sum\limits_{j: t_j \in E} f(t_j) w_j$

Пусть f простая, $f = \sum\limits_{j=1}^{m} a_j \mathbb{1}_{A_j}$

$$\int\limits_E f d\mu = \sum_{j=1}^{m} a_j \mu(A_j \cap E) = \sum_{j=1}^{m} a_j \sum_{i: t_i \in A_j \cap E} w_i = \sum_{j=1}^{m} \sum_{i: t_i \in A_j} \underbrace{a_j}_{f(t_i)} w_i = \sum_{i: t_i \in E} f(t_i) w_i$$

$$\geq: \quad \mathbb{1}_{\{t_1, t_2, \ldots, t_n\}} f \leq f \Rightarrow \underbrace{\int\limits_E \mathbb{1}_{\{t_1, t_2, \ldots, t_n\}} f d\mu}_{= \sum\limits_{i \leq n: t_i \in E} f(t_i) w_i \to \sum\limits_{i: t_i \in E} f(t_i) w_i} \leq \int\limits_E f d\mu$$

$\leq$: Если $\varphi \leq f$ – простая, то $\varphi(t_i) \leq f(t_i) \Rightarrow \underbrace{\sum\limits_{i: t_i \in E} \varphi(t_i) w_i}_{\int\limits_E \varphi d\mu} \leq \sum\limits_{i: t_i \in E} f(t_i) w_i$

Definition 2.3.

$f : E \to \overline{\mathbb{R}}$ измеримая. $\int\limits_E f d\mu := \int\limits_E f_+ d\mu - \int\limits_E f_- d\mu$, где $f_\pm := \max\{\pm f, 0\}$

Интеграл определен, если хотя бы один из $\int\limits_E f_\pm d\mu < +\infty$

Definition 2.4.

$P(x)$ верно почти везде на E, если найдется такое $e \subset E$ и $\mu e = 0$, т.ч. $P(x)$ верно $\forall x \in E \setminus e$

Remark 2.2.

Если каждое из свойств $P_1, P_2, \ldots$ выполняется почти везде на E, то они все одновременно выполняются почти везде на E

Theorem 2.5. Неравенство Чебышева

$f \geq 0$ измеримая; $p, t > 0$. Тогда $\mu E\{f \geq t\} \leq \frac{1}{t^p} \int\limits_E f^p d\mu$

Доказательство:

$$\int\limits_E f^p d\mu \geq \int\limits_{E\{f \geq t\}} f^p d\mu \geq \int\limits_{E\{f \geq t\}} t^p d\mu = t^p \mu E\{f \geq t\}$$

Theorem 2.6. Свойства интегралов связанные с понятием почти везде

1. Если $\int\limits_E |f|d\mu < +\infty$, то f почти везде конечна на E
   Доказательство:
   $\mu E\{|f| = +\infty\} \leq \mu E\{|f| \geq t\} \leq \frac{1}{t}\int\limits_E |f|d\mu \xrightarrow[t\to\infty]{} 0$
2. Если $\int\limits_E |f|d\mu = 0$, то $f = 0$ почти везде на E
   Доказательство:
   $\mu E\{|f| \geq \frac{1}{n}\} \leq n\int\limits_E |f|d\mu = 0 \Rightarrow \mu E\{|f| > 0\} = \mu(\bigcup\limits_{n=1}^{\infty} E\{|f| \geq \frac{1}{n}\}) = 0$
3. Если f – измерима, $A \subset B$ и $\mu(B \setminus A) = 0$, то $\int\limits_A f d\mu$ и $\int\limits_B f d\mu$ существуют или нет одновременно; а если существуют, то равны
   Доказательство:
   $\int\limits_B f_\pm d\mu = \underbrace{\int\limits_{B\setminus A} f_\pm d\mu}_{0} + \int\limits_A f_\pm d\mu = \int\limits_A f_\pm d\mu$
4. Если f и g измеримы и $f = g$ почти везде на E, то $\int_E f d\mu$ и $\int_E g d\mu$ существуют или нет одновременно; а если существуют, то равны
   Доказательство:
   Пусть $f = g$ на $E \setminus e$ и $\mu e = 0$
   $\int\limits_{E\setminus e} f_\pm d\mu = \int\limits_{E\setminus e} g_\pm d\mu \Rightarrow \int\limits_E f_\pm d\mu = \int\limits_E g_\pm d\mu$

2.2 §2. Суммируемые функции

Definition 2.5. Суммируемая функция

$f : E \to \overline{\mathbb{R}}$ измеримая. Если $\int\limits_E f_\pm d\mu < +\infty$, то f суммируемая на E функция

Theorem 2.7. Свойства

1. $f : E \to \overline{\mathbb{R}}$ измеримая. Тогда f – суммируема на $E \Leftrightarrow \int\limits_E |f| d\mu < +\infty$
2. Если f суммируема на E, то f почти везде конечна на E
3. Если $A \subset B$ и f суммируема на B, то f суммируема на A
4. Ограниченная измеримая функция суммируема на множестве конечной меры
5. Если f и g суммируемы на E и $f \le g$ на E, то $\int\limits_E f d\mu \le \int\limits_E g d\mu$
6. Аддитивность интеграла. Если f и g суммируема на E, то $f+g$ суммируема на E и $\int\limits_E (f+g) d\mu = \int\limits_E f d\mu + \int\limits_E g d\mu$
7. Однородность интеграла. Если f суммируема на E, $\alpha \in \mathbb{R}$, то αf суммируема на E и $\int\limits_E \alpha f d\mu = \alpha \int\limits_E f d\mu$
8. Линейность интеграла. Если f и g суммируемы; $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$, то $\alpha f + \beta g$ суммируема и $\int\limits_E (\alpha f + \beta g) d\mu = \alpha \int\limits_E f d\mu + \beta \int\limits_E g d\mu$
9. Аддитивность интеграла по множеству
   $E := \bigcup\limits_{k=1}^{n} E_k$ – измеримые, $f : E \to \overline{\mathbb{R}}$ измеримая
   Тогда f суммируема на $E \Leftrightarrow f$ суммируема на E_k $\forall k$
   А если $E = \bigsqcup\limits_{k=1}^{n} E_k$, то в случае суммируемости $\int\limits_E f d\mu = \sum\limits_{k=1}^{n} \int\limits_{E_k} f d\mu$
10. Интеграл по сумме мер
    μ_1 и μ_2 заданы на σ-алгебре $\mathcal{A}$, $\mu := \mu_1 + \mu_2$, f – измерима относительно $\mathcal{A}$. Тогда
    (a) Если $f \ge 0$, то $\int\limits_E f d\mu = \int\limits_E f d\mu_1 + \int\limits_E f d\mu_2$
    (b) Суммируемость f относительно $\mu \Leftrightarrow f$ суммируема относительно $\mu_1 + \mu_2$ и в случае суммируемости $\int\limits_E f d\mu = \int\limits_E f d\mu_1 + \int\limits_E f d\mu_2$

Доказательство:

1. $\Rightarrow$: $|f| = f_+ + f_- \Rightarrow \int\limits_E |f| d\mu = \int\limits_E f_+ d\mu + \int\limits_E f_- d\mu$
   $\Leftarrow$: $0 \le f_\pm \le |f| \Rightarrow 0 \le \int\limits_E f_\pm d\mu \le \int\limits_E |f| d\mu < +\infty$
3. $\int\limits_A |f| d\mu \le \int\limits_B |f| d\mu < +\infty$
5. $f \le g \Rightarrow f_+ \le g_+$ и $f_- \ge g_- \Rightarrow \int\limits_E f_+ d\mu \le \int\limits_E g_+ d\mu$ и $\int\limits_E f_- d\mu \ge \int\limits_E g_- d\mu$ и вычитаем
6. $|f+g| \le |f| + |g| \Rightarrow \int\limits_E |f+g| d\mu \le \underbrace{\int\limits_E |f| d\mu}_{<+\infty} + \underbrace{\int\limits_E |g| d\mu}_{<+\infty} \Rightarrow f+g$ – суммируема
   $h := f+g$; $h_+ - h_- = f_+ - f_- + g_+ - g_- \Rightarrow h_+ + f_- + g_- = h_- + f_+ + g_+$
   $\int\limits_E (h_+ + f_- + g_-) d\mu = \int\limits_E h_+ d\mu + \int\limits_E f_- d\mu + \int\limits_E g_- d\mu$

$\int\limits_E (h_- + f_+ + g_+)d\mu = \int\limits_E h_- d\mu + \int\limits_E f_+ d\mu + \int\limits_E g_+ d\mu$

7. $|\alpha f| = |\alpha||f| \Rightarrow |\alpha| \int\limits_E |f| d\mu < +\infty$

$\alpha > 0$: $\int\limits_E \alpha f d\mu = \alpha \int\limits_E f d\mu$, $(\alpha f)_\pm = \alpha f_\pm$ и вычитаем

$\alpha = -1$: $\int\limits_E (-f) d\mu = -\int\limits_E f d\mu$, $(-f)_\pm = f_\mp$ и вычитаем

9. $|f\mathbb{1}_E| \le |f\mathbb{1}_{E_1}| + \ldots + |f\mathbb{1}_{E_n}|$

$\int\limits_x \mathbb{1}_{E_x}|f|d\mu \le \int\limits_x \mathbb{1}_E|f|d\mu \le \int\limits_x \mathbb{1}_{E_1}|f|d\mu + \ldots + \int\limits_x \mathbb{1}_{E_n}|f|d\mu$

$\int\limits_{E_k} \le \int\limits_E |f|d\mu \le \int\limits_{E_1} |f|d\mu + \ldots + \int\limits_{E_n} |f|d\mu$

Если $E = \bigsqcup\limits_{k=1}^n E_k$, то $\mathbb{1}_E = \mathbb{1}_{E_1} + \ldots + \mathbb{1}_{E_n} \Rightarrow \int \mathbb{1}_E = f\mathbb{1}_{E_1} + \ldots + \int f\mathbb{1}_{E_n}$

10. (a) Пусть $f = \mathbb{1}_A$. $\int\limits_E f d\mu = \int\limits_E \mathbb{1}_A d\mu = \mu(E \cap A) = \mu_1(E\cap A) + \mu_2(E \cap A) = \int\limits_E \mathbb{1}_A d\mu_1 + \int\limits_E \mathbb{1}_A d\mu_2$

Пусть $f \ge 0$ простая. Это линейная комбинация характеристических $\Rightarrow$ верно по линейности

Пусть $f \ge 0$. Возьмем последовательность $0 \le \varphi_1 \le \varphi_2 \le \ldots$ простые, $\varphi_n \to f$

$\int\limits_E \varphi_n d\mu = \int\limits_E \varphi_n d\mu_1 + \int\limits_E \varphi_n d\mu_2 \xRightarrow{\text{Леви}} \int\limits_E f d\mu = \int\limits_E f d\mu_1 + \int\limits_E f d\mu_2$

(b) $\int\limits_E |f| d\mu = \int\limits_E |f| d\mu_1 + \int\limits_E |f| d\mu_2 \Rightarrow$ равносильность в суммировании

$\int\limits_E f_\pm d\mu = \int\limits_E f_\pm d\mu_1 + \int\limits_E f_\pm d\mu_2$ и вычитаем

Definition 2.6.

$f : E \to \mathbb{C}$, $\operatorname{Re} F$ и $\operatorname{Im} f$ – измеримые. $\int\limits_E f d\mu := \int\limits_E \operatorname{Re} f d\mu + i \int\limits_E \operatorname{Im} f d\mu$, если справа оба слагаемых конечны

Remark 2.3.

Если $\int\limits_E |f| d\mu < +\infty$, то все $\int$ конечны

Доказательство:

$|\operatorname{Re} f|$ и $|\operatorname{Im} f| \le |f| \le |\operatorname{Re} f| + |\operatorname{Im} f|$

Definition 2.7.

$f : E \to \mathbb{C}$ суммируема, если $\operatorname{Re} f$ и $\operatorname{Im} f$ измеримы и $\int\limits_E |f| d\mu < +\infty$

Remark 2.4.

Все свойства с равенствами сохраняются

Комплексная линейность тоже есть

$\int\limits_E (\alpha + i\beta) f d\mu = \int\limits_E \alpha f d\mu + \int\limits_E i\beta f d\mu = \alpha \int\limits_E f d\mu + \beta \int\limits_E i f d\mu$

$\int\limits_E i f d\mu \stackrel{?}{=} i \int\limits_E f d\mu$

$\int\limits_E (if) d\mu = \int\limits_E \operatorname{Re}(if) d\mu + i \int\limits_E \operatorname{Im}(if) d\mu = \int\limits_E -\operatorname{Im} f d\mu + i \int\limits_E \operatorname{Re} f d\mu = i \int\limits_E f d\mu$

Proposition 2.1.

$|\int\limits_E f d\mu| \le \int\limits_E |f| d\mu$, где $f : E \to \mathbb{C}$ суммируема

Доказательство:

$$|\int\limits_E f d\mu| = e^{i\alpha}\int\limits_E f d\mu = \int\limits_E e^{i\alpha} f d\mu = \int\limits_E \mathrm{Re}(e^{i\alpha} f) d\mu + i \underbrace{\int\limits_E \mathrm{Im}(e^{i\alpha} f) d\mu}_{0} = \int\limits_E \mathrm{Re}(e^{i\alpha} f) d\mu \le \int\limits_E \underbrace{|e^{i\alpha} f}_{|f|} d\mu$$

$$e^{-i\alpha} = \frac{\int\limits_E f d\mu}{|\int\limits_E f d\mu|}$$

Theorem 2.8. Счетная аддитивность интеграла

$f \ge 0$ измеримая, $E = \bigsqcup\limits_{n=1}^{\infty} E_n$ – измеримые. Тогда $\int\limits_E f d\mu = \sum\limits_{n=1}^{\infty} \int\limits_{E_n} f d\mu$

Доказательство:

$$S_n := \sum_{k=1}^{n} \int\limits_{E_k} f d\mu = \int\limits_{\bigsqcup\limits_{k=1}^{n} E_k} f d\mu = \int\limits_E (\mathbb{1}_{E_1} + \ldots + \mathbb{1}_{E_n}) f d\mu \xrightarrow{\text{Леви}} \mathbb{1}_{E_1} + \ldots + \mathbb{1}_{E_n} \nearrow \mathbb{1}_E \Rightarrow$$

$$\Rightarrow (\mathbb{1}_{E_1} + \ldots + \mathbb{1}_{E_n}) f \nearrow \mathbb{1}_E f \xrightarrow{\text{Леви}} \int\limits_E \mathbb{1}_E f d\mu = \int\limits_E f d\mu$$

Theorem 2.9. Следствия

1. $f \geq 0$ измеримая. $f : X \to \overline{\mathbb{R}}$. Тогда $\nu A := \int\limits_A f d\mu$ – мера
2. f – суммируема на $E = \bigsqcup\limits_{k=1}^{\infty} E_k$. Тогда $\int\limits_E f d\mu = \sum\limits_{k=1}^{\infty} \int\limits_{E_k} f d\mu$

   Доказательство:

   $\int\limits_E f_\pm d\mu = \sum\limits_{k=1}^{\infty} \int\limits_{E_k} f_\pm d\mu$
3. f – суммируема и $E_1 \subset E_2 \subset \ldots$ и $E := \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} E_n$ (или $E_1 \supset E_2 \supset \ldots$ и $E := \bigcap\limits_{n=1}^{\infty} E_n$)

   Тогда $\int\limits_E f d\mu = \lim\limits_{n\to\infty} \int\limits_{E_n} f d\mu$

   Доказательство:

   $\nu_\pm A := \int f_\pm d\mu$ – конечные меры $\Rightarrow \underbrace{\nu_\pm E_n}_{\int\limits_E f_\pm d\mu} = \lim\limits_{n\to\infty} \nu_\pm E_n = \lim\limits_{n\to\infty} \int\limits_{E_n} f_\pm d\mu$ и вычитаем
4. f – суммируема на E и $\varepsilon > 0$. Тогда существует $A \subset E$, т.ч. $\mu A < +\infty$ и $\int\limits_{E\setminus A} |f| d\mu < \varepsilon$

   Доказательство:

   $E_n := E\{|f| \geq \frac{1}{n}\},\ E_1 \subset E_2 \subset \ldots$ и $\bigcup\limits_{n=1}^{\infty} E_n = E\{|f| > 0\} = E \setminus E\{f = 0\}$

   $\int\limits_E |f| d\mu = \int\limits_{E\setminus E\{f=0\}} |f| d\mu = \lim\limits_{n\to\infty} \int\limits_{E_n} |f| d\mu$

   Возьмем такое n, что $\int\limits_{E_n} |f| d\mu > \int\limits_E |f| d\mu - \varepsilon \Rightarrow \int\limits_{E\setminus E_n} |f| d\mu < \varepsilon$

   $A := E_n,\ \mu A = \mu E\{|f| \geq \frac{1}{n}\} \leq n \int\limits_E |f| d\mu < +\infty$

Theorem 2.10. Абсолютная непрерывность интеграла

f – суммируема на E. Тогда $\forall \varepsilon > 0\ \exists \delta > 0\ \forall e \subset E\ \mu e < \delta \Rightarrow \int\limits_e |f| d\mu < \varepsilon$

Доказательство:

$+\infty > \int\limits_E |f| d\mu = \sup\{\int\limits_E \varphi d\mu : 0 \leq \varphi \leq |f|,\ \varphi \text{ – простая}\}$

Выберем такую простую $|f| \geq \varphi \geq 0$, что $\int\limits_E \varphi d\mu > \int\limits_E |\varphi| d\mu - \varepsilon \Rightarrow \varepsilon > \int\limits_E (|f| - \varphi) d\mu$

φ – простая $\Rightarrow$ ограниченная $\Rightarrow \varphi \leq M$

Возьмем $\delta := \frac{\varepsilon}{M}$. Если $\mu e < \delta$, то $\int\limits_e \varphi d\mu \leq \int\limits_e M d\mu = M\mu e < \varepsilon$

$\int\limits_e \underbrace{(|f| - \varphi)}_{\geq 0} d\mu \leq \int\limits_E (|f| - \varphi) d\mu < \varepsilon$

$\int\limits_e |f| d\mu = \underbrace{\int\limits_e \varphi d\mu}_{<\varepsilon} + \underbrace{\int\limits_e (|f| - \varphi) d\mu}_{<\varepsilon} < 2\varepsilon$

Theorem 2.11. Следствие

f – суммируема на E, $e_n \subset E$ и $\mu e_n \to 0 \Rightarrow \int\limits_{e_n} f d\mu \to 0$

Доказательство:

$|\int\limits_{e_n} f d\mu| \le \int\limits_{e_n} |f| d\mu \to 0$

Definition 2.8.

ν – мера на той же σ-алгебре, что и μ

Если существует такая $\omega \ge 0$ измеримая, что $\forall E$ – измеримого $\nu E = \int\limits_E \omega d\mu$

ω – плотность меры ν относительно меры μ

Theorem 2.12.

f, g – суммируема на X и $\int\limits_A f d\mu = \int\limits_A g d\mu$ $\forall A$ – измеримого. Тогда $f = g$ почти везде

Доказательство:

$A := X\{f \ge g\}$; $B := X\{f < g\}$

$\int\limits_X |f - g| d\mu = \int\limits_A + \int\limits_B = \underbrace{\int\limits_A (f - g) d\mu}_{0} + \underbrace{\int\limits_B (-f + g) d\mu}_{0} = 0 \Rightarrow f - g = 0$ почти везде

Theorem 2.13. Следствие

Пусть ω_1 и ω_2 – плотности ν относительно μ. Если ν – σ-конечная мера, то $\omega_1 = \omega_2$ почти везде

Доказательство:

Шаг 1. $\nu X < +\infty \Rightarrow \omega_1$ и ω_2 – суммируемы. $\int\limits_X \omega_1 d\mu$ и $\int\limits_X \omega_2 d\mu < +\infty$, т.к.
$\int\limits_A \omega_1 d\mu = \nu A = \int\limits_A \omega_2 d\mu \Rightarrow \omega_1 = \omega_2$ почти везде

Шаг 2. $X = \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} X_n$, $\nu X_n < +\infty \Rightarrow \omega_1 = \omega_2$ почти везде на X_n $\forall n \Rightarrow \omega_1 = \omega_2$ почти везде на X

Theorem 2.14.

$\omega \ge 0$ – полность меры ν относительно меры μ. Тогда

1. Если $f \ge 0$ измеримая, то $\int\limits_E f d\nu = \int\limits_E f \omega d\mu$
2. f – суммируема относительно $\nu \Leftarrow f\omega$ суммируема относительно μ и в этом случае $\int\limits_E f d\nu = \int\limits_E f \omega d\mu$

Доказательство:

1.

Шаг 1. $f = \mathbb{1}_A$, $\int\limits_E f d\nu = \int\limits_E \mathbb{1}_A d\nu = \int\limits_X \mathbb{1}_{E\cap A} d\nu = \nu(A \cap E) = \int\limits_{A\cap E} \omega d\mu = \int\limits_E \mathbb{1}_A \omega d\mu$

Шаг 2. По линейности верно для простых

Шаг 3. $f \geq 0$ измерима. Берем последовательность простых $0 \leq \varphi_1 \leq \varphi_2 \leq \dots$ и $\varphi_n \to f$

$$\underbrace{\int\limits_E \varphi_n d\nu}_{\to \int\limits_E f d\nu} = \underbrace{\int\limits_E \omega\varphi_n d\mu}_{\to \int\limits_E \omega f d\mu}$$

2. f – суммираема относительно $\nu \Leftrightarrow \underbrace{\int\limits_X |f| d\nu}_{\int\limits_X \omega|f|d\mu} < +\infty \Leftrightarrow \omega f$ – суммируема относительно μ

$$\int\limits_E f_\pm d\nu = \int\limits_E \underbrace{\omega f_\pm}_{(\omega f)_\pm} d\mu$$

Definition 2.9.

μ и ν – меры на одной σ-алгебре
Мера $\nu \prec \mu$ (абсолютно непрерывная) означает, что если $\mu E = 0$, то $\nu E = 0$

Remark 2.5.

Если ν имеет плотность относительно μ, то $\nu \prec \mu$

Доказательство:

$\nu E = \int\limits_E \omega d\mu = 0$, если $\mu E = 0$

Theorem 2.15. Теорема Радона-Никодима

μ и ν меры на одной σ-алгебре. μ – σ-конечная мера. Тогда
$\nu \prec \mu \Leftrightarrow \nu$ имеет плотность относительно μ

Exercise 2.1. Неравенство Юнга

Доказать, что $u, v \geq 0 \Rightarrow \frac{u^p}{p} + \frac{v^q}{q} \geq uv$

Theorem 2.16. Неравенство Гельдера

$p, q > 1$ и $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$. Тогда $\int\limits_E |fg| d\mu \leq (\int\limits_E |f|^p d\mu)^{\frac{1}{p}} (\int\limits_E |g|^q d\mu)^{\frac{1}{q}}$

Доказательство:

$A := (\int\limits_E |f|^p d\mu)^{\frac{1}{p}}$ и $B := (\int\limits_E |g|^q d\mu)^{\frac{1}{q}}$

$A, B = 0$: $\int\limits_E |f|^p d\mu = 0 \Rightarrow f = 0$ почти везде $\Rightarrow fg = 0$ почти везде $\Rightarrow \int\limits_E |fg| d\mu = 0$

$A, B = +\infty$: Очевидно т.к. $AB = +\infty$

$A, B \in \mathbb{R}^+$: $\frac{1}{p}(\frac{f(x)}{A})^p + \frac{1}{q}(\frac{g(x)}{B})^q \geq \frac{|f(x)g(x)|}{AB}$ – неравенство Юнга. Проинтегрируем

$$\underbrace{\frac{1}{p}\underbrace{\frac{1}{A^p}\int\limits_E |f|^p d\mu}_{1} + \frac{1}{q}\underbrace{\frac{1}{B^q}\int\limits_E |g|^q d\mu}_{1}}_{\frac{1}{p}+\frac{1}{q}=1} \geq \int\limits_E |fg| d\mu \frac{1}{AB} \Rightarrow \frac{1}{AB}\int\limits_E |fg|d\mu \leq 1 \Rightarrow \int\limits_E |fg|d\mu \leq AB$$

Theorem 2.17. Неравенство Минковского

$p \geq 1$. Тогда $(\int\limits_E |f|^p d\mu)^{\frac{1}{p}} + (\int\limits_E |g|^p d\mu)^{\frac{1}{p}} \geq (\int\limits_E |f+g|^p d\mu)^{\frac{1}{p}}$

Доказательство:

$|f+g| \leq |f| + |g| \Rightarrow$ достаточно проверить, что $f, g \geq 0$

$\underbrace{(\int\limits_E f^p d\mu)^{\frac{1}{p}}}_{=:A} + \underbrace{(\int\limits_E g^p d\mu)^{\frac{1}{p}}}_{=:B} \geq \underbrace{(\int\limits_E (f+g)^p d\mu)^{\frac{1}{p}}}_{=:C}$. Для $p = 1$ очевидно

Считаем, что $p > 1$, а также, что A и $B < +\infty$

$f + g \leq 2\max\{f, g\} \Rightarrow (f+g)^p \leq 2^p \max\{f^p, g^p\} \leq 2^p(f^p + g^p)$

$C^p = \int\limits_E (f+g)^p d\mu \leq 2^p(\int\limits_E f^p d\mu + \int\limits_E g^p d\mu) = 2^p(A^p + B^p) \Rightarrow C < +\infty$

Можно считать, что $C > 0$

$(f+p)^g = f(f+g)^{p-1} + g(f+g)^{p-1}$

$\int\limits_E f(f+g)^{p-1} d\mu \leq (\int\limits_E f^p d\mu)^{\frac{1}{p}}(\int\limits_E ((f+g)^{p-1})^q d\mu)^{\frac{1}{q}} = A(\int\limits_E (f+g)^p d\mu)^{\frac{1}{q}} = AC^{\frac{p}{q}}$ (при $q = \frac{p}{p-1}$)

$\int\limits_E g(f+g)^{p-1} d\mu \leq BC^{\frac{p}{q}}$

$\underbrace{\int\limits_E (f+g)^p d\mu}_{C^p} \leq AC^{\frac{p}{q}} + BC^{\frac{p}{q}}$ и делим на $C^{\frac{p}{q}} \Rightarrow C \leq A + B$

2.3 §3. Предельный переход под знаком интеграла

Theorem 2.18. Следствия из Леви

1. Если $f_n \geq 0$ измеримые, то $\int\limits_E \sum\limits_{n=1}^{\infty} f_n d\mu = \sum\limits_{n=1}^{\infty} \int\limits_E f_n d\mu$
2. Если $\sum\limits_{n=1}^{\infty} \int\limits_E |f_n| d\mu < +\infty$, то $\sum\limits_{n=1}^{\infty} f_n$ сходится почти везде на E

Доказательство:

1. $S_n := \sum\limits_{k=1}^{n} f_k$; $0 \leq S_1 \leq S_2 \leq \dots \xRightarrow{\text{Леви}} \underbrace{\lim \int\limits_E \sum\limits_{k=1}^{n} f_k d\mu}_{\lim \sum\limits_{k=1}^{n} \int\limits_E f_k d\mu = \sum\limits_{k=1}^{\infty} \int\limits_E f_k d\mu} = \int\limits_E \sum\limits_{k=1}^{\infty} f_k d\mu$
2. $\underbrace{\sum\limits_{k=1}^{\infty} \int\limits_E |f_k| d\mu}_{<+\infty} = \int\limits_E \underbrace{\sum\limits_{k=1}^{\infty} |f_k|}_{=:S} d\mu \Rightarrow S$ – почти везде конечно $\Rightarrow \sum\limits_{k=1}^{\infty} |f_k|$ – сходится почти везде $\Rightarrow \sum\limits_{k=1}^{\infty} f_k$ сходится почти везде

Lemma 2.2. Лемма Фату

$f_n \geq 0$ измеримые $\Rightarrow \int\limits_E \underline{\lim} f_n d\mu \leq \underline{\lim} \int\limits_E f_n d\mu$

Доказательство:

$\underline{\lim} f_n = \lim \underbrace{\inf_{k \geq n} f_k}_{=: g_n} \Rightarrow f_n \geq g_n \Rightarrow \int\limits_E f_n d\mu \geq \int\limits_E g_n d\mu \Rightarrow \underline{\lim} \int\limits_E f_n d\mu \geq \underline{\lim} \int\limits_E g_n d\mu$

$0 \leq g_1 \leq g_2 \leq \dots \xRightarrow{\text{Леви}} \lim \int\limits_E g_n d\mu = \int\limits_E \lim g_n d\mu = \int\limits_E \underline{\lim} f_n d\mu$

Exercise 2.2.

Придумать пример, когда будет строгий знак

Theorem 2.19. Усиленный вариант теоремы Леви

$f_n \geq 0$ измеримые, $f = \lim f_n$ и $f_n \leq f$ почти везде
Тогда $\lim \int\limits_E f_n d\mu = \int\limits_E f d\mu$

Доказательство:

$\int\limits_E f d\mu = \int\limits_E \underline{\lim} f_n d\mu \overset{\text{Фату}}{\leq} \underline{\lim} \int\limits_E f_n d\mu \leq \overline{\lim} \int\limits_E f_n d\mu \leq \int\limits_E f d\mu$, так как

$f_n \leq f \Rightarrow \int\limits_E f_n d\mu \leq \int\limits_E f d\mu \Rightarrow \overline{\lim} \int\limits_E f_n d\mu \leq \int\limits_E f d\mu$

Theorem 2.20. Теорема Лебега о предельном переходе (о мажорируемой сходимости)

$f_n : E \to \overline{\mathbb{R}}$ измеримые, $f = \lim f_n$ почти везде, $|f_n| \le F$ почти везде и F – суммируема на E

Тогда $\lim \int\limits_E f_n d\mu = \int\limits_E f d\mu$. Более того $\int\limits_E |f_n - f| d\mu \xrightarrow[n\to\infty]{} 0$

Доказательство:

$h_n := 2F - |f_n - f| \le 2F$, $h_n \to 2F$ почти везде

$|f_n| \le F$ почти везде $\Rightarrow |f| \le F$ почти везде $\Rightarrow |f_n - f| \le |f_n| + |f| \le 2F$ почти везде $\Rightarrow h_n \ge 0$ почти везде

Тогда по усиленной теореме Леви $\lim \int\limits_E h_n d\mu = \int\limits_E 2F d\mu$

$$\underbrace{\int\limits_E h_n d\mu}_{\to \int\limits_E 2F d\mu} = \int\limits_E 2F d\mu - \int\limits_E |f_n - f| d\mu \Rightarrow \underbrace{\int\limits_E |f_n - f| d\mu}_{\ge |\int\limits_E f_n d\mu - \int\limits_E f d\mu|} \to 0$$

Remark 2.6.

1. Суммируемость F по делу
   $E := [0,1],\ \mu = \lambda_1,\ f_n = n\mathbb{1}_{(0,\frac{1}{n}]} \to 0$ поточечно
   $\int\limits_{[0,1]} f_n d\lambda_1 = 1 \not\to 0$
2. Вместо $f_n \to f$ почти везде можно написать сходимость по мере

Theorem 2.21.

$f \in C[a,b]$. Тогда $\int\limits_{[a,b]} f d\lambda_1 = \int\limits_a^b f(x)dx$

Доказательство:

Рассмотрим дробление отрезка $[a,b] : a = x_0 < x_1 < \ldots < x_n = b$

$$S^* := \sum_{k=1}^{n} (x_k - x_{k-1}) \max_{t\in[x_{k-1},x_k]} f(t) \xrightarrow[|\tau|\to 0]{} \int\limits_a^b f(x)dx =: I$$

$$S_* := \sum_{k=1}^{n} (x_k - x_{k-1}) \min_{t\in[x_{k-1},x_k]} f(t) \xrightarrow[|\tau|\to 0]{} I$$

$g^*(x) = \max\limits_{t\in[x_{k-1},x_k]} f(t)$ при $x_{k-1} \le x < x_k \Rightarrow \int\limits_{[a,b]} g^* d\lambda_1 = S^*$

$g_*(x) = \min\limits_{t\in[x_{k-1},x_k]} f(t)$ при $x_{k-1} \le x < x_k \Rightarrow \int\limits_{[a,b]} g_* d\lambda_1 = S_*$

$$g_*(x) \le f(x) \le g^*(x) \Rightarrow \underbrace{\int\limits_{[a,b]} g_*(x) d\lambda_1}_{S_*\to I} \le \int\limits_{[a,b]} f d\lambda_1 \le \underbrace{\int\limits_{[a,b]} g^* d\lambda_1}_{S^*\to I} \Rightarrow I = \int\limits_{[a,b]} f d\lambda_1$$

Theorem 2.22.

$f : [a,b] \to \mathbb{R}$ интегрируема по Риману $\Rightarrow \int\limits_{[a,b]} f d\lambda_1 = \int\limits_a^b f(x)dx$

Theorem 2.23. Критерий Лебега интегрируемости по Риману

$f : [a,b] \to \mathbb{R}$ ограниченная. Тогда
f интегрируема по Риману на $[a,b] \Leftrightarrow$ множество точек разрыва f имеет нулевую меру Лебега

2.4 §4. Произведение мер

Definition 2.10.

$(X, \mathcal{A}, \mu)$ и $(Y, \mathcal{B}, \nu)$ – пространства с σ-конечными мерами
$\mathcal{P} := \{A \times B : \mu A < +\infty \text{ и } \nu B < +\infty\}$
Множества из $\mathcal{P}$ назовем измеримыми прямоугольниками
$m_0(A \times B) := \mu A \cdot \nu B$

Theorem 2.24.

$\mathcal{P}$ – полукольцо, m_0 – мера на $\mathcal{P}$ и m_0 – σ-конечна

Доказательство:

$\{A \in \mathcal{A} : \mu A < +\infty\}$ и $\{B \in \mathcal{B} : \nu B < +\infty\}$ – полукольца

$\mathcal{P}$ – их декартово произведение $\Rightarrow$ полукольцо

$A \times B = \bigsqcup\limits_{n=1}^{\infty} A_n \times B_n;\ \mathbb{1}_{A\times B}(x,y) = \sum\limits_{n=1}^{\infty} \mathbb{1}_{A_n \times B_n}(x,y)$

$$\underbrace{\int\limits_X \underbrace{\mathbb{1}_{A\times B}(x,y)}_{\mathbb{1}_A(x)\cdot\mathbb{1}_B(y)} d\mu(x)}_{\mathbb{1}_B(y)\int\limits_X \mathbb{1}_A(x)d\mu(x) = \mu A\cdot\mathbb{1}_B(y)} = \int\limits_X \sum_{n=1}^{\infty} \mathbb{1}_{A_n\times B_n}(x,y)d\mu(x) = \sum_{n=1}^{\infty}\int\limits_X \mathbb{1}_{A_n\times B_n}(x,y)d\mu(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \mu A_n \cdot \mathbb{1}_{B_n}(y)$$

$$\underbrace{\int\limits_Y \mu A\cdot\mathbb{1}_B(y)d\nu}_{\mu A\cdot\nu B = m_0(A\times B)} = \int\limits_Y \sum_{n=1}^{\infty} \mu A_n\cdot\mathbb{1}_{B_n}(y)d\nu = \sum_{n=1}^{\infty}\mu A_n\cdot\int\limits_Y \mathbb{1}_{B_n}d\nu = \int\limits_{n=1}^{\infty} \mu A_n\cdot\nu B_n = \sum_{n=1}^{\infty} m_0(A_n\times B_n) \Rightarrow$$

$\Rightarrow m_0$ – мера

Definition 2.11. Произведение мер

$(X, \mathcal{A}, \mu)$ и $(Y, \mathcal{B}, \nu)$ – пространства с σ-конечными мерами
Произведением мер $\mu \times \nu$ – стандартное продолжение m_0
σ-алгебра, на которую продолжили обозначим $\mathcal{A} \otimes \mathcal{B}$
$(X \times Y, \mathcal{A} \otimes \mathcal{B}, \mu \times \nu)$

Theorem 2.25. Свойства

1. Декартово произведение измеримых множеств – измеримо
   Доказательство:
   $A = \bigcup A_n,\ \mu A_n < +\infty$ и $B = \bigcup B_n,\ \nu B_n < +\infty \Rightarrow A \times B = \bigcup\limits_{k,n=1}^{\infty} A_k \times B_n$ и
   $\mu_0(\underbrace{A_k \times B_n}_{\in\mathcal{P}}) < +\infty$
2. Если $\mu e = 0$, то $(\mu \times \nu)(e \times Y) = 0$
   Доказательство:
   $Y = \bigcup Y_n,\ \nu Y_n < +\infty \Rightarrow (\mu \times \nu)(e \times Y_n) = \mu e \cdot \nu Y_n = 0$

Definition 2.12. Сечение

$C \subset X \times Y$
$x \in X$. Сечение $C_x := \{y \in Y : (x, y) \in C\}$
$y \in Y$. Сечение $C^y := \{x \in X : (x, y) \in C\}$

Theorem 2.26. Свойства

1. $(\bigcup C_n)_x = \bigcup (C_n)_x$
2. $(\bigcap C_n)_x = \bigcap (C_n)_x$

Definition 2.13.

E – измеримое множество и f определена почти везде на E
f измерима в широком смысле, если найдется $e \subset E$, т.ч. $\mu e = 0$ и $f\mid_{E \setminus e}$ измерима

Definition 2.14.

$\mathcal{E}$ – семейство подмножеств Z

$\mathcal{E}$ – монотонный класс, если $\forall E_n \in \mathcal{E} : E_1 \subset E_2 \subset \ldots \Rightarrow \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} E_n \in \mathcal{E}$

Аналогично $\forall E_n \in \mathcal{E} : E_1 \supset E_2 \supset \ldots \Rightarrow \bigcap\limits_{n=1}^{\infty} E_n \in \mathcal{E}$

Theorem 2.27.

Если $\mathcal{E}$ – монотонный класс и $\mathcal{E} \supset \mathcal{A}$ – алгебра $\Rightarrow \mathcal{E} \supset \mathcal{B}(\mathcal{A})$

Theorem 2.28. Принцип Кавальери

$(X, \mathcal{A}, \mu)$ и $(Y, \mathcal{B}, \nu)$ – пространства с σ-конечными мерами, ν – полная мера
$m := \mu \times \nu$, $C \in \mathcal{A} \otimes \mathcal{B}$. Тогда

1. $C_x \in \mathcal{B}$ при почти всех $x \in X$
2. $\varphi(x) := \nu C_x$ измерима в широком смысле
3. $mC = \int\limits_X \varphi d\mu$

Доказательство:

$\mathcal{P}$ – полукольцо измеримых прямоугольников

Шаг 1. μ и ν – конечные меры, $C \in \mathcal{B}(\mathcal{P})$. Проверим 1 и 2
$\mathcal{E}$ – система подмножеств $X \times Y$, т.ч. $E_x \in \mathcal{B}\ \forall x \in X$ и $\varphi(x) := \nu C_x$ – измеримая функция

(a) $A \in \mathcal{A}, B \in \mathcal{B} \Rightarrow A \times B \in \mathcal{E}$. $(A \times B)_X = \begin{cases} \varnothing & x \notin A \\ B & X \in A \end{cases}$
$\varphi(x) = \nu(A \times B)_x = \nu B \cdot \mathbb{1}_A$ – измеримая функция

(b) $\mathcal{E}$ – симметричная система. $E \in \mathcal{E} \overset{?}{\Rightarrow} X \times Y \setminus E \in \mathcal{E}$
$(X \times Y \setminus E)_x = Y \setminus E_x \in \mathcal{B}$
$x \mapsto \nu(X \times Y \setminus E)_x = \nu(Y \setminus E_x) = \nu Y - \nu E_x = \nu Y - \varphi(x)$ – измеримая функция

(c) $E_n \in \mathcal{E}$ и $E_1 \supset E_2 \subset \ldots \overset{?}{\Rightarrow} \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} E_n \in \mathcal{E}$

$(E_1)_x \subset (E_2)_x \subset \ldots$ и $(\bigcup\limits_{n=1}^{\infty} E_n)_x = \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} (E_n)_x \in \mathcal{B}$

$\nu(\bigcup E_n)_x = \lim\limits_{n\to\infty} \nu(E_n)_x$ – измерима, т.к. предел измерим

(d) $E_n \in \mathcal{E}$ и $E_1 \supset E_2 \supset \ldots \Rightarrow \bigcap E_n \in \mathcal{E}$, т.к. $\mathcal{E}$ – симметричная система

(e) $\mathcal{E}$ – монотонный класс

(f) Если $E \cap F = \varnothing$ и $E, F \in \mathcal{E} \overset{?}{\Rightarrow} E \sqcup F \in \mathcal{E}$

$(E \sqcup F)_x = E_x \sqcup F_x$ – измеримое

$\nu(E \sqcup F)_x = \nu E_x + \nu F_x$ – сумма измеримых функций

(g) a + f $\Rightarrow \mathcal{E}$ содержит кольцо, составленное из конечных объединений элементов $\mathcal{P}$

(h) g + b $\Rightarrow \mathcal{E}$ содержит алгебру, натянутую на $\mathcal{P}$

(i) По теореме о монотонном классе $E \supset \mathcal{B}(\mathcal{P})$

Шаг 2. μ и ν – конечные меры. $C \in \mathcal{B}(\mathcal{P})$. Проверим 3

$\varphi \geq 0$ измерима $\Rightarrow \tilde{m}E := \int\limits_X \nu E_x d\mu$, где $E \in \mathcal{B}(\mathcal{P})$

$\tilde{m}$ – мера на $\mathcal{B}(\mathcal{P})$. $E = \bigsqcup\limits_{n=1}^{\infty} E_n \Rightarrow E_x = \bigsqcup\limits_{n=1}^{\infty} (E_n)_x \Rightarrow \nu E_x = \sum\limits_{n=1}^{\infty} \nu(E_n)_x$

$\tilde{m}E = \int\limits_X \sum\limits_{n=1}^{\infty} \nu(E_n)_x d\mu = \sum\limits_{n=1}^{\infty} \int\limits_X \nu(E_n)_x d\mu = \sum\limits_{n=1}^{\infty} \tilde{m}E_n$

На полукольце $\tilde{m}$ и m совпадают

$\tilde{m}(A \times B) = \int\limits_X \nu B \cdot \mathbb{1}_A(x) d\mu(x) = \nu B \cdot \mu A = m(A \times B) \Rightarrow \tilde{m} = m$ по единственности продолжения

Шаг 3. μ и ν конечные меры, $C \in \mathcal{A} \otimes \mathcal{B}$ и $mC = 0$. Проверим 1, 2 и 3

Тогда существует $\tilde{C} \in \mathcal{B}(\mathcal{P})$, т.ч. $C \subset \tilde{C}$ и $m\tilde{C} = 0$

$\underbrace{m\tilde{C}}_{0} = \int\limits_X \nu \tilde{C}_x d\mu \Rightarrow \nu \tilde{C}_x = 0$ при почти всех x, но $C_x \subset \tilde{C}_x \Rightarrow$

$\Rightarrow \nu C_x = 0$ при почти всех x и в частности C_x измерима при почти всех x. Это 1

Второй пункт очевидный

Третий: $mC = 0 = \int\limits_X \nu C_x d\mu$, т.к. $\nu C_x = 0$ почти везде

Шаг 4. μ и ν – конечные меры, $C \in \mathcal{A} \otimes \mathcal{B}$. Проверим 1, 2 и 3

Найдется $\tilde{C} \in \mathcal{B}(\mathcal{P})$ и $e \in \mathcal{A} \otimes \mathcal{B}$, т.ч. $me = 0$ и $C = \tilde{C} \sqcup e$

$C_x = \underbrace{\tilde{C}_x}_{\in \mathcal{B}} \sqcup \underbrace{e_x}_{\in \mathcal{B} \text{ при п.в. } x}$

$\nu C_x = \nu \tilde{C}_x + 0$ почти везде

$mC = m\tilde{C} = \int\limits_X \nu \tilde{C}_x d\mu = \int\limits_X \nu C_x d\mu$

Шаг 5. μ и ν – σ-конечные меры. $X = \bigsqcup\limits_{k=1}^{\infty} X_k;\ Y = \bigsqcup\limits_{n=1}^{\infty} Y_n;\ \mu X_k < +\infty$ и $\nu Y_n < +\infty$

$C \in \mathcal{A} \otimes \mathcal{B} \Rightarrow C = \bigsqcup\limits_{k,n} C_{kn}$, где $C_{kn} = C \cap X_k \times Y_n$

$(C_{kn})_x \in \mathcal{B}$ при почти всех x, $x \mapsto \nu(C_{kn})_x$ измерима в широком смысле и

$mC_{kn} = \int\limits_X \nu(C_{kn})_x d\mu$

$\nu C_x = \sum\limits_{n=1}^{\infty} \nu(C_{kn})_x$ при $x \in X_k$

Definition 2.15. График функции

$f : E \to \overline{\mathbb{R}}$. График функции $\Gamma_f := \{(x, y) : x \in E, y \in \mathbb{R}, y = f(x)\}$

Remark 2.7.

$\Gamma_f \subset E \times \mathbb{R}$

Definition 2.16. Подграфик функции

$f : E \to \overline{\mathbb{R}}$, $f \geq 0$. Подграфик функции $\mathcal{P}_f := \{(x, y) : x \in E, y \in \mathbb{R}, 0 \leq y \leq f(x)\}$

Remark 2.8.

$P_f \subset E \times \mathbb{R}$

Lemma 2.3.

μ – σ-конечная мера, f – измерима, $m = \mu \times \lambda_1$. Тогда $m\Gamma_f = 0$

Доказательство:

$\mu E < +\infty$: Хотим проверить, что $m\Gamma_f(E) = 0$

Возьмем $\varepsilon > 0$. Рассмотрим $E_n := E\{n\varepsilon \leq f < (n+1)\varepsilon\}$

$\Gamma_F(E) \subset \bigcup\limits_{n \in \mathbb{Z}} E_n \times [n\varepsilon, (n+1)\varepsilon]$

$m(\bigcup\limits_{n \in \mathbb{Z}} E_n \times [n\varepsilon, (n+1)\varepsilon]) \leq \sum\limits_{n \in \mathbb{Z}} m(E_n \times [\varepsilon n, \varepsilon(n+1)]) = \sum\limits_{n \in \mathbb{Z}} \mu E_n \cdot \varepsilon = \mu E \varepsilon \Rightarrow m\Gamma_f(E) = 0$

$\mu E = +\infty$: $E = \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} A_n$, т.ч. $\mu A_n < +\infty \Rightarrow \Gamma_f(E) = \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} \Gamma_f(A_n)$

Lemma 2.4.

$f \geq 0$ измеримая в широком смысле $\Rightarrow \mathcal{P}_f$ измерим относительно $m = \mu \times \lambda_1$

Доказательство:

Шаг 1. Если f – простая функция; $A_1, \ldots, A_n$ – допустимое разбиение; $a_1, \ldots, a_n$ – значения

$\mathcal{P}_f = \bigsqcup\limits_{k=1}^{n} A_k \times [0, a_k]$ – измеримо относительно m

Шаг 2. $f \geq 0$ измеримая. Берем $0 \leq \varphi_1 \leq \varphi_2 \leq \ldots$ последовательность простых, т.ч. $\varphi_n \to f$

$\varphi_n \leq f$; $\mathcal{P}_{\varphi_n} \subset \mathcal{P}_f$ и $\mathcal{P}_{\varphi_1} \subset \mathcal{P}_{\varphi_2} \subset \ldots$

$\mathcal{P}_f \setminus \Gamma_f \overset{?}{\subset} \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} \mathcal{P}_{\varphi_n} \subset \mathcal{P}_f$

Возьмем $x \in E$

Если $f(x) = +\infty$, то $\varphi_n(x) \to +\infty$. $(\bigcup\limits_{n=1}^{\infty} \mathcal{P}_{\varphi_n})_x = [0, +\infty)$

Если $f(x) < +\infty$, то $\varphi_n(x) \to f(x)$. $(\bigcup\limits_{n=1}^{\infty} \mathcal{P}_{\varphi_n})_x = [0, f(x))$ или $[0, f(x)]$

$\bigcup\limits_{n=1}^{\infty} \mathcal{P}_{\varphi_n} \subset \mathcal{P}_f \subset \Gamma_f \cup \bigcup\limits_{n=1}^{\infty} \mathcal{P}_{\varphi_n}$

Theorem 2.29. Теорема о мере подграфика

$(X, \mathcal{A}, \mu)$ – пространство с σ-конечной мерой, $m = \mu \times \lambda_1$, $f \geq 0 : E \to \overline{\mathbb{R}}$, E – измеримое
f измерима в широком смысле $\Leftrightarrow \mathcal{P}_f(E)$ – измерима
И в этом случае $m\mathcal{P}_f(E) = \int\limits_E f d\mu$

Доказательство:

$\Rightarrow$: Лемма

$\Leftarrow$: Подставим $\mathcal{P}_f(E)$ в принцип Кавальери. $\nu = \lambda_1$

$$x \in E,\ (\mathcal{P}_f(E))_x = \begin{cases} [0, +\infty) & f(x) = +\infty \\ [0, f(x)] & f(x) < +\infty \end{cases}$$

$\lambda_1(\mathcal{P}_f(E))_x = f(x) \Rightarrow f$ измерима в широком смысле

$m\mathcal{P}_f(E) = \int\limits_X \lambda_1(\mathcal{P}_f(E))_x d\mu = \int\limits_E f d\mu$