

## Меры и меры по борьбе с ними

Лектор: А. А. Лодкин

Записал :taxus

4 июня 2017 г.

А эти множества?  
 Какой для них язык?.. Горé душа летит,  
 Все необъятное в единый вздох  
 теснится,  
 И лишь молчание понятно говорит.

---

Студент на экзамене по теории меры

# Оглавление

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Теория меры и интегралы по мере</b>   | <b>3</b>  |
| № 1      | Системы множеств . . . . .   | 3         |
| № 2      | Борелевская сигма-алгебра . . . . .  | 3         |
| № 3      | Мера . . . . .   | 4         |
| № 4      | Свойства меры . . . . .  | 4         |
| № 5      | Объём в $\mathbb{R}^n$ . Мера Лебега . . . . .   | 5         |
| № 6      | Измеримые функции . . . . .  | 6         |
| № 7      | Интеграл по мере . . . . .   | 7         |
| № 8      | Теорема Беппо Лёви . . . . .   | 7         |
| № 9      | Свойства интеграла от суммируемых функций . . . . .  | 7         |
| № 10     | Счётная аддитивность интеграла . . . . .   | 8         |
| № 11     | Абсолютная непрерывность интеграла . . . . .   | 8         |
| № 12     | Интеграл от непрерывной функции по мере Лебега . . . . .   | 8         |
| № 13     | Сравнение подходов Римана и Лебега . . . . .   | 8         |
| № 14     | Сравнение несобственного интеграла и интеграла Лебега . . . . .  | 9         |
| № 15     | Интеграл по дискретной мере и мере, задаваемой плотностью . . . . .  | 9         |
| № 16     | Мера Лебега-Стилтьеса. Интеграл по распределению . . . . .   | 9         |
| № 17     | Интеграл Эйлера-Пуассона . . . . .   | 10        |
| № 18     | Вероятностный смысл меры . . . . .   | 10        |
| № 19     | Геометрический смысл меры Лебега. Принцип Кавальери . . . . .  | 10        |
| № 20     | Сведение кратного интеграла к повторному . . . . .   | 11        |
| № 21     | Мера Лебега и аффинные преобразования . . . . .  | 11        |
| № 22     | Мера образа при гладком отображении . . . . .  | 11        |
| № 23     | Гладкая замена переменной в интеграле . . . . .  | 11        |
| № 24     | Предельный переход под знаком интеграла . . . . .  | 11        |
| № 25     | Теорема Лебега об ограниченной сходимости . . . . .  | 12        |
| № 26     | Равномерная сходимость несобственного параметрического интеграла. При-<br>знаки . . . . .                      | 13        |
| № 27     | Несобственные интегралы с параметром и операции анализа над пара-<br>метром $\langle \times \rangle$ . . . . . | 13        |
| № 28     | $\Gamma$ -функция Эйлера . . . . .   | 14        |
| № 29     | $B$ -функция . . . . .   | 14        |
| № 30     | Объём $n$ -мерного шара . . . . .  | 14        |
| <b>2</b> | <b>Дифференциальная геометрия <math>\langle \times \rangle</math></b>  | <b>15</b> |
| № 31     | Регулярная кривая и её естественная параметризация . . . . .   | 15        |
| № 32     | Кривизна кривой . . . . .  | 15        |
| № 33     | Кручение и нормаль . . . . .   | 15        |
| № 34     | Формулы Френе . . . . .  | 16        |
| № 35     | Регулярная поверхность. Касательная плоскость. Первая квадратичная<br>форма . . . . .                          | 16        |
| № 36     | Вычисление длин и площадей на поверхности . . . . .  | 16        |
| № 37     | Вторая квадратичная форма . . . . .  | 17        |
| № 38     | Нормальная кривизна в данном направлении. Главные кривизны . . . . .   | 17        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| № 39     | Гауссова кривизна поверхности. Теорема Гаусса . . . . .               | 17        |
| № 40     | Геометрическая кривизна. Теорема Гаусса-Бонне. . . . .                | 18        |
| № 41     | Ориентация кривой и поверхности . . . . .                             | 18        |
| № 42     | Интеграл второго рода . . . . .                                       | 19        |
| № 43     | Дифференцирование векторных полей . . . . .                           | 21        |
| № 44     | Формула Грина . . . . .   | 21        |
| № 45     | Классическая формула Стокса . . . . .                                 | 21        |
| № 46     | Формула Гаусса-Остроградского . . . . .                               | 21        |
| № 47     | Физический смысл дивергенции и ротора . . . . .                       | 21        |
| <b>3</b> | <b>Анализ Фурье <math>\langle \times \rangle</math></b>               | <b>22</b> |
| № 50     | Гильбертово пространство. $\mathcal{L}_2$ . . . . .                   | 22        |
| № 51     | Ортогональные системы. Ряд Фурье в гильбертовом пространстве. . . . . | 22        |
| № 52     | Тригонометрические системы . . . . .                                  | 23        |
| № 53     | Ядро Дирихле. Лемма Римана-Лебега . . . . .                           | 23        |
| № 54     | Теорема Дини о поточечной сходимости . . . . .                        | 24        |
| № 55     | Свойства коэффициентов Фурье . . . . .                                | 24        |
| № 56     | Сходимость рядов Фурье.. . . .  | 24        |
| № 57     | Преобразование Фурье . . . . .  | 25        |
| № 58     | Решение уравнения теплопроводности . . . . .                          | 25        |
| <b>A</b> | <b>Обозначения</b>  | <b>26</b> |

# Глава 1: Теория меры и интегралы по мере

## Билет № 1: Системы множеств

**Определение 1.** Пусть здесь (и дальше)  $X$  — произвольное множество. Тогда  $\mathcal{P}(X) \equiv 2^X$  — множество всех подмножеств  $X$ .

**Е.г.**  $X = \{1 \dots n\} \Rightarrow \#\mathcal{P}(X) = 2^n$  (это количество элементов, если что)

**Определение 2** (Алгебра). Пусть  $\mathcal{A} \subset \mathcal{P}(X)$ . Тогда  $\mathcal{A}$  — алгебра множеств, если

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

*Замечание.* Заметим, что в алгебре пересечение (или объединение) *конечного* числа её элементов лежит в алгебре. Это можно доказать простой индукцией. А вот для бесконечных объединений пользоваться индукцией уже нельзя, ведь  $\infty \notin \mathbb{N}$ .

**Определение 3** ( $\sigma$ -алгебра). Пусть  $\mathcal{A} \subset \mathcal{P}(X)$ . Тогда  $\mathcal{A}$  —  $\sigma$ -алгебра, если

1.  $\mathcal{A}$  — алгебра
2.  $A_1, \dots, A_n \in \mathcal{A} \Rightarrow \bigcup_{k=1}^{\infty} A_k \in \mathcal{A}, \bigcap_{k=1}^{\infty} A_k \in \mathcal{A}$

**Определение 4.** Пусть  $\mathcal{E} \subset \mathcal{P}(X)$ . Тогда

$$\sigma(\mathcal{E}) := \bigcap \{ \mathcal{A} \mid \mathcal{A} \text{ — } \sigma\text{-алгебра, } \mathcal{A} \supset \mathcal{E} \}$$

эта конструкция — сигма-алгебра, просто аксиомы проверить.

## Билет № 2: Борелевская сигма-алгебра

**Определение 1.** Пусть  $\mathcal{O}$  — все открытые множества в  $\mathbb{R}^n$ . Тогда  $\mathcal{B}_n = \sigma(\mathcal{O})$  — борелевская  $\sigma$ -алгебра в  $\mathbb{R}^n$ .

**Определение 2** (Ячейка в  $\mathbb{R}^n$ ). Обозначать её будем  $\Delta^n$ , по размерности соответствующего пространства.

$$\Delta^1 = \begin{cases} [a; b) \\ (-\infty; b) \\ [a; +\infty) \\ (-\infty; +\infty) \end{cases} \quad \forall n \quad \Delta = \prod_{k=1}^n \Delta_k^1$$

Ещё введём алгебру  $\mathcal{A} = \text{Cell}_n = \{A \mid A = \bigcup_{k=1}^p \Delta_k\}$

**Лемма 1.** Пусть  $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2 \subset \mathcal{P}(X)$ ,  $\sigma(\mathcal{E}_1) \supset \mathcal{E}_2$ . Тогда  $\sigma(\mathcal{E}_1) \supset \sigma(\mathcal{E}_2)$

**Теорема 2.**  $\mathcal{B}_n = \sigma(\text{Cell}_n)$ .

**Пример 1.** Все множества ниже — борелевские.

$\langle 1 \rangle \quad \mathcal{O}$ .

$\langle 2 \rangle \quad \mathcal{F} = \{A \mid \bar{A} \in \mathcal{O}\}$ .

$\langle 3 \rangle \quad \left( A = \bigcap_{\substack{k=1 \\ G_k \in \mathcal{O}}}^{\infty} G_k \right) \in G_{\delta}$ .

$$\langle 4 \rangle \left( B = \bigcup_{\substack{k=1 \\ F_k \in \mathcal{F}}}^{\infty} F_k \right) \in F_{\sigma}.$$

$$\langle 5 \rangle \left( C = \bigcup_{\substack{k=1 \\ A_k \in G_{\delta}}}^{\infty} A_k \right) \in G_{\delta\sigma}.$$

У всех этих множеств со сложными индексами  $\delta$  — пересечение,  $\sigma$  — объединение,  $G$  — операция над открытыми в самом начале,  $F$  — над замкнутыми.

### Билет № 3: Мера

**Определение 1.** Пусть задано  $X$ ,  $\mathcal{A} \subset \mathcal{P}(X)$ ,  $A_k \in \mathcal{A}$ . Тогда  $\mu: \mathcal{A} \rightarrow [0; +\infty]$  — мера, если

$$1. \mu(\emptyset) = 0$$

$$2. \mu \left( \underbrace{\bigcup_{k=1}^{\infty} A_k}_{\in \mathcal{A}} \right) = \sum_{k=1}^{\infty} \mu(A_k). \text{ Здесь никто не обещает, что будет именно } \sigma\text{-алгебра.}$$

Множества  $A \in \mathcal{A}$  в таком случае называются  $\mu$ -измеримыми.

**Пример 1.**  $a \in X$ ,  $\mu(A) = \begin{cases} 1, & a \in A \\ 0, & a \notin A \end{cases}$  —  $\delta$ -мера Дирака.

**Пример 2.**  $a_k \in x$ ,  $m_k \geq 0$ ,  $\mu(a) := \sum_{k: a_k \in a} m_k$  — «молекулярная» мера.

**Пример 3.**  $\mu(A) = \#A$  — считающая мера. <sup>1</sup>

### Билет № 4: Свойства меры

Здесь всюду будем рассматривать тройку  $(X, \mathcal{A} \subset \mathcal{P}(X), \mu)$

**Утверждение 1** (Монотонность меры). Пусть  $A, B \in \mathcal{A}$ ,  $A \subset B$ . Тогда  $\mu(A) \leq \mu(B)$ .

**Утверждение 2.** Пусть  $A, B \in \mathcal{A}$ ,  $A \subset B$ ,  $\mu(B) < +\infty$ . Тогда  $\mu(B \setminus A) = \mu(B) - \mu(A)$ .

**Утверждение 3** (Усиленная монотонность). Пусть  $A_{1..n}, B \in \mathcal{A}$ ,  $A_{1..n} \subset B$  и дизъюнкты.

$$\text{Тогда } \sum_{k=1}^n \mu(A_k) \leq \mu B$$

**Утверждение 4** (Полуаддитивность меры). Пусть  $B_{1..n}, A \in \mathcal{A}$ ,  $A \subset \bigcup_{k=1}^n B_k$ .

$$\text{Тогда } \mu A \leq \sum_{k=1}^n \mu(B_k).$$

▼

Сделать  $B_k$  дизъюнктными:  $C_k = B_k \setminus \bigcup_{j < k} B_j$ . Затем представить  $A$  как дизъюнктное объединение  $D_k$ :  $D_k = C_k \cap A$ . Так можно сделать, потому что

$$A = A \cap \bigcup_{k=1}^n B_k = A \cap \bigcup_{k=1}^n C_k = \bigcup_{k=1}^n A \cap C_k$$

Ну а тогда

$$\mu(A) = \sum_k \mu D_k \leq \sum_k \mu C_k \leq \sum_k \mu B_k$$

▲

---

<sup>1</sup>она считает, не считывает ☺

**Утверждение 5** (Непрерывность меры снизу). Пусть  $A_1 \subset A_2 \subset \dots$ ,  $A_k \in \mathcal{A}$ ,  $A = \bigcup_{k=1}^{\infty} A_k \in \mathcal{A}$ .<sup>1</sup>

$$\text{Тогда } \mu A = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu A_n$$

**Утверждение 6** (Непрерывность меры сверху). Пусть  $A_1 \supset A_2 \supset \dots$ ,  $A_k \in \mathcal{A}$ ,  $A = \bigcap_{k=1}^{\infty} A_k \in \mathcal{A}$ ,  $\mu A_1 < +\infty$ .

$$\text{Тогда } \mu A = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu A_n$$

<Тут будет картинка про метод исчерпывания Евдокса>

**Определение 1.** Пусть задана тройка  $(X, \mathcal{A}, \mu)$ . Тогда  $\mu$  — полная, если

$$\forall \in \mathcal{A}: \mu A = 0 \quad \forall B \subset A, B \in \mathcal{A} :: \mu B = 0$$

**Определение 2.** Мера  $\mu$  на  $\mathcal{A}$  называется  $\sigma$ -конечной, если

$$\exists X_n \in \mathcal{A}, \mu X_n < +\infty :: \bigcup_{n=1}^{\infty} X_n = X$$

**Определение 3.** Пусть  $\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2$  — сигма-алгебры подмножеств  $X$ ,  $\mathcal{A}_1 \subset \mathcal{A}_2$ ,  $\mu_1: \mathcal{A}_1 \rightarrow [0; +\infty]$ ,  $\mu_2: \mathcal{A}_2 \rightarrow [0; +\infty]$ . Тогда  $\mu_2$  называется продолжением  $\mu_1$ .

**Теорема 7** (Лебега-Каратеодора). Пусть  $\mu$  — сигма-конечная мера на  $\mathcal{A}$ . Тогда

1. Существуют её полные сигма-конечные продолжения
2. Среди них есть наименьшее:  $\bar{\mu}$ . Её ещё называют стандартным продолжением.

<идея доказательства> Пока надо запомнить, что стандартное продолжение — сужение внешней «меры» на хорошо разбивающие множества.

## Билет № 5: Объём в $\mathbb{R}^n$ . Мера Лебега

**Определение 1.** Пусть  $\Delta = \Delta_1 \times \dots \times \Delta_n$ ,  $\Delta_k = [a_k, b_k)$ . Тогда

$$v_1 \Delta_k \equiv |\Delta_k| := \begin{cases} b_k - a_k, & a_k \in \mathbb{R} \wedge b_k \in \mathbb{R} \\ \infty, & \text{иначе} \end{cases}$$

$$v \Delta \stackrel{(\in \mathbb{R}^n)}{\equiv} v_n \Delta := |\Delta_1| \cdots |\Delta_n|$$

Для всего, что  $\in \mathcal{Cell}_n$ , представим его в виде дизъюнктного объединения  $\Delta_j$ . Тогда  $v A := \sum_{j=1}^q v \Delta_j$ .

*Замечание.* Здесь радикально всё равно, входят ли концы — у них мера ноль.

**Теорема 1.**  $v$  — конечно-аддитивен, то есть

$$\forall A, A_{1..p} \in \mathcal{Cell}, A = \bigsqcup_{k=1}^p A_k \Rightarrow v A = \sum_{k=1}^p v A_k$$

**Теорема 2.**  $v$  — счётно-аддитивен, то есть

$$\forall A, A_{1..} \in \mathcal{Cell}, A = \bigsqcup_{k=1}^{\infty} A_k \Rightarrow v A = \sum_{k=1}^{\infty} v A_k$$

□ Здесь в конспекте лишь частный случай про ячейки. ■

**Определение 2** (Мера Лебега).  $X = \mathbb{R}^n$ ,  $\mathcal{A} = \mathcal{Cell}_n$ . Тогда  $\lambda_n = \bar{v}_n$ ,  $\mathcal{M} = \overline{\mathcal{A}}$  — мера Лебега и алгебра множеств, измеримых по Лебегу, соответственно.

<sup>1</sup>Опять-таки никто не сказал, что  $\mathcal{A}$  —  $\sigma$ -алгебра.

### Свойства меры Лебега

- (1)  $\triangleright \lambda\{x\} = 0$
- (2)  $\triangleright \lambda(\{x_k\}_k) = 0$
- (3)  $\triangleright \mathcal{B} \subset \mathcal{M}$
- (4)  $\triangleright L \subset \mathbb{R}^m, m < n \Rightarrow \lambda_n L = 0$

А это уже целая теорема.

**Теорема 3** (Регулярность меры Лебега). Пусть  $A \in \mathcal{M}$ ,  $\varepsilon > 0$ . Тогда

$$\exists G \in \mathcal{O}, F \in \mathcal{F} :: F \subset A \subset G \wedge \begin{cases} \lambda(G \setminus A) < \varepsilon \\ \lambda(A \setminus F) < \varepsilon \end{cases}$$

□ куча скучных оценок квадратиками. ■

<+Пример неизмеримого множества на окрестности+>

### Билет № 6: Измеримые функции

**Определение 1.** Пусть задана тройка  $(X, \mathcal{A}, \mu)$ . Пусть ещё  $f: X \rightarrow \mathbb{R}$ . Тогда  $f$  называется измеримой относительно  $\mathcal{A}$ , если

$$\forall \Delta \subset \mathbb{R} :: f^{-1}(\Delta) \in \mathcal{A}$$

**Теорема 1.** Пусть  $f$  измеримо относительно  $\mathcal{A}$ . Тогда измеримы и следующие (Лебеговы) множества

**1 типа**  $\{x \in X \mid f(x) < a\} \equiv X[f < a]$

**2 типа**  $\{x \in X \mid f(x) \leq a\} \equiv X[f \leq a]$

**3 типа**  $\{x \in X \mid f(x) > a\} \equiv X[f > a]$

**4 типа**  $\{x \in X \mid f(x) \geq a\} \equiv X[f \geq a]$

При этом верно и обратное: если измеримы множества какого-то одного типа, то  $f$  измерима.

**Теорема 2.** Пусть  $f_1, \dots, f_n$  измеримы относительно  $\mathcal{A}$  и  $g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  непрерывна. Тогда измерима и  $\varphi(x) = g(f_1(x), \dots, f_n(x))$ .

*Замечание.* В частности,  $f_1 + f_2$  измерима.

**Теорема 3.** Пусть  $f_1, f_2, \dots$  измеримы относительно  $\mathcal{A}$ . Тогда измеримы  $\sup f_n, \inf f_n, \liminf f_n, \limsup f_n, \lim$ . Последний, правда, может не существовать.

□ Следует из непрерывности меры. ■

**Определение 2.** Пусть  $f: X \rightarrow \mathbb{R}$  — измерима. Тогда она называется простой, если принимает конечное множество значений.

**Определение 3** (Индикатор множества).

$$E \subset X, \mathbb{1}_E := \begin{cases} 1, & x \in E \\ 0, & x \notin E \end{cases}$$

Он, как видно совсем простая функция.

**Утверждение 4.**  $f$  — простая  $\Rightarrow f = \sum_{k=1}^p c_k \mathbb{1}_{E_k}$

**Теорема 5.** Пусть  $f: X \rightarrow \mathbb{R}$ , измерима,  $f \geq 0$ . Тогда

$$\exists (\varphi_n): 0 \leq \varphi_1 \leq \varphi_2 \leq \dots :: \varphi_n \nearrow f \text{ (поточечно)}$$

### Билет № 7: Интеграл по мере

**Определение 1.** Пусть задана тройка  $(X, \mathcal{A}, \mu)$ ,  $f$  — измерима.

[1]  $f$  — простая.

$$\int_X f \, d\mu := \sum_{k=1}^p c_k \mu E_k$$

[2]  $f \geq 0$ .

$$\int_X f \, d\mu := \sup \left\{ \int_X g \, d\mu \mid g \text{ — простая, } 0 \leq g \leq f \right\}$$

[3]  $f$  общего вида.

$$f_+ = \max\{f(x), 0\}$$

$$f_- = \max\{-f(x), 0\}$$

$$\int_X f \, d\mu = \int_X f_+ \, d\mu - \int_X f_- \, d\mu$$

Здесь нужно, чтобы хотя бы один из интегралов в разности существовал.

*Замечание 1.*  $\int_A f \, d\mu := \sum_{k=1}^p c_k \mu(E_k \cap A)$

*Замечание 2.* Дальше измеримость и неотрицательность или суммируемость  $f$  будет периодически называться «обычными» условиями.

**Утверждение 1.**  $\int_A f \, d\mu = \int_X f \cdot \mathbb{1}_A \, d\mu$ .

**Свойства интеграла от неотрицательных функций** Здесь всюду функции неотрицательны и измеримы, что не лишено отсутствия внезапности.

A<sub>1</sub>  $0 \leq f \leq g$ . Тогда  $\int_X f \, d\mu \leq \int_X g \, d\mu$ .

A<sub>2</sub>  $A \subset B \subset X$ ,  $A, B \in \mathcal{A}$ ,  $f \geq 0$ , измерима. Тогда  $\int_A f \, d\mu \leq \int_B f \, d\mu$

A<sub>3</sub> см теорему 1.8.1.

A<sub>4</sub>  $\int_X (f + g) \, d\mu = \int_X f \, d\mu + \int_X g \, d\mu$

A<sub>5</sub>  $\int_X (\lambda g) \, d\mu = \lambda \int_X g \, d\mu$

### Билет № 8: Теорема Беппо Лёви

**Теорема 1.** Пусть  $(f_n)$  — измеримы на  $X$ ,  $0 \leq f_1 \leq \dots$ ,  $f = \lim_n f_n$ . Тогда

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

### Билет № 9: Свойства интеграла от суммируемых функций

**Определение 1.**  $f$  — суммируемая (на  $X, \mu$ ), если  $\int_X f \, d\mu < \infty$ . Весь класс суммируемых (на  $X, \mu$ ) функций обозначается через  $\mathcal{L}(X, \mu)$ .

Здесь всюду функции  $\in \mathcal{L}$

B<sub>1</sub>  $f \leq g \Rightarrow \int_X f \, d\mu \leq \int_X g \, d\mu$ .

B<sub>2</sub>  $\int_X (f \pm g) \, d\mu = \int_X f \, d\mu \pm \int_X g \, d\mu$ .



$$B_3 \int_X \lambda f \, d\mu = \lambda \int_X f \, d\mu.$$

$$B_4 |f| \leq g \Rightarrow \left| \int_X f \, d\mu \right| \leq \int_X g \, d\mu.$$

$$B_5 \left| \int_X f \, d\mu \right| \leq \int_X |f| \, d\mu.$$

$$B_6 f \in \mathcal{L} \Leftrightarrow |f| \in \mathcal{L}$$

$$B_7 |f| \leq M \leq +\infty \Rightarrow \left| \int_X f \, d\mu \right| \leq M\mu X$$

### Билет № 10: Счётная аддитивность интеграла

**Теорема 1.** Пусть задана тройка  $(X, \mathcal{A}, \mu)$ ,  $f$  — измерима и  $f \geq 0 \vee f \in \mathcal{L}$ . Пусть к тому же

$$A, A_{1..} \subset X, A = \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n$$

Тогда

$$\int_A f \, d\mu = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{A_n} f \, d\mu$$

### Билет № 11: Абсолютная непрерывность интеграла

**Теорема 1.** Пусть  $f \in \mathcal{L}(X, \mathcal{A}, \mu)$ . Тогда

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0 :: \forall A \in \mathcal{A}, A \subset X: \mu A < \delta :: \left| \int_A f \, d\mu \right| < \varepsilon$$

### Билет № 12: Интеграл от непрерывной функции по мере Лебега

**Теорема 1.** Пусть  $f \in C([a; b])$ ,  $\lambda$  — мера Лебега на  $X = [a; b]$ . Тогда

$$f \in \mathcal{L}, \int_{[a; b]} f \, d\mu = \int_a^b f = F(b) - F(a),$$

где  $F$  — первообразная  $f$ .

### Билет № 13: Сравнение подходов Римана и Лебега

Сначала вспомним определения того, о чём собираемся рассуждать.

**Определение 1** (Интеграл Римана). Пусть  $f \in C([a; b])$   $a < x_1 < \dots < x_{n-1} < x_n = b$ ,  $\xi_i \in [x_i; x_{i+1}]$ . Тогда

- $\tau = \{x_1, \dots, x_{n-1}\}$  — разбиение отрезка  $[a; b]$
- $\xi = \{\xi_1, \dots, \xi_{n-1}\}$  — оснащение разбиения  $\tau$
- $\Delta x_i = x_{i+1} - x_i$  — длина  $i$ -го отрезка
- $r = r(\tau) = \max_i \{\Delta x_i\}$  — ранг разбиения
- $\sigma = \sigma(\tau, \xi, f) := \sum_{i=0}^{n-1} f(\xi_i) \cdot \Delta x_i$  — сумма Римана

Сам интеграл определяется как-то так

$$\int_a^b f \, dx = \lim_{r(\tau) \rightarrow 0} \sigma(\tau, \xi, f)$$

**Определение 2** (Интеграл Лебега). см. 1.7.1. В качестве множества  $X$  понятное дело, отрезок  $[a; b]$ .

**Пример 1.** Пусть  $X = [0; 1]$ . Тогда  $f(x) = \begin{cases} 0, & x \notin \mathbb{Q} \\ 1, & x \in \mathbb{Q} \end{cases}$  интегрируема по Лебегу, но не по Риману.

<+картиночка с обоими интегралами+>

# Билет № 14: Сравнение несобственного интеграла и интеграла Лебега

**Теорема 1.** Пусть  $f \geq 0 \vee f \in \mathcal{L}([a; b), \lambda)$ . Тогда  $\int_{[a; b)} f d\lambda = \int_a^{\rightarrow b} f$ .

□ (✂) Свести к собственному, а дальше непрерывность меры. ■

# Билет № 15: Интеграл по дискретной мере и мере, задаваемой плотностью

**Теорема 1.** Пусть  $\mu = \sum_k m_k \delta_{a_k}$ ,  $\{a_k\} \in X$  и  $f: X \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $f \geq 0$  или  $f \in \mathcal{L}(X, \mu)$ . Тогда

$$\int_X f d\mu = \sum_k f(a_k) \cdot \underbrace{m_k}_{\mu\{a_k\}}$$

□ (✂) Счётная аддитивность интеграла поможет. 1.10.1 ■

**Пример 1.** Пусть  $\mu A = \#A$ . Тогда

$$\sum_{m, n \in \mathbb{N}} = \int_{\mathbb{N}^2} f(m, n) d\mu$$

Причем условия суммируемости<sup>1</sup> ряда такие же, как у интеграла Лебега:

$$\left[ \begin{array}{l} \forall m, n \in \mathbb{N} :: a_{m, n} \geq 0 \\ \sum_{m, n \in \mathbb{N}} |a_{m, n}| < \infty \end{array} \right.$$

**Определение 1.** Пусть задана пара<sup>2</sup>  $(X, \mu)$ ,  $\rho: X \rightarrow \mathbb{R}$ , измерима,  $\rho \geq 0$ . Тогда

- $\nu(E) := \int_E \rho d\mu$  — мера, задаваемая плотностью  $\rho$
- $\rho$  — плотность меры  $\nu$  относительно меры  $\mu$ .

*Замечание.* Она правда мера, интеграл счётно-аддитивен.

**Теорема 2.** Пусть выполнены «обычные» условия на  $f$ . Тогда  $\int_X f d\nu = \int_X f \rho d\mu$ .

# Билет № 16: Мера Лебега-Стилтьеса. Интеграл по распределению

**Определение 1.** Пусть  $I \subset \mathbb{R}$ ,  $F: I \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $F \nearrow$ ,  $F(x) = F(x-0)$  (непрерывна слева)<sup>3</sup>. Рассмотрим порождённую полуинтервалами  $[a; b) \subset I$   $\sigma$ -алгебру. Введём «объём»  $\nu_F: \nu([a; b)) = F(b) - F(a)$ .

Тогда мера Лебега-Стилтьеса  $\mu_F$  — стандартное продолжение  $\nu_F$  на некоторую  $\sigma$ -алгебру  $\mathcal{M}_F$ .

*Замечание 1.* Здесь надо доказывать *счётную* аддитивность, а то как продолжать  $\nu$ , если она — не мера?

## Свойства меры Лебега-Стилтьеса

**Утверждение 1.** Пусть  $\Delta = [a; b]$ . Тогда  $\mu\Delta = F(b+0) - F(a)$ .

**Утверждение 2.** Пусть  $\Delta = \{a\}$ . Тогда  $\mu\Delta = F(a+0) - F(a)$ .

**Утверждение 3.** Пусть  $\Delta = (a; b)$ . Тогда  $\mu\Delta = F(b) - F(a+0)$ .

**Лемма 4.** Пусть  $F \in C(I)$ ,  $\Delta \subset I$ . Тогда  $\mu_F(\Delta) = \int_{\Delta} F'(t) d\lambda$ .

**Теорема 5.** Пусть  $F \nearrow$ , кусочно-гладка на  $I \subset \mathbb{R}$ , а для  $f$  выполнены обычные условия ( $X = \mathcal{B}$ ,  $\mu = \mu_F$ ). Промежутки гладкости  $F$  обозначим за  $(c_k, c_{k+1})$ . Тогда

$$\int_X f d\mu_F = \sum_k \int_{c_k}^{c_{k+1}} f F' d\lambda + \sum_k f(c_k) \underbrace{\Delta_{c_k} F}_{\text{скачок в } c_k}$$

<sup>1</sup> здесь объявим бесконечность приличным значением суммы ряда

<sup>2</sup>тройка, но все же поняли, что сигма-алгебра имела в виду

<sup>3</sup>А можно и без. Тогда  $\nu([a; b)) = F(b-0) - F(a-0)$ , см. ??

**Определение 2** (Образ мемы). Пусть  $(X, \mathcal{A}, \mu)$  — пространство с мемой,  $f: X \rightarrow Y$ . Превратим и  $Y$  в пространство с мемой.

1.  $\mathcal{A}' = \{E \subset Y \mid f^{-1}(E) \in \mathcal{A}\}$ .
2.  $\mu' \equiv \nu = \mu \circ f^{-1}$ .

**Теорема 6.** Пусть для  $g: Y \rightarrow \mathbb{R}$  выполнены обычные условия ( $\mathcal{A} = \mathcal{A}', \mu = \nu$ ). Тогда  $\int_Y g d\nu = \int_X (g \circ f) d\mu$ .

**Определение 3** (Функция распределения). Пусть задано  $(X, \mu)$ ,  $\mu X < +\infty$ ,  $f: X \rightarrow \mathbb{R}$ . Тогда  $F(t) := \mu X[f < t]$ . Как видно, она возрастает и непрерывна слева.

**Теорема 7.** Пусть задано  $(X, \mu)$ ,  $\mu X < +\infty$ , выполнены обычные условия для  $f$ . Тогда  $\int_X f d\mu = \int_{-\infty}^{+\infty} t d\mu_F$ .

### Билет № 17: Интеграл Эйлера-Пуассона

**Утверждение 1.**  $\int_{\mathbb{R}^2} e^{-(x^2+y^2)} d\lambda_2 = \pi$

### Билет № 18: Вероятностный смысл мемы

<Табличка с соответствием>

### Билет № 19: Геометрический смысл меры Лебега. Принцип Кавальери

**Определение 1.** Пусть задано  $(X, \mu)$ ,  $P(x)$  — предикат. Говорят, что  $P(x) = 1$  почти везде (п.в.), если  $\mu\{x \mid P(x) = 0\} = 0$ .

**Определение 2.**  $f \sim g \Leftrightarrow f(x) = g(x)$  п.в. .

**Лемма 1** (Бешпо-Леви для рядов). Пусть заданы  $(X, \mu)$ ,  $u_n: X \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $n \in \mathbb{N}$ ,  $u_n$  измеримы,  $u_n \geq 0$ . Тогда

$$a) \int_X \sum_{n=1}^{\infty} u_n d\mu = \sum_{n=1}^{\infty} \int_X u_n d\mu.$$

b) Если эти числа конечны, то ряд  $\sum_n u_n$  с.х. п.в.

**Лемма 2** (Бешпо-Леви «вверх ногами»). Пусть задано  $(X, \mu)$ ,  $(f_n)$ , измеримы,  $f_1 \geq f_2 \geq \dots \geq 0$ . Пусть ещё  $f_1 \in \mathcal{L}$ . Тогда

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

<Здесь была ещё пара лемм, но они не особо используются дальше. Вроде>

**Определение 3.** Пусть  $E \subset \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^n \in \mathcal{M}_{m+n}$ .

- ▷  $E_x = \{y \in \mathbb{R}^n \mid (x, y) \in E\}$  — «срез»
- ▷  $\Pi_1(E) = \{x \in \mathbb{R}^m \mid E_x \neq \emptyset\}$  — «проекция»

<картинка для  $\mathbb{R}^2$ >

**Теорема 3.** Пусть  $E \in \mathcal{M}_{m+n}$ ,  $E_x \in \mathcal{M}_n$  п.в.  $x$ ,  $\varphi(x) = \lambda_n(E_x)$  измерима относительно  $\mathcal{M}_m$ .

Тогда

$$\lambda_{m+n}(E) = \int_{\mathbb{R}^m} \lambda_n(E_x) d\lambda_m$$

<много букв>

**Определение 4** (График).  $\Gamma^f = \{(x, t) \in \mathbb{R}^{n+1} \mid t = f(x)\}$ .

**Определение 5** (Подграфик).  $\Gamma_-^f = \{(x, t) \in \mathbb{R}^{n+1} \mid 0 \leq t \leq f(x)\}$ .

**Определение 6** (Надграфик).  $\Gamma_+^f = \{(x, t) \in \mathbb{R}^{n+1} \mid t \geq f(x)\}$ .

**Теорема 4** (Геометрический смысл интеграла). Пусть  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ , измерима,  $\geq 0$ . Тогда

1.  $\Gamma_-^f$  измеримо.
2.  $\lambda_{n+1} \Gamma_-^f = \int_{\mathbb{R}^n} f d\lambda_n$  измеримо.

## Билет № 20: Сведение кратного интеграла к повторному

Будем в дальнейшем обозначать интегрирование по мере через  $dx$  (ну или  $dy$ ), размерность определяется из размерности  $x$ . Еще обозначим  $d(x, y)$  через  $dx dy$ .

**Теорема 1** (Тонелли). Пусть  $f: \mathbb{R}^{m+n} \rightarrow \mathbb{R}$ , измерима,  $\geq 0$ ,  $x \in \mathbb{R}^m$ ,  $y \in \mathbb{R}^n$ . Тогда

$$\iint_{\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^n} f(x, y) dx dy = \int_{\mathbb{R}^m} dx \int_{\mathbb{R}^n} f(x, y) dy$$

**Теорема 2** (Фубини). Пусть  $f: \mathbb{R}^{m+n} \rightarrow \mathbb{R}$ , измерима,  $\in \mathcal{L}(\mathbb{R}^{n+m}, \lambda_{m+n})$ ,  $x \in \mathbb{R}^m$ ,  $y \in \mathbb{R}^n$ . Тогда

$$\iint_{\mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^n} f(x, y) dx dy = \int_{\mathbb{R}^m} dx \int_{\mathbb{R}^n} f(x, y) dy$$

## Билет № 21: Мера Лебега и аффинные преобразования

Главные герои этого параграфа:

- Сдвиг:  $T: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ ,  $Tx = x + a$ ,  $a \in \mathbb{R}^n$ .
- Поворот с растяжением:  $L: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ ,  $L$  — линейный император.

**Утверждение 1.**  $E \in \mathcal{M} \Rightarrow T(E) \in \mathcal{M}$ .

**Утверждение 2.**  $E \in \mathcal{M} \Rightarrow L(E) \in \mathcal{M}$ .

**Утверждение 3.** Пусть  $L: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ , линейно. Тогда

$$\exists C \geq 0 \forall E \in \mathcal{M} :: \lambda L(E) = C \lambda E$$

**Теорема 4.**  $C$  из прошлой теоремы равно  $|\det[L]|$ .

<+тут декомпозиция на ортогональный и диагональные операторы и 2 леммы+>

## Билет № 22: Мера образа при гладком отображении

**Обозначение.**  $J_F(x) \equiv \det F'(x)$

**Теорема 1.** Пусть  $E \in \mathcal{M}$ ,  $F: G \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ , гладкая биекция. Тогда  $F(E) \in \mathcal{M}$  и  $\lambda F(E) = \int_E |\det F'(x)| dx$ .

□ <~> <⌘> ■

## Билет № 23: Гладкая замена переменной в интеграле

**Теорема 1.** Пусть  $F: G \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ , гладкая биекция. Пусть к тому же  $E \subset F(G) \in \mathcal{M}$ ,  $f: E \rightarrow \mathbb{R}$  с обычными условиями.

Тогда

$$\int_E f(y) dy = \int_{F^{-1}(E)} f(F(x)) \cdot |J_F(x)| dx$$

**Пример 1** (Полярные координаты). <⌘>  $|J| = r$

**Пример 2** (Сферические координаты). <⌘>  $|J| = r^2 \cos \psi$

## Билет № 24: Предельный переход под знаком интеграла

**Определение 1** (Всякие сходимости). Пусть  $(f_n): X \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $f: X \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $\mu$  — мера на  $X$ .

$$\begin{aligned} f_n \rightarrow f &:= \forall x \in X :: f_n(x) \rightarrow f(x) \\ f_n \xrightarrow{X} f &:= \sup_X |f_n - f| \rightarrow 0 \\ f_n \rightarrow f \text{ п.в.} &:= \exists N \subset X: \mu(N) = 0 :: \forall x \in X \setminus N :: f_n(x) \rightarrow f(x). \\ f_n \xrightarrow{\mu} f &:= \forall \sigma > 0 :: \mu X[|f_n - f| \geq \sigma] \rightarrow 0 \end{aligned}$$

Замечание 1.  $f \xrightarrow{X} f \Rightarrow f_n \rightarrow f \Rightarrow f_n \rightarrow f$  п.в. .

Замечание 2. Пусть  $\mu X < \infty$ , тогда  $f_n \rightarrow f$  п.в.  $\Rightarrow f_n \xrightarrow{\mu} f$ .

Замечание 3 (Теорема Рисса).  $f_n \xrightarrow{\mu} f$  п.в.  $\Rightarrow \exists (n_k) :: f_{n_k} \rightarrow f$  п.в. .

**Теорема 1.**  $f_n \xrightarrow{X} f, \mu X < \infty \Rightarrow \int_X f_n d\mu \rightarrow \int_X f$

**Теорема 2.** см теорему Беппо-Леви (1.8.1) или её вариацию 1.19.2.

**Теорема 3** (Фату). Пусть заданы  $(X, \mu)$ ,  $f_n \geq 0$ , измеримы. Тогда

$$\int_X \underline{\lim} f_n d\mu \leq \underline{\lim} \int_X f_n d\mu$$

### Билет № 25: Теорема Лебега об ограниченной сходимости

**Теорема 1.** Пусть снова заданы  $(X, \mu)$ ,  $(f_n)$  измерима,  $f_n \rightarrow f$  п.в. . К тому же

$$\exists \varphi \in \mathcal{L} :: \forall n :: |f_n| \leq |\varphi|$$

Тогда

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

**Обозначение.**  $(\mathcal{L})$  — условия теоремы Лебега об ограниченной сходимости.

**Следствие 1.** Пусть  $f: T \times X \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $T \subset \mathbb{R}^k$ ,  $f_t \xrightarrow[t \rightarrow t_0]{} f$  п.в. , и

$$\exists V(t^0), \varphi \in \mathcal{L} :: \forall t \in \overset{\circ}{V} \cap T :: |f_t| \leq |\varphi|$$

Тогда

$$\int_X f_t d\mu \xrightarrow[t \rightarrow t_0]{} \int_X f d\mu$$

**Обозначение.**  $(\mathcal{L}_{\text{loc}})$  — условия локальной теоремы Лебега об ограниченной сходимости.

**Следствие 2.** Непрерывность интеграла по параметру при выполнении  $(\mathcal{L}_{\text{loc}})$  и непрерывности  $f_t$ .

### §\* Интеграл по меме с параметром

Здесь часто придётся подчёркивать, что является параметром, а что — определяет функцию В таких случаях параметр будет записан, как индекс

**Определение 1** (Собственный интеграл с параметром). Пусть  $f: X \times T \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $f_t(x) \in \mathcal{L}([a, b], \mu) \forall t \in T$ . Тогда,

$$I(t) = \int_a^b f(x, t) dx$$

Мы здесь определяем некоторую функцию от  $t$ , как видно  $\mathcal{D}_I = T$ .

По идее, надо здесь переформулировать все-все-все утверждения про последовательности функций. Надо бы узнать, что с этим делать. `<:set aflame>`У нас в конспекте этот кусок почему-то написан про несобственные интегралы, но всюду полагается  $(\mathcal{L}_{\text{loc}})$ . Так что по сути они — просто интегралы по меме.

Здесь тоже есть непрерывность, дифференцируемость и интегрирование по параметру, но все тривиально<sup>1</sup> следует из 1.25.1 и 1.20.2.

<sup>1</sup>ну..

**Билет № 26: Равномерная сходимость несобственного параметрического интеграла. Признаки**

**Определение 1** (Несобственный интеграл с параметром). Пусть  $f: X \times T \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $f \in \mathcal{L}([a, B], \mu) \forall B < b$ . Тогда,

$$I(t) = \int_a^{\rightarrow b} f(x, t) dx := \lim_{B \rightarrow b-0} \int_a^B f(x, t) dx = \lim_{B \rightarrow b-0} I^B(t)$$

Предполагается, что  $\forall t \in T$  интеграл сходится поточечно. А вот суммируемость никто не обещал.

**Определение 2.** Говорят, что  $I^B(t) \xrightarrow{T} I(t)$  (сходится равномерно относительно  $t, t \in T$ ), если

$$\sup_{t \in T} \left| \int_B^{\rightarrow b} f(x, t) dx \right| \xrightarrow{B \rightarrow b} 0$$

Здесь дальше всюду предполагается поточечная сходимость интеграла  $\forall t \in T$ .

**Теорема 1** (Признак Больцано-Коши).

$$I^B(t) \xrightarrow{T} I(t) \Leftrightarrow \sup_T \left| \int_{B_1}^{B_2} f(x, t) dx \right| \xrightarrow{B_1, B_2 \rightarrow b} 0$$

**Теорема 2** (Признак Вейерштрасса). Пусть  $\exists \varphi \in \mathcal{L}([a; b)) \quad \because |f(x, t)| \leq \varphi(x) \quad \forall t$ . Тогда  $I^B(t) \xrightarrow{T} I(T)$ .

**Теорема 3** (Признак Дирихле). Пусть  $I(t) = \int_a^{\rightarrow b} f(x, t) \cdot g(x, t) dx$  и

$$a) \quad f(x, t) \xrightarrow{T} 0, \quad f(x, t) \searrow^x \quad (x \rightarrow b-0)$$

$$b) \quad G(x, t) = \int_a^x g(\xi, t) d\xi$$

$$\exists M: \forall x \in [a; b), t \in T \quad \because |G(x, t)| \leq M$$

Тогда  $I^B(t) \xrightarrow{T} I(T)$ .

**Теорема 4** (Признак Абеля). Пусть  $I(t) = \int_a^{\rightarrow b} f(x, t) \cdot g(x, t) dx$  и

$$a) \quad \exists M: \forall t \in T \quad \because f(x, t) \leq M, \quad f(x, t) \searrow^x.$$

$$b) \quad \int_a^B g(x, t) dx \xrightarrow[T \rightarrow b]{T} \int_a^{\rightarrow b} g(x, t) dx$$

Тогда  $I^B(t) \xrightarrow{T} I(T)$ .

**Билет № 27: Несобственные интегралы с параметром и операции анализа над параметром  $\langle \otimes \rangle$**

**Теорема 1.** Пусть  $f(x, t) \rightarrow f(x, t_0)$  для п.в.  $x \in [a; b)$  и  $I^B(t) \xrightarrow{V(t_0)} I(t)$ .<sup>2</sup> Тогда  $I \xrightarrow[t \rightarrow t_0]{} I(t_0)$ .

**Теорема 2.** Пусть для п.в.  $x \exists f'_t(x, t)$ , непрерывна на  $[a; b) \times \underbrace{[c; d]}_T$ . Допустим,

$$a) \quad I(t) = \int_a^{\rightarrow b} f(x, t) dx \text{ сходится } \forall t \in T$$

<sup>1</sup>Никто же не любит  $\varepsilon$ - $\delta$ -определения?

<sup>2</sup>Это не очень докажется без конечности меры  $V(t_0)$ , а то интеграл может сходиться, а функция не быть суммируемой

b)  $\int_a^{\rightarrow b} f'_t(x, t) dx$  равномерно сходится относительно  $t \in T$

$$\text{Тогда } \exists I'(t_0) = \int_a^{\rightarrow b} f'_t(x, t_0) dx$$

*Замечание.* Здесь нужна сходимость  $I$ , чтобы хоть где-то были конечные значения  $I(t)$ , нам их разность считать.

**Теорема 3.** Пусть для п.в.  $x \exists f(x, t)$ , непрерывна на  $[a; b) \times \underbrace{[c; d]}_T$ . Допустим,  $I(t) =$

$$\int_a^{\rightarrow b} f(x, t) dx \text{ равномерно сходится относительно } t \in T$$

Тогда

$$\int_c^d I(t) dt = \int_a^{\rightarrow b} dx \int_c^d f(x, t) dt$$

### Билет № 28: Г-функция Эйлера

**Определение 1.**  $\Gamma(t) = \int_0^\infty x^{t-1} e^{-x} dx$

#### Свойства

1° Определена для всех  $t > 0$ .

2°  $\Gamma(1) = 1$

3°  $\forall t \Gamma(t+1) = t\Gamma(t)$

4°  $n \in \mathbb{N} \Gamma(n+1) = n!$

5° Г-вышукла

6°  $\Gamma \sim \frac{1}{t}$  при  $t \rightarrow 0$

7°  $\Gamma(t+1) \sim \sqrt{2\pi} \sqrt{t} t^t e^{-t}$  при  $t \rightarrow \infty$ .

8°  $\Gamma(t) \cdot \Gamma(1-t) = \frac{\pi}{\sin \pi t}$ . (формула отражения)

Гамма-функцию можно продолжить на отрицательную область, через формулу отражения. И на комплексную, там будет сходимость при  $\text{Im } z > 0$ .

### Билет № 29: В-функция

**Определение 1.**  $B(y, z) = \int_0^1 x^{y-1} (1-x)^{z-1} dx$ .

#### Свойства

1°  $B(y, z) = B(z, y)$ .

2°  $B(y, z) = \frac{\Gamma(y)\Gamma(z)}{\Gamma(y+z)}$ .

### Билет № 30: Объём $n$ -мерного шара

**Теорема 1.** Пусть  $B_n(R) = \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x\| \leq R\}$  –  $n$ -мерный шар. Тогда

$$\lambda_n B_n(R) = \frac{\pi^{n/2} R^n}{\frac{n}{2} \cdot \Gamma(\frac{n}{2})}$$

## Глава 2: Дифференциальная геометрия $\langle \times \rangle$

### Билет № 31: Регулярная кривая и её естественная параметризация

**Определение 1** (Кривая, как отображение). Пусть задано гладкое отображение  $t \in [a; b] \mapsto r(t) \in \mathbb{R}^3$ , регулярное, то есть  $rk r'(t) \equiv 1$ .  $t$  — параметр, само отображение ещё можно называть параметризацией.

**Определение 2** (Кривая, как класс отображений). Введём отношение эквивалентности отображений:

$$r(t) \sim \rho(\tau) \Leftrightarrow \exists \delta: [a; b] \leftrightarrow [\alpha, \beta] :: \rho(\delta(t)) = r(t)$$

А теперь будем их путать.  $\langle \text{:set aflame} \rangle$

**Определение 3** (Естественная параметризация). Пусть  $[a; b] = [t_0, t_1]$ . Рассмотрим  $\tilde{s}(t) = \int_{t_0}^t |r'(t)| d\tau$ . Она, как видно, является пройденным путём и неубывает  $\Rightarrow$  годится на роль  $\delta$ .

Так что можно рассматривать  $s$  как параметр, это собственно и есть естественная (натуральная) параметризация.

**Утверждение 1.** Пусть есть две разных параметризации:  $r(t)$  и  $r(s)$  одной кривой. Тогда

$$\dot{r} \equiv \frac{\partial r(s)}{\partial s} = \left( r'(t) \cdot (s'(t))^{-1} \right)(t) = \frac{r'}{|r'|}$$

Как видно, натуральная почему-то обозначается точкой.

### Билет № 32: Кривизна кривой

**Определение 1** (Касательный вектор).  $\tau := \dot{r}(s)$ .

**Определение 2** (Кривизна).  $k_1 = |\dot{\tau}|$

**Определение 3** (Радиус кривизны).  $R = k_1^{-1}$

**Утверждение 1.**  $\tau \perp \dot{\tau}$

**Теорема 2.**  $k_1 = \frac{|r' \times r''|}{|r'|^3}$

### Билет № 33: Кручение и нормаль

**Определение 1** (Нормаль). Пусть  $k_1 \neq 0$ . Тогда  $\nu := \frac{\dot{\tau}}{k_1}$ .

**Определение 2** (Бинормаль).  $\beta = \tau \times \nu$ .

*Замечание.*  $(\tau, \nu, \beta)$  — хороший кандидат для репера в какой-нибудь точке  $P$ .

**Определение 3** (Соприкасающаяся плоскость). Пусть  $k_1 > 0$ ,  $P = r(s_0)$ ,  $T$  — плоскость,  $T \ni P$ ,  $N \perp T$  — нормаль к ней. Допустим,  $r(s + \Delta s) \cdot N = h$ ,  $h = o(\Delta s^2)$ . Тогда  $T$  — соприкасающаяся плоскость.

**Утверждение 1.**  $\tau, \nu \perp N$ ;  $(r - r_0, \dot{r}_0, \ddot{r}_0) = 0$  — её уравнение

**Определение 4** (Абсолютное кручение).  $|k_2| := |\dot{\beta}|$

**Теорема 2.**  $|k_2| = \left| \frac{(\dot{r}, \ddot{r}, \ddot{\ddot{r}})}{k_1^2} \right|$

**Определение 5** (Кручение).  $k_2 := \frac{-(\dot{r}, \ddot{r}, \ddot{\ddot{r}})}{k_1^2}$



**Билет № 34: Формулы Френе****Теорема 1.**

$$\begin{pmatrix} \dot{\tau} \\ \dot{\nu} \\ \dot{\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & k_1 & 0 \\ -k_1 & 0 & -k_2 \\ 0 & k_2 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \tau \\ \nu \\ \beta \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

**Теорема 2.** Пусть  $r(s)$  — гладкая кривая с заданными  $k_1$  и  $k_2$ ,  $k_1 > 0$ . Тогда система (2.1) определит её с точностью до движения.

**Билет № 35: Регулярная поверхность. Касательная плоскость. Первая квадратичная форма****Определение 1** (Поверхность (двумерная)). Пусть задано гладкое отображение

$$\varphi: (u, v) \in D \subset \mathbb{R}^2 \mapsto r = (x, y, z) \in \mathbb{R}^3$$

Добавим условие регулярности  $\text{rk } \varphi' \equiv 2$  и условимся путать отображение и класс оных.

**Определение 2.**

$$\begin{aligned} r_u &:= (x'_u, y'_u, z'_u) \\ r_v &:= (x'_v, y'_v, z'_v) \\ n &:= \frac{r_u \times r_v}{|r_u \times r_v|} = \frac{N}{|N|} \end{aligned}$$

Отметим, что условие регулярности не даёт векторному произведению обращаться в 0.

Касательную плоскость можно было бы здесь определить через нормаль, но лучше пока ещё подумать. Может, абстракций добавить.

**Определение 3** (Первая квадратичная форма).

$$\begin{aligned} I &:= |\text{dr}|^2 = r_u^2 du^2 + 2r_u r_v du dv + r_v^2 dv^2 \\ &= E du^2 + 2F du dv + G dv^2 \end{aligned}$$

**Билет № 36: Вычисление длин и площадей на поверхности****Теорема 1.** Пусть  $M$  — поверхность,  $\gamma: t \rightarrow r \in M$ . Тогда

$$\ell(\gamma) = \int_{t_0}^{t_1} \sqrt{I}. (ds = I)$$

**Теорема 2.** Пусть  $M$  — поверхность,  $u, v \in D$ ,  $I = E du^2 + 2F du dv + G dv^2$ . Тогда

$$S(M) = \iint_D \sqrt{EG - F^2} du dv$$

⟨?⟩<+вкусный абстрактный кусок про меру на многообразии+>

**Определение 1.** Пусть  $M$  — подмногообразие  $\mathbb{R}^n$ . Тогда

$$\lambda_k := \int_D \sqrt{\det g(t)} dt, \quad g(t)_{ij} = \left( \frac{\partial x}{\partial t_i} \cdot \frac{\partial x}{\partial t_j} \right) (t)$$

**Замечание 1.** Как видно, в  $\mathbb{R}^2$ ,  $g$  очень похож на матрицу 1ой квадратичной формы

**Определение 2.** Пусть  $M_1, M_2$  — пара поверхностей. Допустим,  $\exists F: M_1 \rightarrow M_2$ , сохраняющее длины кривых. Тогда они называются изометричными.

**Теорема 3.** Пусть  $M_1, M_2$  — пара поверхностей. Допустим, что существуют их параметризации, при которых  $I_1 = I_2$ . Тогда они изометричны.

### Билет № 37: Вторая квадратичная форма

**Определение 1.** Снова рассмотрим поверхность с какой-то параметризацией. Тогда  $\Pi := -dr \, dn = L \, du^2 + 2N \, du \, dv + M \, dv^2$ .

**Утверждение 1.**  $\Pi = n \cdot d^2 r$

**Утверждение 2** (Типы точек на поверхности). *Здесь названия связаны с типом соприкасающегося параболоида. Его можно добыть, рассматривая  $\Delta r \cdot n$ .*

$\Pi > 0$ : Эллиптический

$\Pi < 0$ : Он же

$\Pi \leq 0$ : Гиперболический

$\Pi \geq 0 \vee \Pi \leq 0$ : Параболический (вроде цилиндра)

$\Pi = 0$ : Точка уплощения

### Билет № 38: Нормальная кривизна в данном направлении. Главные кривизны

**Определение 1.** Нормальное сечение поверхности — сечение плоскостью, содержащей нормаль к поверхности (в точке).

**Лемма 1.** Нормальное сечение — кривая.

Сначала рассмотрим несколько более общий случай

**Теорема 2** (Менье). Пусть  $\gamma$  — кривая  $\subset M$ ,  $\gamma \ni P$ . Тогда  $k_0 = k_1 \cos(\underbrace{\nu; n}_{\theta}) = \frac{\Pi}{I}$ .

*Замечание 1.* Ещё можно сформулировать так: для всякой кривой на поверхности, проходящей через точку в заданном направлении  $k_0 = \text{const}$

а теперь сузим обратно.

**Определение 2.** Нормальная кривизна — кривизна нормального сечения.

Для нормального сечения  $\cos \theta = \pm 1$ .

Если немного переписать и ввести параметр  $t = dv/du$

$$k_1(t) = |k_0(t)| = \left| \frac{L + 2Nt + Mt^2}{E + 2Ft + Gt^2} \right|$$

Этот параметр  $t$  и задаёт «направление» нормального сечения. Так что  $k_0(t)$  и есть та самая «кривизна в данном направлении».

Теперь найдем экстремумы  $\frac{\Pi}{I}(t)$ .

**Теорема 3.**  $\exists k_{\min}, k_{\max}, k_{\min} \cdot k_{\max} = \frac{LM - N^2}{EG - F^2}$ .

**Определение 3.**  $k_{\min}, k_{\max}$  — главные кривизны.

### Билет № 39: Гауссова кривизна поверхности. Теорема Гаусса

**Определение 1** (Гауссова кривизна).  $K = k_{\min} \cdot k_{\max}$ .

**Определение 2** (Гауссово отображение). Пусть  $M$  — поверхность,  $n$  — нормаль к ней в точке  $P$ ,  $S$  — единичная сфера. Тогда  $G: n \mapsto C \in S$  ( $C$  — точка на сфере).

**Теорема 1.** Пусть  $U$  — окрестность  $P \subset M$ ,  $M$  — поверхность,  $\mathcal{N}$  — поле нормалей на  $U$ . Допустим, что  $V = G(\mathcal{N})$ , она вроде как окрестность  $G(n_P)$ .

Тогда

$$|K| = \lim_{U \rightarrow P} \frac{\iint_V |n_u \times n_v|}{\iint_U |r_u \times r_v|}$$

#### Билет № 40: Геодезическая кривизна. Теорема Гаусса-Бонне.

**Определение 1** (Геодезическая кривизна). Пусть  $M$  — поверхность,  $T$  — касательная к ней в точке  $P$ . Допустим,  $\gamma \subset M$  проходит через  $P$ . Рассмотрим проекцию  $\gamma$  на  $T$ . Тогда  $\kappa := k_\gamma$  — и есть геодезическая кривизна.

**Определение 2.** Если для кривой  $\kappa(s) \equiv 0$ , то она называется геодезической.

**Теорема 1** (Гаусса-Бонне). Пусть  $M$  — гладкая поверхность,  $P_1, \dots, P_n$  — вершины криволинейного многоугольника,  $P_i, P_{i+1} = \gamma$ ,  $\alpha_i$  — углы при вершинах. Тогда

$$\sum_i \alpha_i + \sum_i \int_{\gamma_i} \kappa ds = 2\pi - \iint_P K ds$$

#### Билет № 41: Ориентация кривой и поверхности

Здесь сначала введём всякие конкретные определения, потом абстрактное, потом конкретные примеры.

**Определение 1** (Векторное поле). Пусть  $G \subset \mathbb{R}^n$ ,  $V$  — векторное пространство. Тогда  $f: G \rightarrow V$  и есть векторное поле.

**Пример 1.**  $V = \mathbb{R}^k$ .

*Замечание 1.* Если захотеть гладкого векторного поля, то нужно уметь вводить на  $V$  норму<sup>1</sup>. Но как правило имеют дело с  $V = \mathbb{R}^n$  где это всё уже есть.

**Определение 2.** Ориентация на кривой — непрерывное поле  $\tau(x(t))$ . Они все единичные, так что варианта выбрать  $\tau(x)$  всего 2. Соответственно, и ориентаций две.

*Замечание 1.* Регулярность избавит от изломов, а все пересечения разделяются по  $t$ .

*Замечание 2* (`<:set aflame>`). В нашем понимании кривая — не многообразие. У многообразия были бы проблемы с окрестностью пересечения. Это можно показать рассмотрев 4 точки в окрестности пересечения и устремив ту, что с самым далёким прообразом к пересечению.<sup>2</sup>

**Определение 3.** Ориентация на кривой — класс эквивалентности параметризаций по отношению  $r(t) \sim \rho(\tau) \Leftrightarrow \delta' > 0$  (всегда).

**Утверждение 1.** Определения 2.41.2 и 2.41.3 эквивалентны.

▼

банан.

▲

**Определение 4.** Если на кривой вводится ориентация, то она ориентируемая.

Тут нужно отметить, что подход выше совсем ломается, когда дело заходит о поверхностях. Обобщив рассуждения выше на поверхности, мы придём к тому, что лента Мёбиуса окажется ориентируемой. Ну, в самом деле, если привязать нормали к параметрам, а не к координатам пространства содержащего поверхность, то окажется, что нормаль всегда «вращается» непрерывно.

Так что надо сейчас заняться ориентацией многообразий.

**Определение 5.** Пусть  $M \subset \mathbb{R}^n$ . Выберем на нем произвольную точку  $x$  и рассмотрим  $V(x) = V_{\mathbb{R}^n}(x) \cap M$ . Допустим,

$$\exists f \in C^1 :: V(x) \xleftrightarrow{f} \mathbb{R}^k \text{ (или } \mathbb{H}^k).$$

Тогда  $M$  — гладкое подмногообразие  $\mathbb{R}^n$ , а  $f$  — локальная карта многообразия. Набор всех карт называется атласом.  $t \in \mathbb{R}^k$  — локальные координаты в  $V$ .

Атлас :  $A(M) = \{(\varphi_k, V_k)_k\}$  — все окрестности и карты на них.

Если

$$\exists x \in M :: V \leftrightarrow \mathbb{H}(\mathbb{H} = \{x \in \mathbb{R}^k \mid x^1 \leq 1\},$$

тогда это многообразие с краем. Край обычно обозначается как  $\partial M$ .

По идее, в атлас ещё надо включать информацию, карта на  $\mathbb{R}^k$  или на  $\mathbb{H}^k$ . Так что

$$A(M) = \{(\mathbb{H}^k, \varphi_i, V_i)_i\} \cup \{(\mathbb{R}^k, \varphi_j, V_j)_j\}$$

<sup>1</sup> $o(\|h\|)$

<sup>2</sup>я же тот ещё велосипедостроитель?

Теперь про ориентацию.

**Определение 6.** Две карты называются согласованными, если отображение  $t_1 \mapsto x \in V_1 \cap V_2 \mapsto t_2$  имеет положительный якобиан.

**Определение 7.** Если все карты попарно согласованы, то атлас называется ориентирующим. Многообразие тогда называется ориентированным.

Представить все это проще всего на примере города, покрытого точками сотовой связи. Пересечение границы области покрытия одной вышки не приводит к потере связи.

Нетрудно понять, что ориентирующих атласов много. Город может покрывать хорошее количество сотовых операторов.

**Определение 8.** Атласы эквивалентны, если составленный из них атлас — тоже ориентирующий.

**Утверждение 2.** Если многообразие связно, то они линейно связно.

**Утверждение 3.** Классов эквивалентности атласов для связного многообразия — два.

▼ (??)

Пусть какая-нибудь точка  $M$  содержится в пересечении двух карт из разных атласов.

Пусть в её окрестности репараметризация между атласами происходит с положительным якобианом. До любой другой точки можно добраться по цепочке карт из одного атласа (из линейной связности).

Так что в её окрестности переход между атласами происходит с тем же знаком, что и в окрестности исходной точки. От выбора карт по дороге ничего не зависит, так как они из одного атласа.

▲

**Определение 9.** Пусть на  $M$  задан ориентирующий атлас. Тогда сужение этого атласа на край задаёт ориентацию края.

А теперь минутка конкретики.

**Определение 10.** Поверхность (регулярная) — связное (?) подмногообразие  $\mathbb{R}^3$  с рангом карт 2.

**Утверждение 4.** Ориентация на поверхности задаётся непрерывным векторным полем нормалей. «Сторона» поверхности задаётся им же.

$$n = \frac{r_u \times r_v}{|r_u \times r_v|}$$

▼

Связка бананов. Бананы тут ни при чём, но они кончились.

▲

*Замечание 1.* С кривыми наверное тоже стоит иметь дело, как с многообразиями, но вот тут (?). Дальше я так буду делать, но не очень законно.

## Билет № 42: Интеграл второго рода

Здесь всюду  $ds$  — мера на многообразии.

**Определение 1.** Интеграл второго рода по кривой  $\Gamma$  от векторного поля  $F$  определяется, как

$$\int_{\Gamma} \langle F, \tau \rangle ds$$

**Определение 2.** Интеграл второго рода по поверхности  $M$  от векторного поля  $F$  определяется, как

$$\int_{\Gamma} \langle F, n \rangle ds$$

**Определение 3** (Касательное пространство в точке  $x$ ). Пусть  $M$  — гладкое многообразие. Допустим,  $\varphi_i$  — карта в  $V(x)$ . Тогда

$$T_x M = (d\varphi_i(x))(\mathbb{R}^k)$$

Кокасательное пространство — сопряжённое к нему. Собственно, пространство линейных форм, действующих из  $T_x M$ .

**Определение 4.** Дифференциальная форма  $p$ -го порядка на многообразии  $M$  в точке  $x$  — кососимметрическая линейная функция

$$\omega^p: \underbrace{T_x M \times \cdots \times T_x M}_p \rightarrow \mathbb{R} \in (T_x^* M)^p$$

Умножение векторных пространств тут на самом деле тензорное, как я понял, так что очевидно следующее

**Утверждение 1.**  $\omega^p$  разложится по базису  $\bigwedge_{i_k} dx^{i_k} \in (T_x^* M)^p$

А ещё  $(T_x M)^p$  надо бы обозначать как-то так, подчёркивая, что это внешняя степень:  $\Lambda^p(T_x M)$

**Пример 1.** Поскольку эта ерунда косокоммутативна, надо думать что засунуть в базис. Вот давайте все для  $\mathbb{R}^3$  напомним.

$$\begin{aligned}\omega^1 &= a_x dx + a_y dy + a_z dz \\ \omega^2 &= a_{yz} dy \wedge dz + a_{zx} dz \wedge dx + a_{xy} dx \wedge dy \\ \omega^3 &= a_{xyz} dx \wedge dy \wedge dz\end{aligned}$$

⌘ <понять меры Хаара. Когда-нибудь...+>

Положим, все формы имеют гладкие коэффициенты. Тогда пока интеграл от гладкой дифференциальной формы на многообразии определим так:

**Определение 5.** Пусть  $M$  — простое  $n$ -мерное многообразие (покрывается одной картой  $f: D \rightarrow M$ ),  $u \in D$ , а  $\omega^n$  — дифференциальная форма с коэффициентами  $a_{i_1, \dots, i_n}(x)$ . Давайте её поподробней напишем

$$\omega = \sum_{i_1 < \dots < i_n} a_{i_1, \dots, i_n}(x) dx^{i_1} \wedge \dots \wedge dx^{i_n}$$

Тогда можно написать такое определение:

$$\int_M \omega^n := \int_D a_{i_1, \dots, i_n}(x) \bigwedge_{j=1}^n dx^{i_j} := \int_D a_{i_1, \dots, i_n}(f(u)) \frac{\partial x^{i_1 \dots i_n}}{\partial u^{i_1 \dots i_n}} d\lambda_n(u)$$

Здесь на самом деле обычный интеграл Римана, все функции под интегралом непрерывны.

*Замечание 1.* Здесь нужно и можно вспомнить, что в интеграле 1 рода был  $\sqrt{g(u)} = \left| \left( \frac{\partial x}{\partial u} \right)^T \frac{\partial x}{\partial u} \right|$ . Те есть, корень из суммы квадратов тех миноров, что здесь.

Общее определение требует понимания разбиения единицы, а я пока так не умею.

Теперь минутка конкретики

**Утверждение 2.** Пусть  $F = (P, Q, R)$ ,  $\omega_F^1 = P dx + Q dy + R dz$ . Положим,  $G$  — кривая (одномерное многообразие). Тогда

$$\int_G \langle F, \tau \rangle ds = \int_G \omega_F^1$$

▼

Заметим, что  $ds = |r'| dt$ , тогда  $\tau ds = (dx, dy, dz)$ . Кажется, всё.

▲

**Утверждение 3.** Пусть  $\omega_F^1$  точна, то есть  $\omega = d\Phi$ . Тогда

$$\int_G \omega_F^1 = \Phi(B) - \Phi(A).$$

Физический смысл этого дела — работа.

**Утверждение 4.** Пусть  $M$  — 2-мерная гадкая ориентируемая поверхность,  $F = (P, Q, R)$ ,  $\omega_F^2 = P dy \wedge dz + Q dz \wedge dx + R dx \wedge dy$ . Тогда

$$\int_M \omega_F^2 = \int_M \langle F, n \rangle ds$$

▼

Пусть  $N = (A, B, C)$ .  $dS$  можно расписать получше.

$$L = \frac{\partial r}{\partial(u, v)} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial v} \\ \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial v} \\ \frac{\partial z}{\partial u} & \frac{\partial z}{\partial v} \end{pmatrix}$$

При умножении на транспонированную воспользуемся известной формулой с суммой миноров:

$$g = L^T L = I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 = A^2 + B^2 + C^2 \Rightarrow dS = \sqrt{g} = |N|$$

Тогда  $F n dS = (PA + QB + RC) du$ . А теперь смотрим на определение 2.42.5 и понимаем что там ровно то же самое.

▲

### Билет № 43: Дифференцирование векторных полей

по методичке Лодкина

### Билет № 44: Формула Грина

**Теорема 1.** Пусть  $D$  — связное двумерное ориентируемое гладкое подмногообразие  $\mathbb{R}^2$  с краем,  $\omega = P dx + Q dy$  — гладкая дифференциальная форма. Тогда

$$\int_{\partial D} \omega = \iint_D \left( \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) dx \wedge dy$$

□ Много пунктов. Сначала разбить на области типа  $y$  (с вертикальными краями). И ещё занулить  $P$ , например. А потом складывать разные случаи, пользуясь тем, что по вертикальным краям интеграл обратиться в ноль.

А потом сложить это с областями типа  $x$ . ■

### Билет № 45: Классическая формула Стокса

**Теорема 1.** Пусть  $M$  — компактная ориентируемая поверхность в  $\mathbb{R}^3$  с краем,  $F$  — гладкое векторное поле. Тогда

$$\iint_M \langle \operatorname{rot} F, n \rangle dS = \oint_{\partial M} \langle F, \tau \rangle ds$$

### Билет № 46: Формула Гаусса-Остроградского

**Теорема 1.** Пусть  $V$  — компактное тело в  $\mathbb{R}^3$  с гладкой границей (гладким подмногообразием  $\mathbb{R}^3$ ). Нормаль выберем «наружу». Тогда

$$\oint_M \langle F, n \rangle dS = \iiint_V \operatorname{div} F dV$$

### Билет № 47: Физический смысл дивергенции и ротора

Дивергенция — удельный (по объему) поток через бесконечно малую поверхность.

## Глава 3: Анализ Фурье $\langle \times \rangle$

### Билет № 50: Гильбертово пространство. $\mathcal{L}_2$

**Определение 1.** Пусть  $H$  — линейное пространство над полем  $\mathbb{C}$ . Введём на нём (эрмитово) скалярное произведение, связанную с ним норму и метрику. Допустим, оно полно по введённой метрике. Тогда  $H$  — гильбертово пространство.

*Замечание 1.* Если полноты нет, то пространство называется предгильбертовым.

**Утверждение 1.** Скалярное произведение — непрерывно.

**Пример 1.** Пусть  $(X, \mu)$  — пространство с мерой. Рассмотрим пространство  $\tilde{L}$

$$\tilde{L} := \left\{ f \mid f: X \rightarrow \mathbb{C}, \text{ измерима, } \int_X |f|^2 d\mu < \infty \right\}$$

Скалярное произведение зададим так:

$$\langle f, g \rangle = \int_X f \cdot \bar{g} d\mu$$

Введем теперь отношение эквивалентности  $f \sim g := f = g$  п.в. . Тогда  $\mathcal{L}_2 = \tilde{L} / \sim$ .

**Теорема 2.**  $\mathcal{L}_2$  полно по мере, введённой выше.

### Билет № 51: Ортогональные системы. Ряд Фурье в гильбертовом пространстве.

**Определение 1.**  $\delta_{ij} \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$

**Определение 2.** Пусть  $H$  — гильбертово. Рассмотрим  $f_1, \dots, f_n \in H$ . Допустим,  $\langle f_i, f_j \rangle = \delta_{ij}$ . Тогда  $(f_i)$  — ортогональная система.

**Теорема 1** (Пифагора  $\langle \sim \rangle$ ). Пусть  $(f_i)$  — ортогональная система. Допустим,  $f = \sum_k f_k$ . Тогда

$$\|f\|^2 = \sum_k \|f_k\|^2$$

**Определение 3.** Пусть  $(e_i)$  — ортогональная система,  $f \in H$ . Тогда

$$c_n = \left\langle f, \frac{e_n}{\|e_n\|} \right\rangle \text{ — коэффициенты Фурье } f$$
$$f = \sum_k c_k e_k \text{ — ряд Фурье } f$$

**Теорема 2** (Неравенство Бесселя). Пусть  $f \in H$ ,  $(e_i)$  — ортогональная система. Тогда

$$\sum_n |c_n|^2 \|e_n\|^2 \leq \|f\|^2$$

**Определение 4.** Пусть  $(e_i)$  — ортогональная система. Допустим

$$\forall f \in \mathcal{L}_2 :: f \sim \sum_n c_n e_n$$

Тогда  $(e_i)$  — полная система.

**Утверждение 3.** Разложение в ряд Фурье по полной ортогональной системе — единственно.

**Билет № 52: Тригонометрические системы****Определение 1.**  $\mathcal{L}_2^{2\pi} = \mathcal{L}_2((0; 2\pi), \mu) \cap \{2\pi\text{-периодичные функции}\}.$ **Утверждение 1.**  $1, \cos x, \sin x, \cos 2x, \dots$  — ортогональная система**Утверждение 2.**  $1, e^x, e^{2x}, \dots$  — ортогональная система**Теорема 3.** Тригонометрические системы выше — полны.

□ (?) Вообще, тут большой кусок теории. ■

**Определение 2.** Будем понимать

$$\sum_{-\infty}^{\infty} a_n := \text{V. p.} \sum_{-\infty}^{\infty} a_n = \lim_{N \rightarrow +\infty} \sum_{-N}^N a_n$$

**Утверждение 4.** Коэффициенты разложения по синусам и косинусам:

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos nx \, dx \quad (n \geq 1)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin nx \, dx \quad (n \geq 1)$$

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \, dx$$

$$\tilde{a}_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \, dx = 2a_0$$

$$f(x) \sim a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos kx + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \sin kx$$

**Утверждение 5.** Коэффициенты разложения по экспонентам:

$$c_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) e^{-inx} \, dx$$

$$f(x) \sim \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{ikx}$$

**Билет № 53: Ядро Дирихле. Лемма Римана-Лебега****Определение 1** (Ядро Дирихле).  $\mathcal{D}_n(x) := \sum_{-n}^n e^{ikx}$ **Лемма 1** (Свойства ядра Дирихле).

$$1. \mathcal{D}_n(-x) = \mathcal{D}_n(x)$$

$$2. \mathcal{D}_n(x) = \frac{\sin(n + 1/2)x}{\sin \frac{x}{2}}$$

3. всякие следствия отсюда

**Определение 2** (Ядро Фейера).  $\mathcal{F}_n(x) := \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \mathcal{D}_k(x)$ **Лемма 2** (Свойства ядра Фейера).

$$1. \mathcal{F}_n(-x) = \mathcal{F}_n(x)$$

$$2. \mathcal{F}_n(x) = \frac{1}{n} \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{nx}{2}\right)}{\sin^2 \frac{x}{2}}$$

3. всякие следствия отсюда



**Лемма 3** (Римана-Лебега). Пусть  $f \in L(\mathbb{R})$ . Тогда

$$\begin{aligned}\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \sin nx \, x &\xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 \\ \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \cos nx \, x &\xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 \\ \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-inx} \, x &\xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0\end{aligned}$$

**Билет № 54: Теорема Дини о поточечной сходимости**

**Теорема 1** (Дини). Пусть  $f \in L_2^\pi$ ,  $x \in \mathbb{R}$ . Допустим,  $f$  удовлетворяет условию Дини:

$$\exists L \in \mathbb{C}, \delta > 0 :: u \in L((0; \delta)), u(t) = \frac{f(x+t) + f(x-t) - 2L}{t}$$

Тогда

$$S_n(x) = \sum_{k=-n}^n c_n e^{ikx} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} L$$

**Утверждение 2.** Частные случаи условия Дини:

1.  $\exists$  конечные  $f(x \pm 0)$ ,  $f'(x \pm 0)$ . При этом  $L = \frac{1}{2}(f(x+0) + f(x-0))$ .
2.  $f$  непрерывна в  $x$ ,  $\exists$  конечные  $f'(x \pm 0)$ . При этом  $L = f(x)$ .
3.  $f$  дифференцируема в  $x$ . При этом  $L = f(x)$ .

**Билет № 55: Свойства коэффициентов Фурье**

**Обозначение.**  $\hat{f}(n) := c_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) e^{-inx} \, dx$

**Утверждение 1.**  $f \in L_2^{2\pi} \Rightarrow \hat{f}(n) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$

**Утверждение 2.** Пусть  $\exists f' \in L_2^{2\pi}$ . Тогда

- $\hat{f}'(n) = in \hat{f}(n)$
- $\hat{f}(n) = o\left(\frac{1}{n}\right)$ ,  $n \rightarrow \infty$

**Утверждение 3.** Пусть  $\exists f^{(p)} \in L_2^{2\pi}$ . Тогда

- $\widehat{f^{(p)}}(n) = (in)^p \cdot \hat{f}'(n)$
- $\hat{f}(n) = o\left(\frac{1}{n^p}\right)$ ,  $n \rightarrow \infty$

**Утверждение 4.** Пусть  $c_n = O\left(\frac{1}{n^{p+2}}\right)$ . Тогда  $\exists \varphi \in C_{2\pi}^p :: \varphi \sim f$ .

**Билет № 56: Сходимость рядов Фурье..**

$$1^\circ f \in L_1^{2\pi} \Rightarrow \forall \Delta \subset [-\pi, \pi] :: \int_{\Delta} f(x) \, dx = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \hat{f}(n) \int_{\Delta} e^{inx} \, dx.$$

$$2^\circ f \in L_1^{2\pi} \Rightarrow c_n \text{ определены.}$$

$$3^\circ f \in L_2^{2\pi} \Rightarrow \|S_n - f\| \rightarrow 0.$$

$$4^\circ f \in C^{(p)} \Rightarrow c_n \text{ быстро убывают.}$$

$$5^\circ c_n \text{ быстро убывают} \Rightarrow f \in C^{(p)}.$$

$$6^\circ \text{ теорема Дини } \textcolor{blue}{3.54.1}$$

$$7^\circ \text{ теорема Фейера } \textcolor{blue}{3.56.1}$$

**Теорема 1** (Фейера). Пусть  $f \in C^{2\pi}$ . Тогда  $\sigma_n \xrightarrow{\mathbb{R}} f$ , где  $\sigma_n = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} S_k$ . (сходимость по Чезаро).

### Билет № 57: Преобразование Фурье

**Определение 1.** Пусть  $f \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R})$ . Тогда

$$\widehat{f}(s) := \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-isx} dx$$

1.  $|\widehat{f}(s)| \leq \frac{1}{2\pi} \|f\|_1$ .
2.  $\widehat{f}(s) \in C^0$ .
3.  $(g(x) = x^n f(x) \in \mathcal{L}_1) \Rightarrow \widehat{f}(s) \in C^{(n)}$ .
4.  $\widehat{f}(s) \xrightarrow{s \rightarrow \infty} 0$ .
5.  $(f \in C^{(p)}, f^{(p)} \in \mathcal{L}_1) \Rightarrow \widehat{f}(s) = o\left(\frac{1}{|s|^p}\right)$ .
6.  $f \in \mathcal{L}_1, a \in \mathbb{R}, g(x) = f(x-a) \Rightarrow \widehat{g}(s) = e^{-isa} \widehat{f}(s)$
7.  $f, g \in \mathcal{L}_1$ . Тогда

$$\widehat{f * g}(s) = 2\pi (\widehat{f}(s) \cdot \widehat{g}(s))$$

8. Интегральная формула Фурье [3.57.1](#)

**Теорема 1** (формула восстановления Дини). Пусть  $f \in \mathcal{L}_1(\mathbb{R})$ ,  $x \in \mathbb{R}$ ,  $L \in \mathbb{C}$ <sup>1</sup>. Допустим  $f$  удовлетворяет условию Дини в точке  $x$  с константой  $L$ . Тогда

$$\check{\widehat{f}}(x) = L$$

Для непрерывных функций

$$f(x) = \text{V. p.} \int_{-\infty}^{+\infty} \widehat{f}(s) e^{isx} dx$$

### Билет № 58: Решение уравнения теплопроводности

Само уравнение теплопроводности выглядит так:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

Но к нему ещё есть пара начальных условий:

$$\begin{aligned} u(x, 0) &= f(x) \\ f &\in \mathcal{L} \quad f \in C_x^2 \end{aligned}$$

⟨✂⟩: <+решить что-ли..+>

В итоге получится что-то вроде

$$u(x, t) = \frac{1}{2a\sqrt{\pi t}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\frac{(x-y)^2}{4a^2 t}\right) \cdot f(y) dy$$

---

<sup>1</sup>Тут по идее все можно в  $\mathbb{C}$

# Глава А: Обозначения

## Обозначения с лекции

$a := b$  — определение  $a$ .

$\bigsqcup_k A_k$  — объединение дизъюнктивных множеств.

$\mathcal{A}$  Алгебра множеств

## Нестандартные обозначения

$\langle \times \rangle$  — ещё правится. Впрочем, относится почти ко всему.

$\square \cdots \blacksquare$  — начало и конец доказательства теоремы

$\blacktriangledown \cdots \blacktriangle$  — начало и конец доказательства более мелкого утверждения

$\langle \smile \rangle$  — кривоватая формулировка

$\langle \text{:set aflame} \rangle$  — набирающему зело не нравится билет

$\langle +\text{что-то}+ \rangle$  — тут будет **что-то**, но попозже

$a .. b$  —  $[a; b] \cap \mathbb{Z}$

$\equiv$  — штуки эквивалентны. Часто используется в этом смысле в определениях, когда вводится два разных обозначения одного и того же объекта.

$::$  — В кванторах, «верно, что»

$\mathcal{A}_\sigma$  — Сигма-алгебра множеств

$f: A \leftrightarrow B$  — биекция