Теоремы по матану, семестр 4

8 апреля 2018 г.

Содержание

1 Характеризация измеримых функций с помощью ступенчатых (формулировка). Следствия

$(X, \mathbb{A}, \mu)$ — пространство с мерой.
f — измеримая функция на X, $\forall x\ f(x) \geq 0$. Тогда $\exists$ ступенчатые функции f_n, такие что:

1. $\forall x\ 0 \leq f_n(x) \leq f_{n+1}(x) \leq f(x)$.

2. $f_n(x)$ поточечно сходится к $f(x)$.

Следствие 1:
$f : X \to \overline{\mathbb{R}}$ измеримая. Тогда $\exists$ ступенчатая $f_n : \forall x : lim f_n(x) = f(x)$ и $|f_n(x)| \leq |f(x)|$.
Доказательство:

1. Рассмотрим $f = f^+ - f^-. f^+ = max(f, 0), f^- = max(-f, 0)$. Срезки измеримы: $E(f^+ < a) = E(f < a) \cap E(0 < a)$, при этом f и $g \equiv 0$ измеримы (f^- измерима аналогично).

2. Срезки измеримы и неотрицательны, тогда по теореме существуют ступенчатые функции $f_n^+ \to f^+, f_n^- \to f^-$. Тогда и $f_n^+ - f_n^-$ это ступенчатая функция, при этом по свойству пределов: $f_n^+ - f_n^- \to f^+ - f^- = f$. Неравенство с модулем верно при правильных эпсилон-неравенствах.

Следствие 2:
f, g — измеримые функции. Тогда fg – измеримая функция. При этом считаем, что $0 \cdot \infty = 0$.
Доказательство:

1. Рассмотрим $f_n \to f : |f_n| \leq |f|, g_n \to g : |g_n| \leq |g|$ из первого следствия. Тогда $f_n g_n \to fg$ и fg измерима по теореме об измеримости пределов и супремумов (произведение ступенчатых функций – ступенчатая функция, значит, измеримая)

Следствие 3:
f, g — измеримые функции. Тогда $f + g$ – измеримая функция. При этом считаем, что $\forall x$ не может быть, что $f(x) = \pm\infty, g(x) = \mp\infty$
Доказательство:
Доказывается как следствие 2.

2 Измеримость монотонной функции

Пусть $E \subset R^m$ — измеримое по Лебегу, $E' \subset E, \lambda_m(E \setminus E') = 0, f : E \to \mathbb{R}$. Пусть сужение $f : E' \to R$ непрерывно. Тогда f измерима на E.
Доказательство:

1. $E(f < a) = E'(f < a) \cup e(f < a), e := E \setminus E', \lambda_m(e) = 0$.
2. $E'(f < a)$ открыто в E', так как f непрерывна. Поэтому $E' = G \cap E' \Rightarrow$, где G — открытое в E множество. Значит, $E'(f < a)$ — измеримо по Лебегу, так как оно является борелевским.
3. Но и $e(f < a)$ измеримо, так $\lambda_m(e) = 0$, следовательно $E(f < a)$ измеримо как объединение измеримых множеств

Следствие:
$f :< a, b >\to \mathbb{R}$ монотонна. Тогда f измерима.
Доказательство:
Множество разрывов монотонной функции НБЧС множество, поэтому можно воспользоваться доказанной теоремой.

3 Теорема Лебега о сходимости почти везде и сходимости по мере

(X, a, μ) - пространство с мерой, $\mu \cdot X < +\infty$
$f_n, f : X \to \overline{R}$ - п.в. конечны, измеримы
$f_n \to f$ (поточечно, п.в.)
Доказательство:

1. подменим значения f_n и f на некотором множестве меры 0 так, чтобы сходимость $f_n \to f$ была всюду. (Так можно сделать. Действительно, $f_n \to f$ на $X \setminus e$, $\mu e = 0$
f_n - конечно на $X \setminus e_n$,
f - конечно на $X \setminus e_0$.
Тогда на $(X \setminus \bigcup\limits_{n=0}^{+\infty} e_n)$ функции конечны и есть сходимость $f_n \to f$. По свойствам меры $\mu \bigcup\limits_{n=0}^{+\infty} e_n = 0$. Тогда определим на $\bigcup\limits_{n=0}^{+\infty} e_n$ $f_n = f = 0$. Это очевидно даст нам необходимую конечность и поточечную сходимость.)

2. (частный случай) $f_n \to f \equiv 0$. Тогда пусть $\forall x f_n(x)$ - монотонно (по n). $|f_n(x)|$ - убывает с ростом n и $X(|f_n| \geq \epsilon) \supset X(|f_{n+1}| \geq \epsilon)$. А также $\bigcap\limits_{n=0}^{+\infty} X(|f_n| \geq \epsilon) = \emptyset$.
$$\begin{cases} \mu X < +\infty \\ \ldots \supset E_n \supset E_{n+1} \supset \ldots \end{cases}$$
$\Rightarrow \mu E_n \to \mu \cup E_n$ - Th о непрерывности меры сверху.
$\Rightarrow \mu X(|f_n \geq \epsilon|) \to \mu\emptyset = 0$

3. (общий случай) $f_n \to f$. Рассмотрим $\phi_n(x) := \sup_{k \geq n} |f_k(x) - f(x)|$. Заметим свойства ϕ:
$$\begin{cases} \phi_n(x) \to 0 \\ \phi_n \downarrow_n \end{cases}$$
$X(|f_n - f| \geq \epsilon) \subset X(|\phi_n \geq \epsilon|) \Rightarrow$ по монотонности меры имеем $\mu X(|f_n - f| \geq \epsilon) \leq \mu X(\phi_n \geq \epsilon) \xrightarrow{part.case} 0$, ч.т.д.

4 Теорема Рисса о сходимости по мере и сходимости почти везде

(X, a, μ) - пространство с мерой
$f_n, f : X \to R$ - п.в. конечны, измеримы
$f_n \overset{\mu}{\Rightarrow} f$.
Тогда $\exists n_k \uparrow : f_{n_k} \to f$ п.в.
Доказательство: $\forall k \; \mu X(|f_n - f| \geq \frac{1}{k}) \overset{n \to +\infty}{\to} 0$
Тогда $\exists n_k : \forall n \geq n_k \mu X(|f_n - f| \geq \frac{1}{k}) < \frac{1}{2k}$ (можно считать $n_1 < n_2 < \ldots$)
Проверим $f_{n_k} \to f$ п.в. : $E_k := \bigcap j = k^{+\infty} X(|f_{n_j} - f| \geq \frac{1}{j})$
$E_1 \supset E_2 \supset E_3 \supset \ldots$
$E_0 := \bigcap k \in N E_k$.
$\mu E_k \geq \sum_{j=k}^{+\infty} \mu X(|f_{n_j} - f| \geq \frac{1}{j}) \geq \sum_{j=k}^{+\infty} \frac{1}{2^j} = \frac{1}{2^(k-1)}$ - конечно $\Rightarrow \mu E_k \to \mu E_0 \Rightarrow \mu E_0 = 0$ (т.к. $\mu E_k \to 0$).
Рассмотрим $X \notin E_0$, т.е. если $X \notin E_0$, то $\exists k : X \notin E_k$, тогда $\forall j \geq k |f_n(x) - f(x)| < \frac{1}{j}$ при $n \geq n_j$, т.е. $f_{n_k} \to f$, ч.т.д. Следствие: $f_n \Rightarrow f$ $|f_n| \leq g$ п.в. Док-во: Рассмотрим последовательность f_{n_k} где $f_{n_k} \to f$ п.в. и вдоль нее применим Th о двух городовых.

$$\begin{cases} f_{n_k}(x) \to f(x) \forall x \in X \setminus e_1 \\ |f_n(x)| \leq g(x) \forall x \in X \setminus e_2 \end{cases}$$

$\Rightarrow |f| \leq g$ на $(X \setminus e_1) \setminus e_2$

5 Простейшие свойства интеграла Лебега

5.1 Для определения (5)

1. $\int\limits_{\mathbb{X}} f$ не зависит от представления f как ступенчатой функции, то есть если f реализуется как $f = \sum\limits_k (\lambda_k \cdot \chi_{E_k})$ и как $f = \sum\limits_l (\alpha_l \cdot \chi_{G_l})$, интегралы по этим функциям равны

   Доказательство:

Выпишем общее разбиение для этих двух разбиений

Пусть $F_{ij} = E_i \cap G_j$

Тогда $f = \sum\limits_k (\lambda_k \cdot \chi_{E_k}) = \sum\limits_l (\alpha_l \cdot \chi_{G_l}) = \sum\limits_{i,j} (\lambda_i (= \alpha_j) \cdot \chi_{F_{i,j}})$

$\int f = \sum\limits_{i,j} (\lambda_i \cdot \mu F_{i,j}) = \sum\limits_i (\lambda_i \cdot \sum\limits_j (\mu F_{i,j})) = \sum\limits_i (\lambda_i \cdot \mu E_i) = \int f$ для первого разбиения

Аналогично для второго разбиения получаем

$\int f = \sum\limits_{i,j} (\lambda_i \cdot \mu F_{i,j}) = \sum\limits_j (\alpha_i \cdot \sum\limits_i (\mu F_{i,j})) = \sum\limits_j (\lambda_j \cdot \mu G_i) = \int f$ для второго разбиения, что и требовалось доказать

2. f, g -измеримые ступенчатые функции, $f \leqslant g$, тогда $\int\limits_{\mathbb{X}} f \leqslant \int\limits_{\mathbb{X}} g$

   Доказательство:

   Пусть $f = \sum\limits_k (\lambda_k \cdot \chi_{E_k})$, $g = \sum\limits_l (\alpha_l \cdot \chi_{G_l})$

   Аналогично доказательству предыдущей теоремы, строим общее ступенчатое разбиение

   Пусть $F_{ij} = E_i \cap G_j$

   Тогда $\int f = \sum\limits_{i,j} (\lambda_i \cdot \mu F_{i,j}) \leqslant \sum\limits_j (\alpha_j \cdot \mu F_{i,j}) = \int g$, что и требовалось доказать

5.2 Для окончательного определения

1. Монотонность $f \leqslant g \Rightarrow \int\limits_{\mathbb{X}} f \leqslant \int\limits_{\mathbb{X}} g$

   Доказательство:

   (a) $f, g \geqslant 0$, тогда доказательство тривиально (по свойствам супремума)

   (b) $\int\limits_{\mathbb{X}} f = \int\limits_{\mathbb{X}} f^+ - \int\limits_{\mathbb{X}} f^-$

   $\int\limits_{\mathbb{X}} g = \int\limits_{\mathbb{X}} g^+ - \int\limits_{\mathbb{X}} g^-$

Из того, что $\int\limits_{\mathbb{X}} f^+ \leqslant \int\limits_{\mathbb{X}} g^+$, а $\int\limits_{\mathbb{X}} f^- \geqslant \int\limits_{\mathbb{X}} g^-$ следует, что $\int\limits_{\mathbb{X}} f \leqslant \int\limits_{\mathbb{X}} g$

2. $\int\limits_{\mathbb{E}} 1 \cdot d\mu = \mu E$

   $\int\limits_{\mathbb{E}} 0 \cdot d\mu = 0$

   Очевидно из определения интеграла ступенчатой функции

3. $\mu E = 0$, f-измерима, тогда $\int\limits_{\mathbb{E}} f = 0$, даже если $f = \infty$ на $\mathbb{E}$

   Доказательство:

   (a) f-ступенчатая $\Rightarrow$ ограниченная

   $f = \sum\limits_{k=1}^{n} (\lambda_k \cdot \chi_{E_k})$, тогда $\int\limits_{\mathbb{E}} f = \sum \lambda_k \cdot \mu(E \cap E_k)$

   Но $\mu(E \cap E_k) = 0$ (так как $\mu E = 0$), тогда $\int\limits_{\mathbb{E}} f = 0$

   (b) f - измеримая, $f \geqslant 0$.

   $\int\limits_{\mathbb{E}} f = \sup(\int\limits_{\mathbb{E}} g)$, где $0 \leqslant g \leqslant f$, g - ступенчатая

   Тогда $\int\limits_{\mathbb{E}} f = \sup(0) = 0$

   (c) f - произвольная измеримая

   Тогда $\int\limits_{\mathbb{E}} f = \int\limits_{\mathbb{E}} f^+ - \int\limits_{\mathbb{E}} f^- = 0 - 0 = 0$

4. (a) $\int\limits_{\mathbb{E}} -f = -\int\limits_{\mathbb{E}} f$

   (b) $\forall c \in \mathbb{R} : \int\limits_{\mathbb{E}} (c \cdot f) = c \cdot \int\limits_{\mathbb{E}} f$

   Доказательство:

   (a) $(-f)^+ = f^-$

   $(-f)^- = f^+$

   Тогда $\int\limits_{\mathbb{E}} -f = \int\limits_{\mathbb{E}} (-f)^+ - \int\limits_{\mathbb{E}} (-f)^- = \int\limits_{\mathbb{E}} f^- - \int\limits_{\mathbb{E}} f^+ = -\int\limits_{\mathbb{E}} f$

(b) Пусть $c > 0$. Если $c < 0$, то по предыдущему случаю можем рассматривать для $-c < 0$. Если $c = 0$, то по предыдущей теореме $\int\limits_{\mathbb{E}}(0 \cdot f) = \int\limits_{\mathbb{E}} 0 = 0 = 0 \cdot \int\limits_{\mathbb{E}} f$

i. Пусть $f \geqslant 0$
$\int\limits_{\mathbb{E}}(c \cdot f) = \sup(\int\limits_{\mathbb{E}} g)$, где $0 \leqslant g \leqslant c \cdot f$, g - ступенчатая
Пусть $g = c \cdot \widetilde{g}$, тогда $\int\limits_{\mathbb{E}}(c \cdot f) = \sup(\int\limits_{\mathbb{E}}(c \cdot \widetilde{g}))$, где $0 \leqslant c \cdot \widetilde{g} \leqslant c \cdot f$, $\widetilde{g}$ - ступенчатая
Тогда $\int\limits_{\mathbb{E}}(c \cdot f) = \sup(\int\limits_{\mathbb{E}}(c \cdot \widetilde{g})) = \sup(c \cdot \int\limits_{\mathbb{E}} \widetilde{g}) = c \cdot \sup(\int\limits_{\mathbb{E}} \widetilde{g}) = c \cdot \int\limits_{\mathbb{E}} f$

ii. Если f - произвольная:
$\int\limits_{\mathbb{E}}(c \cdot f) = \int\limits_{\mathbb{E}}(c \cdot f)^+ - \int\limits_{\mathbb{E}}(c \cdot f)^- = \int\limits_{\mathbb{E}} c \cdot f^+ - \int\limits_{\mathbb{E}} c \cdot f^- = c \cdot \int\limits_{\mathbb{E}} f^+ - c \cdot \int\limits_{\mathbb{E}} f^- = c \cdot (\int\limits_{\mathbb{E}} f^+ - \int\limits_{\mathbb{E}} f^-) = c \cdot \int\limits_{\mathbb{E}} f$

5. Если существует $\int\limits_{\mathbb{E}} f d\mu$, то $|\int\limits_{\mathbb{E}} f| \leqslant \int\limits_{\mathbb{E}} |f|$

Доказательство:

$-|f| \leqslant f \leqslant |f|$

$\int\limits_{\mathbb{E}} -|f| \leqslant \int\limits_{\mathbb{E}} f \leqslant \int\limits_{\mathbb{E}} |f|$

$-\int\limits_{\mathbb{E}} |f| \leqslant \int\limits_{\mathbb{E}} f \leqslant \int\limits_{\mathbb{E}} |f|$

Тогда $|\int\limits_{\mathbb{E}} f| \leqslant \int\limits_{\mathbb{E}} |f|$

6. f - измеримая на $\mathbb{E}$, $\mu\mathbb{E} < \infty$

$a \leqslant f \leqslant b$, тогда $a \cdot \mu E \leqslant \int\limits_{\mathbb{E}} f \leqslant b \cdot \mu E$

Доказательство:

$a \leqslant f \leqslant b \Rightarrow \int\limits_{\mathbb{E}} a \leqslant \int\limits_{\mathbb{E}} f \leqslant \int\limits_{\mathbb{E}} b$

$a \cdot \int\limits_{\mathbb{E}} 1 \leqslant \int\limits_{\mathbb{E}} f \leqslant b \cdot \int\limits_{\mathbb{E}} 1$

$a \cdot \mu\mathbb{E} \leqslant \int\limits_{\mathbb{E}} f \leqslant b \cdot \mu\mathbb{E}$

Следствие:

Если f - Измеримая и ограниченная на $\mathbb{E}, \mu\mathbb{E} < \infty$, тогда f - суммируемая на $\mathbb{E}$

7. f - суммируемая на $\mathbb{E} \Rightarrow f$ почти везде конечная на $\mathbb{E}$ (то есть $f \in \alpha^0(\mathbb{E})$)

   Доказательство:

   (a) Пусть $f \geqslant 0$
   Пусть $f = +\infty$ на A и пусть $\mu A > 0$
   Тогда $\forall n \in \mathbb{N} : f \geqslant n \cdot \chi_A$
   Тогда $\forall n \in \mathbb{N} : \int\limits_{\mathbb{E}} f \geqslant n \cdot \int\limits_{\mathbb{E}} \chi_A = n \cdot \mu A \Rightarrow \int\limits_{\mathbb{E}} f = +\infty$

   (b) f любого знака
   Распишем $f = f^+ - f^-$, по предыдущему пункту f^+, f^- конечны почти везде $\Rightarrow f$ тоже конечно почти везде

6 Счетная аддитивность интеграла (по множеству)

$(X, \mathbb{A}, \mu)$ — пространство с мерой, $A = \bigsqcup\limits_{i=1}^{\infty} A_i -$ измеримы. $f : X \to \overline{\mathbb{R}} -$ изм., $f \geqslant 0$

Тогда: $$\int\limits_A f = \sum_{i=1}^{\infty} \int\limits_{A_i} f$$

Доказательство:

1. Для начала докажем это для ступенчатых функций. Пусть $f = \sum\limits_k (\lambda_k \cdot \chi_{E_k})$

$\int\limits_A f d\mu = \sum\limits_k (\lambda_k \cdot \mu(E_k \cap A)) = \sum\limits_k (\lambda_k \cdot (\sum\limits_i \mu(E_k \cap A_i))) = \sum\limits_i (\sum\limits_k (\lambda_k \cdot \mu(E_k \cap A_i))) = \sum\limits_i (\int\limits_{A_i} f)$

2. Докажем, что $\int\limits_A f \leqslant \sum\limits_i \int\limits_{A_i} f$
   (a) Рассмотрим $0 \leqslant g \leqslant f-$ ступенчатая. $\int\limits_A g = \sum\limits_i \int\limits_{A_i} g \leqslant \sum\limits_i \int\limits_{A_i} f$
   (b) Переходя к sup получаем желаемое

3. Теперь докажем, что $\int\limits_A f \geqslant \sum\limits_i \int\limits_{A_i} f$
   (a) $A = A_1 \sqcup A_2$
      i. Рассмотрим g_1, g_2 – ступенчатые такие, что $0 \leqslant g_i \leqslant f \cdot \chi_{A_i}$
      ii. Рассмотрим их общее разбиение $E_k: \; g_i = \sum\limits_k (\lambda_k^i \cdot \chi_{E_k})$
      iii. $g_1 + g_2$ – ступенчатая и $0 \leqslant g_1 + g_2 \leqslant f \cdot \chi_A$
      iv. $\int\limits_{A_1} g_1 + \int\limits_{A_2} g_2 \overset{lemma}{=} \int\limits_A (g_1 + g_2) \overset{iii}{\leqslant} \int\limits_A f$
      v. Поочерёдно переходя к sup по g_1 и g_2 получаем: $\int\limits_{A_1} f + \int\limits_{A_2} f \leqslant \int\limits_A f$
   (b) $\forall n \in \mathbb{N}$, что $A = \bigsqcup\limits_{i=1}^{n} A_i$ будем последовательно отщеплять последнее множество по (a)
   (c) $A = \bigsqcup\limits_{i=1}^{\infty} A_i$
      i. Фиксрируем $n \in \mathbb{N}$
      ii. $A = (\bigsqcup\limits_{i=1}^{n} A_i) \sqcup B$, где $B = \bigsqcup\limits_{i=n+1}^{\infty} A_i$
      iii. $\int\limits_A f \geqslant \sum\limits_{i=1}^{n} \int\limits_{A_i} f + \int\limits_B f \geqslant \sum\limits_{i=1}^{n} \int\limits_{A_i} f$

iv. Переходим к lim по n

<u>Следсвие 1:</u> $0 \leqslant f \leqslant g$ - измеримы и $A \subset B$ - измеримы $\Rightarrow \int\limits_A f \leqslant \int\limits_B g$

$\int\limits_B g \geqslant \int\limits_B f = \int\limits_A f + \int\limits_{B\setminus A} f \geqslant \int\limits_A f$

<u>Следствие 2:</u> f - суммируема на $A \Rightarrow \int\limits_A f = \sum\limits_i \int\limits_{A_i} f$

Достаточно рассмотреть срезки f^+ и f^-

<u>Следствие 3:</u> $f \geqslant 0$ - изм. $\delta : \mathbb{A} \to \overline{\mathbb{R}}(A \longmapsto \int\limits_A f d\mu) \Rightarrow \delta$ - мера

7 Теорема Леви

$(X, \mathbb{A}, \mu)$, $f_n \geqslant 0$ - изм.
$f_1(x) \leqslant ... \leqslant f_n(x) \leqslant f_{n+1}(x) \leqslant ...$ при почти всех x
$f(x) = \lim\limits_{n\to\infty} f_n(x)$ при почти всех x (считаем, что при остальных $x : f \equiv 0$)

<u>Тогда:</u> $\lim\limits_{n\to\infty} \int\limits_X f_n(x) d\mu = \int\limits_X f(x) d\mu$

<u>Доказательство:</u>
$N.B. \int\limits_X f_n \leqslant \int\limits_X f_{n+1} \Rightarrow \exists \lim$
f - измерима как предел последовательности измеримых функций

1. $\leqslant$

   Очевидно $f_n \leqslant f$ при п.в $x \Rightarrow \int\limits_X f_n \leqslant \int\limits_X f$. Делаем предельный переход по n

2. $\geqslant$

   (a) Логичная редукция: $\lim\limits_{n\to\infty} \int\limits_X f_n(x) \geqslant \int\limits_x g$, где $0 \leqslant g \leqslant f$ - ступенчатая

   (b) Наглая редукция: $\forall c \in (0,1) : \lim \int\limits_X f_n(x) \geqslant c \cdot \int\limits_X g$

i. $E_n = \{x \mid f_n(x) \geqslant c \cdot g\}$. Очевидно $E_1 \subset ... \subset E_n \subset E_{n+1} \subset ...$

ii. $\bigcup\limits_{n=1}^{\infty} E_n = X$ т.к. $c < 1$

iii. $\int\limits_X f_n \geqslant \int\limits_{E_n} f_n \geqslant \int\limits_{E_n} g \Rightarrow \lim \int\limits_X f_n \geqslant c \cdot \lim \int\limits_{E_n} g = c \cdot \int\limits_X g$

iv. Последний знак равно обусловлен тем, что интеграл неотрицательной и измеримой функции по множеству - мера (см. следствие 3 предыдущей теоремы), и мы используем непрерывность меры снизу

8 Линейность интеграла Лебега

$f, g \geqslant 0$, измеримые
Тогда $\int\limits_{\mathbb{E}} (f+g) = \int\limits_{\mathbb{E}} f + \int\limits_{\mathbb{E}} g$
Доказательство:

1. Пусть f, g - ступенчатые, тогда у них имеется общее разбиение

   $f = \sum\limits_k (\lambda_k \cdot \chi_{E_k})$

   $g = \sum\limits_k (\alpha_k \cdot \chi_{E_k})$

   $\int\limits_{\mathbb{E}} (f+g) = \sum\limits_k (\lambda_k + \alpha_k) \cdot \mu E_k = \sum\limits_k \lambda_k \cdot \mu E_k + \sum\limits_k \alpha_k \cdot \mu E_k = \int\limits_{\mathbb{E}} f + \int\limits_{\mathbb{E}} g$, что и требовалось доказать

2. $f, g \geqslant 0$, измеримые

   Тогда $\exists h_n : 0 \leqslant h_n \leqslant h_{n+1} \leqslant f$, h_n ступенчатые

   $\exists \widetilde{h_n} : 0 \leqslant \widetilde{h_n} \leqslant \widetilde{h_{n+1}} \leqslant g$, $\widetilde{h_n}$ ступенчатые

   $\lim\limits_{n \to +\infty} h_n = f$

   $\lim\limits_{n \to +\infty} \widetilde{h_n} = g$

   $\int\limits_{\mathbb{E}} (h_n + \widetilde{h_n}) = \int\limits_{\mathbb{E}} h_n + \int\limits_{\mathbb{E}} \widetilde{h_n}$

$\int\limits_{\mathbb{E}}(h_n+\widetilde{h_n}) \to \int\limits_{\mathbb{E}}(f+g)$

$\int\limits_{\mathbb{E}} h_n \to \int\limits_{\mathbb{E}} f$

$\int\limits_{\mathbb{E}} \widetilde{h_n} \to \int\limits_{\mathbb{E}} g$

Тогда $\int\limits_{\mathbb{E}}(f+g) = \int\limits_{\mathbb{E}} f + \int\limits_{\mathbb{E}} g$, что и требовалось доказать

3. Если f, g - любые измеримые, распишем обе через срезки и докажем для них

9 Теорема об интегрировании плоложительных рядов

$u_n(x) \geq 0$ *почти всюду* на $\mathbb{E}$, тогда $\int\limits_{\mathbb{E}}(\sum\limits_{n=1}^{+\infty} u_n(x))d\mu(x) = \sum\limits_{n=1}^{+\infty}\int\limits_{\mathbb{E}} u_n(x)d\mu(x)$

<u>Доказательство:</u>

$S_N(x) = \sum\limits_{n=1}^{N} u_n(x)$; $S(x) = \sum\limits_{n=1}^{+\infty} u_n(x)$

1. S_N - возрастает к S при почти всех x $\xRightarrow{\text{Т. Леви}} \int\limits_{\mathbb{E}} S_N \xrightarrow[N\to+\infty]{} \int\limits_{\mathbb{E}} S = \int\limits_{\mathbb{E}}\sum\limits_{n=1}^{+\infty} u_n(x)$
2. С другой стороны $\int\limits_{\mathbb{E}} S_N = \int\limits_{\mathbb{E}}\sum\limits_{n=1}^{N} u_n = \sum\limits_{n=1}^{N}\int\limits_{\mathbb{E}} u_n(x)d\mu \xrightarrow[N\to+\infty]{} \sum\limits_{n=1}^{+\infty}\int\limits_{\mathbb{E}} u_n(x)d\mu$
3. Найденные пределы совпадают в силу единственности предела последовательности, что и требовалось доказать.

10 Теорема о произведении мер

$<\mathbb{X}, \alpha, \mu>, <\mathbb{Y}, \beta, \nu>$ - пространства с мерой
$\alpha \times \beta = \{A \times B \subset \mathbb{X} \times \mathbb{Y} : A \in \alpha, B \in \beta\}$

$m_0(A \times B) = \mu A \cdot \nu B$

Тогда:

1. m_0 - мера на полукольце $\alpha \times \beta$
2. μ, ν - σ-конечны $\Rightarrow m_0$ - σ-конечна

Доказательство:

1. Неотрицательность m_0 очевидна. Необходимо доказать счетную аддитивность
   Пусть $P = \bigsqcup\limits_{i=1}^{\infty} P_k$, где $P \in \alpha \times \beta$
   $P = A \times B$; $P_k = A_k \times B_k$
   Заметим, что:
   - $\chi_P(x, y) = \sum \chi_{P_k}(x, y)$, в силу дизъюнктности P_k ((x, y) входит максимум в одно множество из всех P_k)
   - $\chi_{A \times B}(x, y) = \chi_A(x) \cdot \chi_B(y)$, так как (x, y) $\in A \times B \Leftrightarrow x \in A$ И $y \in B$

   Воспользовавшись вышесказанным получим:
   $\chi_P(x, y) = \chi_{A \times B}(x, y) = \chi_A(x) \cdot \chi_B(y)$
   $\chi_P(x, y) = \sum \chi_{P_k}(x, y) = \sum \chi_{A_k \times B_k}(x, y) = \sum \chi_{A_k}(x) \cdot \chi B_k(y)$
   Имеем следующее равенство:
   $\chi_A(x) \cdot \chi_B(y) = \sum \chi_{A_k}(x) \cdot \chi B_k(y)$
   Проинтегрируем его по мере μ по x, затем по мере ν по y, получим:
   $\mu A \cdot \nu B = \sum \mu A_k \cdot \nu B_k$, то есть $m_0(P) = \sum m_0(P_k)$, что и требовалось доказать.

2. μ, ν - σ-конечны $\Rightarrow X = \bigcup\limits_{k=1}^{\infty} A_k$, где $\mu A_k < +\infty$; $Y = \bigcup\limits_{k=1}^{\infty} B_k$, где $\nu B_k < +\infty$

$X \times Y = \bigcup\limits_{i,j}(A_i \times B_j)$

$m_0(A_i \times B_j) = \mu A_i \cdot \nu B_j < +\infty$, так как $\mu A_i < +\infty$ и $\nu B_j < +\infty$

все $(A_i \times B_j) \in \alpha \times \beta$ по определению

Что и требовалось доказать.

11 Абсолютная непрерывность интеграла

$< \mathbb{X}, \alpha, \mu >$ - пространство с мерой
$f : X \to \overline{\mathbb{R}}$ - суммируема

Тогда $\forall \epsilon > 0 \ \exists \delta > 0 : \ \forall E$ – измеримое $\mu E < \delta \ |\int\limits_E f d\mu| < \epsilon$

Доказательство:
$X_n := X(|f| \geq n)$
$X_n \subset X_{n+1} \subset ...$
$\mu(\cap X_n) = 0$, т.к. f – суммируема

1. Мера : $(A \mapsto \int\limits_A |f|)$ непрерывна сверху, т.е. $\forall \ \epsilon \ \exists \ n_\epsilon \ \int\limits_{X_{n_\epsilon}} |f| < \epsilon/2$
2. Зафиксируем ϵ в доказываемом утверждении, возьмем $\delta := \frac{\epsilon/2}{n_\epsilon}$
3. $|\int\limits_E f d\mu| \leq \int\limits_E |f| = \int\limits_{E \cap X_{n_\epsilon}} |f| \ + \int\limits_{E \cap X^c_{n_\epsilon}} |f| \overset{*}{\leq} \int\limits_{X_{n_\epsilon}} |f| \ + \ n_\epsilon \cdot \mu(E \cap X^c_{n_\epsilon}) \overset{**}{<}$
   $\epsilon/2 + n_\epsilon \cdot \mu E < \epsilon/2 + n_\epsilon \cdot \frac{\epsilon/2}{n_\epsilon} < \epsilon$
   * - В первом слагаемом увеличили множество, во втором посмотрели на определние X_n, взяли дополнение, воспользовались 6-м простейшим свойством интеграла
   ** - Воспользовались непрерывностью сверху

11.1 Следствие

f - суммируема
e_n - измеримые множества

$\mu e_n \to 0 \Rightarrow \int\limits_{e_n} f \to 0$

12 Теорема Лебега о мажорированной сходимости для случая сходимости по мере.

$< \mathbb{X}, \mathbb{A}, \mu >$ – пространство с мерой,
f_n, f – измеримы,
$f_n \overset{\mu}{\Rightarrow} f$ (сходится по мере),
$\exists g : \mathbb{X} \to \overline{\mathbb{R}}$ такая, что:

- $\forall n$, для «почти всех» $x \quad |f_n(x)| \le g(x)$ (g – называется мажорантой)
- g - суммируемая

Тогда:

- f_n, f – суммируемы
- $\int\limits_{\mathbb{X}} |f_n - f| d\mu \to 0$
- $\int\limits_{\mathbb{X}} f_n \to \int\limits_{\mathbb{X}} f$ («уж тем более»)

Доказательство:

1. f_n – суммируема, так как существует мажоранта g
2. f – суммируема по теореме Рисса ($f_{nk} \to f$ почти везде, $|f_{nk}| \le g$, тогда $|f| \le g$ почти везде)
3. «уж тем более»:
   $|\int\limits_{\mathbb{X}} f_n - \int\limits_{\mathbb{X}} f| \le \int\limits_{\mathbb{X}} |f_n - f|$
   Допустим, что $\int\limits_{\mathbb{X}} |f_n - f| d\mu \to 0$ уже доказано.
   Тогда «уж тем более» очевидно.

4. Докажем основное утверждение:

   Разберем два случая:

   (a) $\mu\mathbb{X} < \infty$ Фиксируем $\epsilon \geq 0 \quad X_n := X(|f_n - f| \geq \epsilon)$

   $\mu X \to 0$ (так как $f_n \Rightarrow f$)

   $\int\limits_{\mathbb{X}} |f_n - f| = \int\limits_{X_n} |f_n - f| + \int\limits_{X_n^c} |f_n - f| \leq \int\limits_{X_n} 2g + \int\limits_{X_n^c} \epsilon < \epsilon + \epsilon\mu\mathbb{X}$

   (прим. $\int\limits_{X_n} 2g \to 0$ по след. к т. об абс. сходимости)

   (b) $\mu\mathbb{X} = \infty$

   Докажем «Антиабсолютную непрерывность» для g:

   $\forall\epsilon\ \exists A \subset \mathbb{X} \mid \mu A$ - конеч. $\int\limits_{X\setminus A} g < \epsilon$

   доказательство:

   $\int\limits_{\mathbb{X}} = \sup(\int\limits_{\mathbb{X}} g_k \mid 0 \leq g_k \leq g)$ (g_k – ступен.)

   $\exists g_n \ \int\limits_{\mathbb{X}} g - \int\limits_{\mathbb{X}} g_n < \epsilon$

   $A := supp\ g_n$ ($supp\ f :=$ замыкание $\{x \mid f(x) \neq 0\ \}$)

   $A = \bigcup\limits_{k \mid \alpha_k \neq 0} E_k$

   $g = \sum\limits_{kon} \alpha_k \mathcal{X}_{E_k}$ ($X = \bigsqcup E_k$)

   $\int\limits_{\mathbb{X}} g_n = \sum \alpha_k \mu E_k < +\infty$ (μA - конеч.)

   $\int\limits_{\mathbb{X}\setminus\mathbb{A}} g = \int\limits_{\mathbb{X}\setminus\mathbb{A}} g - g_n \leq \int\limits_{\mathbb{X}} g - g_n < \epsilon$

   Теперь докажем основное утверждение:

   $\int\limits_{\mathbb{X}} |f_n - f| = \int\limits_{\mathbb{A}} |f_n - f| + \int\limits_{\mathbb{X}\setminus\mathbb{A}} |f_n - f| \leq \int\limits_{\mathbb{A}} |f_n - f| + 2\epsilon < 3\epsilon$

   ($\int\limits_{\mathbb{A}} |f_n - f| \to 0$ по п. (a))

13 Теорема Лебега о мажорированной сходимости для случая сходимости почти везде.

$< \mathbb{X}, \mathbb{A}, \mu >$ – пространство с мерой,
f_n, f – измеримы,
$f_n \overset{\mu}{\Rightarrow} f$ **почти везде**,
$\exists g \mid \mathbb{X} \to \overline{\mathbb{R}}$ такая, что:

- $\forall n$, для «почти всех»x $|f_n(x)| \leq g(x)$ (g – называется мажорантой)
- g - суммируемая

<u>**Тогда:**</u>

- f_n, f – суммируемы
- $\int\limits_{\mathbb{X}} |f_n - f| d\mu \to 0$
- $\int\limits_{\mathbb{X}} f_n \to \int\limits_{\mathbb{X}} f$ («уж тем более»)

<u>Доказательство:</u>

1. «уж тем более» см. пред. теорему.
2. Докажем основное утверждение:

   $h_n(x) := \sup(|f_n - f|, |f_{n+1} - f|, \dots)$

   Заметим, что при фикс. x выпол. $0 \leq h_n \leq 2g$ почти везде

   $\lim\limits_{n \to +\infty} h_n = \overline{\lim\limits_{n \to +\infty}} |f_n - f| = 0$ почти везде

   $2g - h_n \uparrow,\ 2g - h_n \to 2g$ почти везде

   $\int\limits_{\mathbb{X}} (2g - h_n) d\mu \to \int\limits_{\mathbb{X}} 2g$ (по т. Леви)

   $\int\limits_{\mathbb{X}} 2g - \int\limits_{\mathbb{X}} h \Rightarrow \int\limits_{\mathbb{X}} h_n \to 0$

   $\int\limits_{\mathbb{X}} |f_n - f| \leq \int\limits_{\mathbb{X}} h_n \to 0$

14 Теорема Фату. Следствия.

$< \mathbb{X}, \mathbb{A}, \mu >$ – пространство с мерой
f_n, f – измеримы,
$f_n \geq 0$
$f_n \overset{\mu}{\Rightarrow} f$ «почти везде»,
$\exists C > 0 \; \forall n \; \int\limits_{\mathbb{X}} f_n d\mu \leq C$

Тогда:

- $\int\limits_{\mathbb{X}} f \leq C$

Доказательство:
$g_n := \inf(f_n, f_{n+1}, \dots) \quad (g_n \leq g_{n+1} \leq \dots)$
$\lim g_n = \underline{\lim}(f_n) = \textit{почти везде} = \lim f_n = f$ ($g_n \to f$ почти везде)
$\int\limits_{\mathbb{X}} g_n \leq \int\limits_{\mathbb{X}} f_n \leq C$
$\int\limits_{\mathbb{X}} f = \textit{по т. Леви} = \lim \int\limits_{\mathbb{X}} g_n \leq C$

14.1 Следствие 1

$f_n, f \geq 0$ – измер.
$f_n \overset{\mu}{\Rightarrow} f$
$\exists C \; \forall n \int\limits_{\mathbb{X}} f_n \leq C$
Тогда:

- $\int\limits_{\mathbb{X}} f \leq C$

Доказательство:
$\exists f_{n_k} \to f$ почти везде

14.2 Следствие 2

$f_n \geq 0$ – измер.
Тогда:

- $\int\limits_{\mathbb{X}} \underline{lim}(f_n) \geq \underline{lim}(\int\limits_{\mathbb{X}} f_n)$

<u>Доказательство:</u>
$\exists n_k \mid \int\limits_{\mathbb{X}} f_{n_k} \xrightarrow{k \to +\infty} \underline{\lim}_{n\to+\infty} \int\limits_{\mathbb{X}} f_n$
Рассмотрим g_{n_k} такое, что $g_{n_k} \uparrow$ и $g_{n_k} \to \underline{\lim} f$
Применяем теорему Леви к нер-ву $\int\limits_{\mathbb{X}} g_{n_k} \leq \int\limits_{\mathbb{X}} f_{n_k}$

$\int\limits_{\mathbb{X}} \underline{\lim} f \leq \underline{\lim} \int\limits_{\mathbb{X}} f_n$

15 Теорема о вычислении интеграла по взвешенному образу меры

15.1 Лемма

Пусть у нас есть $< X, \mathbb{A}, \mu >$ и $< Y, \mathbb{B}, \_ >$ и $\Phi : X \to Y$
Пусть $\Phi^{-1}(B) \subset \mathbb{A}$*(Кохась сказал, что это легко, и вроде это следует из предыдущих теорем)*
Для $\forall E \subset B$ и $\nu(E) := \mu(\Phi^{-1}(E))$
<u>Тогда:</u>
ν - мера на B, $\nu(E) = \int\limits_{\Phi^{-1}(E)} d\nu$
<u>Доказательство:</u>
Докажем по определению меры:

$$\nu(\bigsqcup E_i) = \mu(\Phi^{-1}(\bigsqcup E_i)) = \mu(\bigsqcup \Phi^{-1}(E_i) = \sum \mu\Phi^{-1}(E_i) = \sum \nu E_i$$

15.2 Следствие

Из этого следует что f - измерима относительно $B \Rightarrow f \odot \Phi$ — измерима относительно Γ

15.3 Теорема

Есть пространства $< X, \mathbb{A}, \mu >$ и $(Y, \mathbb{B}, \nu)$.

$\Phi : X \to Y; w \geq 0$ — измеримо
ν - взвешенный образ μ
Тогда:
Для $\forall f \geq 0$ - измеримо на Y, $f \odot \Phi$ - измерима(относительно μ)
$\int_Y f d\nu = \int_X f(\Phi(x)) * \omega(x) d\mu(x)$
Замечание: Тоже верно для f - сумм.
Доказательство:

- $f \odot \Phi$ - измерима(из леммы)
- Возьмем в качестве $f = \chi_E, E \in B$
  $(f \odot \Phi)(x) = \chi_{\Phi^{-1}(E)}$ - определение взвешенного образа меры
  $\nu(E) = \int\limits_{\Phi^{-1}(E)} \omega d\mu$ - доказали первый пункт
- – f - ступенчатая $\Rightarrow f = \sum \alpha_k * \chi_{E_k}$
  – $\int\limits_Y \sum \alpha_k * \chi_{E_k} d\mu = \sum \alpha_k \chi_{E_k} d\nu = /*firstcase*/ = \sum \alpha_k \int\limits_X \chi_{E_k}(\Phi(x)) * \omega(x) dx = \int\limits_X \sum \alpha_k \chi_{E_k}(\Phi(x)) * \omega(x) d\mu(x) = \int f \odot \Phi * \omega d\mu$

16 Критерий плотности

Есть пространство $< X, \mathbb{A}, \mu >$
ν - еще одна мера
$\omega \geq 0$ - измерима на X
Тогда:
ω - плотность ν относительно $\mu \Longleftrightarrow$ Для любого $A \in \mathbb{A} : \mu A * inf(\omega) \leq \nu(A) \leq \mu A * sup_A(\omega)$
Доказательство:

- $\Rightarrow$ - очевидно из стандартного свойства интеграла
- $\Leftarrow$
  – Достаточно доказать, что $\omega > 0$(когда $\omega = 0$, отсюда следуется что интеграл $= 0$ из оценок, что $\nu(E) = 0$)

– Давайте брать такие $A \subset X(\omega > 0)$, тогда $\nu A = \int\limits_A \omega(x) d\mu$

– Тогда для любого $A \in \mathbb{A}$ $A = A_1 \sqcup A_2$, где $A_1 \subset A(\omega > 0) \& A_2 \subset A(\omega = 0)$

– Получаем, что $\nu A = \nu A_1 + \nu A_2 = \int\limits_{A_1} \omega + 0 = \int\limits_{A_1} \omega + \int\limits_{A_2} \omega = \int\limits_A \omega$

– Пусть $q \in (0, 1)$ и $A_j := A(q^j \leq \omega(x) < q^{j-1}), j \in Z$. Получается, что $A = \bigsqcup_{j \in Z} A_j$

– Рассмотрим $q^j \mu A_j <= \nu A_j <= q^{j-1} * \mu A_j$ и $\nu A_j = \int\limits_{A_j} \omega d\mu$

– $q * \int\limits_A \omega d\mu = q * \sum \int\limits_{A_j} \leq \sum q^j * \mu A_j \leq \sum j * A_j = \nu(A) \leq 1/q * \sum q^j * \mu A_j \leq 1/q * \sum \int\limits_{A_j} \omega = 1/q * \int\limits_A \omega$

– $q * \int\limits_A \omega d\mu \leq \nu(A) \leq 1/q * \int\limits_A \omega d\mu$

– Устремим q к 1 и мы победили

17 Лемма о единственности плотности

$f, g \in L(x)$.
Пусть $\forall A$ - измерима и $\int\limits_A f = \int\limits_A g$.

Тогда:

$f = g$ почти везде

Следствие:

Плостность ν относительно μ определена однозначно с точностью до μ почти везде.

Доказательство:

- Вместо двух функций давайте рассмотрим одну $h = f - g$ и $\forall \int\limits_A h = 0$. Пусть $A_+ = X(h \geq 0)$ и $A_- = X(h < 0)$
- $\int\limits_{A_+} |h| = \int\limits_{A_+} h = 0$

$\int\limits_{A_-} |h| = -\int\limits_{A_-} h = 0$

- Пусть $X = A_+ \sqcup A_-$. Тогда $\int\limits_X |h| = \int\limits_{A_+} |h| + \int\limits_{A_-} |h| = 0 \Rightarrow h = 0$ почти везде.

18 Лемма о множестве положительности

Пусть пространство $< X, \mathbb{A} >$ и ϕ - заряд
Тогда:
$\forall A \in \mathbb{A} \exists B \subset A : \phi(B) \leq \phi(A)$, где B - множество положительности
Доказательство:

- Пусть $(\phi(A) \geq 0) \&\& (B = \emptyset) \rightarrow \phi(A) \geq 0$
- E - множество ϵ - положительности(МеП), если $\forall C \subset E$ - измеримого $\phi(C) \geq -\epsilon$
- **Утверждение:** Пусть E - МеП. Тогда для любого измеримого $C \subset E$ выполнено $\phi(C) \geq \phi(A)$
  1. Если A - МеП $\Rightarrow C = A$
  2. Пусть A - не МеП. Тогда существеут $c_1 \subset A : \phi(C_1) < -\epsilon$ и $\phi(A) = \phi(A_1) + \phi(C)$
     Тогда $A_1 = A - C_1$ и $\phi(A_1) > \phi(A)$
  3. A_1 - МеП $\Rightarrow$ хорошо
  4. Иначе повторяем тоже самое с C_2 и так далее пока не будет хорошо
  5. Процесс конечен так как все C_i дизьюнктны и $\phi(\bigsqcup C_i) \neq -\infty$.
- Построим B: C_1 - множество 1 положительности. $C_2 - 1/2$. Тогда $B = \cap C_i$ - МеП
- $\phi(B) = \lim\limits_{i \to \infty} \phi(C_i) \geq \phi(A)$

19 Теорема Радона—Никодима

Пусть есть пространство $(X, \mathbb{A}, \mu)$
ν - мера из $\mathbb{A}$
Обе меры конечные и $\nu \prec \mu$.
Тогда:
$\exists! f : X -> R^{\infty}$ (с точн до почти везде), которая является плотностью ν относительно μ и при этом $(f - \mu)$ суммируема
Доказательство:

- единственность - из леммы
- строим кандидата на роль f. $P = \{p(x) \geq 0, |\forall E : \int\limits_E p * d\mu \leq \nu(E)\}$

1. $P \neq \emptyset$ и $0 \in P$
2. $p1, p2 \in P \Rightarrow h = max(p_1, p_2) \in P$
   $\forall E \int\limits_E hd\mu = \int\limits_{E(p_1 \geq p_2)} hd\mu + \int\limits_{E(p_1 < p_2)} hd\mu = \int\limits_{E(p_1 \geq p_2)} p1 + \int\limits_{E(p_1 < p_2)} p_2 \leq \nu(E(p_1 \geq p_w)) + \nu(E(p_1 < p_2)) = \nu E$
   По индукции $max(p_1 ... p_n) \in P$
3. $I = sup\{\int\limits_X pd\mu | p \in P\}$
   $\exists$ последовательность $f_1 \leq f_2 \leq ... \in P : \int\limits_X f_n \to I$
4. Рассмотрим $p_1, p_2 ... : \int\limits_X p_n \to I$, а также $f_n = max(p_1 ... p_n) \in P$
5. Из предыдущих двух получаем, что $f = \lim f_n$ и $\int\limits_E = / * thLevi * / = \lim \int\limits_E f_n \leq \nu E$, а следовательно $\int\limits_X f = lim \int\limits_X f_n = I \leq \nu(X)$
6. Отлично, проверим, что f - плотность ν относительно μ.
   - Докажем, что это не так: $\exists E_0 : \nu E_0 > \int\limits_{E_0} f d\mu$
   - $\mu E_0 > 0$(иначе интеграл равено нулю и мера равна нулю из абстрактной непрерывности)

– Тогда μE_0 - конечна. Возьмем $a > 0 : \nu E_0 - \int\limits_{E_0} f d\mu > a * \mu E_0$

– Тут недостаточно термина мер, поэтому рассмотрим заряд $\phi(E) = \nu E - \int\limits_{E} f d\mu - a * \mu E$

– Пусть $\phi(E_0) > 0$. Возьмем МП $B \subset E_0 : \phi(B) \geq \phi(E_0) > 0$. Тогда $\nu(B) = \phi(B) + \int\limits_{B} f * d\mu + a * \mu B \geq \phi(B) > 0$

– Проверим, что $f + a * \chi_B \in P$. Тогда по определению $\int\limits_{E}(f + a * \chi_B) d\mu = \int\limits_{E \setminus B} F * d\mu + \int\limits_{E \cap B} f * d\mu + a * \mu(B \cap E) = / * E \leftrightarrow E \cap B * / = \int\limits_{E \setminus B} f + \nu(E \cap b) - \phi(E \cap B) \leq / * def\_class\_P\_and\_f \in P * / \leq \nu(E \setminus B) + \nu(E \cap B) - \phi(E \cap B) = \nu E - \phi(E \cap B) \leq / * \phi \geq 0 * / \leq \nu E$

– Проверим, что $\int_X f + a * \chi_B = I + a * \mu B > I$, что противоречит определению I

20 Лемма об оценке мер образов кубов из окрестности точки дифференцируемости

$\Phi : O \subset \mathbb{R}^m \to \mathbb{R}^m$
$a \in O, \Phi \in C^1(O)$
Возьмём $c > |\Phi^{'}(a)| \neq 0$
тогда $\exists \delta > 0 : \forall$ кубической ячейки $Q, Q \subset B(a, \delta), a \in Q$ выполняется $\lambda \Phi(Q) < c \cdot \lambda Q$
<u>Доказательство</u>
$\Phi(Q)$ измеримо, так как образ измеримого множества при гладком отображении измерим
$L := \Phi^{'}(a), L$ обратимо, так как $|L| \neq 0$.
$\Phi(x) = \Phi(a) + L(x - a) + o(x - a)$
$a + L^{-1}(\Phi(x) - \Phi(a) = x + o(x - a)$
Можем писать о малое, так как растяжение произошло не более чем в $|L^{-1}|$ раз, а $|L| \neq 0$

Пусть $\Psi(x) := a + L^{-1}(\Phi(x) - \Phi(a)$
$\forall \epsilon > 0 \exists B(a, \delta)$, такой, что при $x \in B(a, \delta) |\Psi(x) - x| < \dfrac{\epsilon}{\sqrt{m}} |x - a|$ (так как $\Psi(x)$ это почти x, только плюс $o(a - x)$)
$a \in Q \subset B(a, \delta)$, где Q - ку со стороной h
$x \in Q$, тогда $|a - x| < \sqrt{m} \cdot h$ (так как диагональ m-мерного куба со стороной h равна $\sqrt{m} \cdot h$)
Тогда $|\Psi(x) - x| < \epsilon h$
При $x, y \in Q$, $i \in \{1...m\}$
$|\Psi(x)_i - \Psi(y)_i| \leqslant |\Psi(x)_i - x_i| + |\Psi(y)_i - y_i| + |x_i - y_i| \leqslant |\Psi(x) - x| + |\Psi(y) - y| + h < (1 + 2\epsilon)h$
$\Psi(Q) \subset$ кубу со стороной $(1 + 2\epsilon)h$
$\lambda(\Psi(Q)) < (1 + 2\epsilon)^m \lambda Q$
Φ выражается через Ψ через сдвиги и линейные преобразования. Тогда $\lambda(\Phi(Q)) = |detL| \cdot \lambda\Psi(Q) \leqslant |detL| \cdot (1 + 2\epsilon)^m \cdot \lambda Q$
Возьмём ϵ так, чтобы $|detL| \cdot (1 + 2\epsilon)^m$ было меньше c. Тогда при таком ϵ
$\lambda(\Phi(Q)) < c \cdot \lambda Q$

21 Лемма «Вариации на тему регулярности меры Лебега»

$f : O \subset \mathbb{R}^m \to \mathbb{R}^m$
$A \subset O$, A - открыто.
$A \subset Q$(кубическая ячейка) $\subset \overline{Q} \subset O$, то есть граница A не лежит на границе O.
Тогда

$$\inf_{A \subset G \subset O, G - open\ set} (\lambda G \cdot \sup_G (f)) = \lambda A \cdot \sup_A f$$

<u>Доказательство</u>
Докажем, что левая часть $\geqslant$ и $\leqslant$ правой
$\geqslant$ очевидно, так как правая часть - нижняя граница для всего, встречающегося под inf
Докажем $\leqslant$

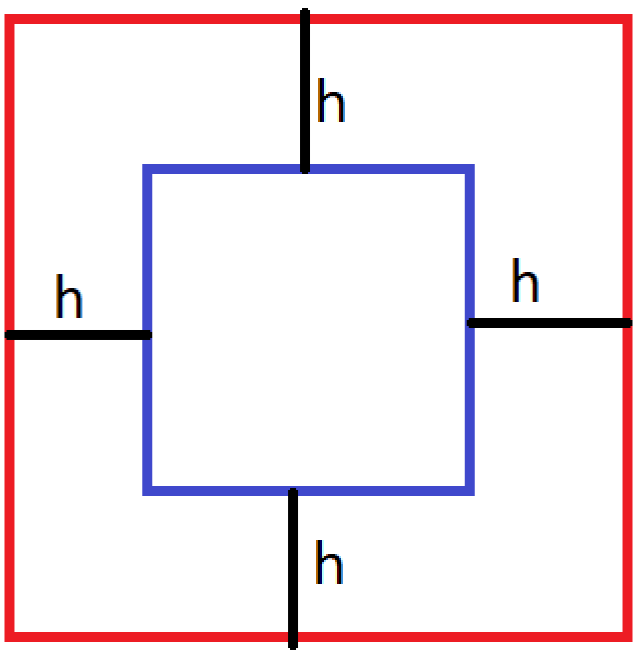
1. $\lambda A = 0$. Тогда правая часть $= 0$.

   $A \subset \overline{Q} \Rightarrow \sup f < +\infty$

   $\overline{Q}$ - компакт, $\alpha := dist(\overline{Q}, \partial O) > 0$

   Для множества $G : A \subset G \subset \dfrac{\alpha}{2}$—окрестности ячейки Q

   Назовём Q_1 кубическую ячейку, которая больше Q и у которой каждая сторона отстоит на $\dfrac{\alpha}{2\sqrt{m}}$ от соответствующей стороны Q.

   $$h = \frac{\alpha}{2\sqrt{m}}$$

   $A \subset G \subset Int(Q_1)$

   $\sup_G f \leqslant \sup_{\overline{Q_1}} f < +\infty$

   При этом λG может быть выбрана сколь угодно близко к $\lambda A = 0$ по регулярности меры Лебега.

2. $\lambda A > 0, \sup_A f < c$

   Возьмём c_1:

   $\sup_A f < c_1 < c$

Выберем ϵ так чтобы

$\epsilon \cdot c_1 < \lambda A \cdot (c - c_1) \quad$ **(*)**

G_ϵ - такое множество, что $A \subset G_\epsilon, G_\epsilon-$открытое, $\lambda(G_\epsilon \setminus A) < \epsilon$

$G_1 := f^{-1}((-\infty; c_1)) \cap G_\epsilon-$ открытое

$\lambda(G_1 \setminus A) < \epsilon$

$\lambda G_1 \cdot \sup_{G_1} f \leqslant (\lambda A + \epsilon) \cdot c_1 < \lambda A \cdot c$ (из **(*)**)

(так как $G \subset f^{-1}(-\infty; c_1)$, то есть f на G_1 не больше c_1)

$\inf(\lambda G \cdot_G f) < \lambda A \cdot c$

Переходя к inf по c, получаем что требовалось

22 Теорема о преобразовании меры при диффеоморфизме

$\Phi : O \subset \mathbb{R}^m \to \mathbb{R}^m$ - Диффеоморфизм, $\forall A \in \mathbb{M}^m, A \subset O$
$\lambda(\Phi(A)) = \int_A |\det \Phi'(x)| d\lambda(x)$
TODO: Илья

23 Теорема о гладкой замене переменной в интеграле Лебега

$\Phi : O \subset \mathbb{R}^m \to \mathbb{R}^m$ - диффеоморфизм
$O' = \Phi(O)$ - открытое
f задана на $O', f \geqslant 0$, Измерима по Лебегу, тогда
$\int_{O'} f(y) \cdot d\lambda(y) = \int_O f(\Phi(x)) \cdot |\det \Phi'(x)| \cdot d\lambda(x)$
Доказательство:
Изи
$\nu(A) = \lambda\Phi(A), \nu$ имеет плотность $J\Phi$ по отношению к λ
Применить теорему об интеграле по взвешенному образу меры

24 Теорема (принцип Кавальери)

(X, α, μ) и (Y, β, ν) - пространства с мерами, причем μ, ν — σ-конечные и полные
$m = \mu \times \nu$, $C \in \alpha \times \beta$, тогда:

1. При п.в. x C_x - измеримо (ν-измеримо), т.е. $C_x \in \beta$
2. Функция $x \to \nu C_x$ — измеримая (в широком смысле) на X

   NB: ϕ — измерима в широком смысле, если она задана при п.в. x, и $\exists f : X \to R'$ - измеримая и $\phi = f$ п.в. При этом $\int_X \phi = \int_X f$ (по опр.)
3. $mC = \int_X \nu(C_x) \cdot d\mu(x)$

Доказательство: Рассмотрим D — совокупность все множеств, для которых утв. теоремы верно.
$\rho = \alpha \otimes \beta$ — п/к изм. пр-ков.

1. $\rho \subset D$
   $C = A \times B$. то есть$\forall x C_x = \emptyset if x \notin A, B if x \in A$
   $(\mu A < +\infty, \nu B < +\infty)$
   $x \to \nu(C_x)$, функция $\nu(B) \cdot \Xi_A(x)$ — изм.
   $\int_X \nu(C_x) d\mu = \nu B \int_X \Xi_A(x) d\mu(x) = \nu B \cdot \mu A = mC$
2. $E_i \in D, E_i - dis \Rightarrow E := \sqcup E_i \in D$
   при п.в. x $(E_i)_x$ — измеримы
   при п.в. x все $(E_i)_x$ — измеримы, $E_x = \sqcup (E_i)_x$ — изм.
   $\nu E_x = \sum \nu(E_i)_x$ ($\nu(E_i)_x$ — изм. как функция от x) $\Rightarrow$ функция $x \to \nu E_x$ — измерима
   $\int_X \nu E_x d\mu(x) = \sum_i \int \nu(E_i)_x d\mu(x) = \sum_i mE_i = mE$
3. $E_i \in D$, $E_1 \sup E_2 \sup \ldots ; mE_i < +\infty$. Тогда $E := \cap E_i \in D$
   $\int_X \nu(E_i)_x d\mu = mE_i < +\infty (*)$

функция $x \to \nu(E_i)_x$ — суммируема $\Rightarrow$ п.в. конечна.
при всех x $(E_i)_x \downarrow E_x$, т.е. $(E_1)_x \sup (E_2)_x \sup \ldots$ и $\cap (E_i)_x = E_x$
при п.в. x $\nu(E_i)_X$ — конечны (для таких x).
Тогда E_x — измерима и $\lim \nu(E_i)_x = \nu E_x$ по непр-ти меры ν сверху.
(Th. Лебега) $|\nu(E_i)_x| \leq \nu(E_1)_x$ — сумм. $\Rightarrow$ функция $x \to \nu E_x$ — изм.
$\int_X \nu E_x d\mu = \lim \int_X \nu(E_i)_x d\mu = \lim mE_i = mE$ (нерп. сверху меры m). Этот предельный переход корректен как раз по теореме Лебега ($f_n \to f$ п.в. $g : |f_n| \leq g$ — сумм. Тогда $\int f_n \to \int f$).
NB: мы доказали про пересечения и про объединения (пусть пересечения убывающие, а объединения — дизъюнктные, но это лечится).
Поэтому $\cap_j (\cup_i A_{i,j}) \in D$, если $A_{i,j} \in \rho$ ($\rho \subset D$).

4. $mE = 0 \Rightarrow E \in D$
   $\exists H \in D, H$ имеет вид $\cap(\cup A_{i,j})$, где все $A_{i,j} \in \rho$
   $E \subset H, mH = 0$ из п.5 т. о продолжении (ЧТО?! поясните плез)
   $0 = mH = \int_X \nu H_x d\mu(x) \Rightarrow \nu H_x$ 0 ($= 0$ при п.в. x).
   $E_x \subset H_x \Rightarrow E_x$ — ν-изм. (из полноты ν) и $\nu E_x = 0$ п.в. x
   $\int_X \nu E_x d\mu = 0 = mE$

5. C — неизм, $mC < +\infty$. Тогда $C \in D$.
   $C = H \setminus e$, где $me = 0$, H — вида $\cap(\cup A_{i,j})$.
   $C_x = H_x \setminus e_x$ — изм. при п.в. x
   $\nu e_x = 0$ п.в.x (проверено в п.4)
   $\nu C_x = \nu H_x = \nu e_x$ — изм. п.в.x
   $\int_X \nu C_x = \int_X \nu H_x - \int_X \nu e_x = \int \nu H_x = mH = mC$.

6. C — m-изм. произвольное
   $X = \sqcup X_k, Y = \sqcup Y_n$ (μX_k — кон, νY_n — кон.).
   $C = \sqcup_{k,n} (\subset \cap (X_k \times Y_n)) \in D$ (по п.2) (т.к. $\subset \cap (X_k \times Y_n) \in D$ по п.5)

25 Теорема Тонелли

$< \mathbb{X}, \alpha, \mu >, < \mathbb{Y}, \beta, \nu >$ - пространства с мерой
μ, ν - σ-конечны, полные
$m = \mu \times \nu$

$f : \mathbb{X} \times \mathbb{Y} \to \overline{R}$, $f \geq 0$, f - измерима относительно m

Тогда:

1. при *почти всех* $x \in X$ f_x - измерима на $\mathbb{Y}$,
   где $f_x : \mathbb{Y} \to \overline{R}$, $f_x(y) = f(x, y)$
   (симметричное утверждение верно для y)
2. Функция $x \mapsto \phi(x) = \int\limits_{\mathbb{Y}} f_x d\nu = \int\limits_{\mathbb{Y}} f(x, y) d\nu(y)$ - измерима* на $\mathbb{X}$
   (симметричное утверждение верно для y)
3. $\int\limits_{\mathbb{X}\times\mathbb{Y}} f(x, y) dm = \int\limits_{\mathbb{X}} \phi(x) d\mu = \int\limits_{\mathbb{X}} (\int\limits_{\mathbb{Y}} f(x, y) d\nu(y)) d\mu(x) = \int\limits_{\mathbb{Y}} (\int\limits_{\mathbb{X}} f(x, y) d\mu(x)) d\nu$

Доказательство:

Докажем в 3 пункта, постепенно ослабляя ограничения на функцию f

1. Пусть $C \subset \mathbb{X} \times \mathbb{Y}$ - измеримо относительно m, $f = \chi_C$
   (a) $f_x(y) = \chi_{C_x}(y)$, где C_x - сечение по x
   C_x - измеримо при *почти всех* x, так как это одномерное сечение, таким образом f_x - измеримо, при *почти всех* x.
   (b) $\phi(x) = \int\limits_{\mathbb{Y}} f_x d\nu = \nu C_x$ - по принципу Кавальери это измеримая* функция.
   (c) $\int\limits_{\mathbb{X}} \phi(x) d\mu = \int\limits_{\mathbb{X}} \nu C_x d\mu \overset{\text{Кавальери}}{=} mc \overset{\text{опр.инт}}{=} \int\limits_{\mathbb{X}\times\mathbb{Y}} \chi_C dm = \int\limits_{\mathbb{X}\times\mathbb{Y}} f(x, y) dm$
2. Пусть f - ступенчатая, $f \geq 0$, $f = \sum\limits_{\text{кон}} a_k \chi_{C_k}$
   (a) $f_x = \sum a_k \chi_{(C_k)_x}$ - измерима при почти всех x
   (b) $\phi(x) = \sum a_k \nu (C_k)_x$ - измерима* как конечная сумма измеримых
   (c) $\int\limits_{\mathbb{X}} \phi(x) = \int\limits_{\mathbb{X}} \sum\limits_{\text{кон}} a_k \nu(C_k)_x d\mu = \sum\limits_{\text{кон}} \int\limits_{\mathbb{X}} a_k \nu(C_k)_x d\mu = \sum a_k m C_k = \int\limits_{\mathbb{X}\times\mathbb{Y}} f dm$

3. Пусть f - измеримая, $f \geq 0$

$f = \lim\limits_{n\to+\infty} g_n$, где $g_n \geq 0$ - ступенчатая, g_n - монотонно возрастает к f (из Теоремы об апроксимации измеримой функции ступенчатыми)

(a) $f_x = \lim\limits_{n\to+\infty}(g_n)_x \Rightarrow f_x$ - измерима при *почти всех* x.

(b) $\phi(x) = \int\limits_{\mathbb{Y}} f_x d\nu \overset{\text{т.Леви}}{=} \lim \int\limits_{\mathbb{Y}} (g_n)_x d\nu$

$\phi_n(x) := \int\limits_{\mathbb{Y}} (g_n)_x d\nu$ - измерима по пункту 1

$0 \leq (g_n)_x -$ возрастает, тогда $\phi(x)$ - измерима, $\phi_n(x) \leq \phi_{n+1}(x) \leq$ ... и $\phi_n(x) \to \phi(x)$

(c) $\int\limits_{\mathbb{X}} \phi(x) d\mu \overset{\text{т.Леви}}{=} \lim\limits_{n\to+\infty} \int \phi_n(x) d\mu \overset{\text{п.2}}{=} \lim\limits_{n\to+\infty} \int\limits_{\mathbb{X}\times\mathbb{Y}} g_n dm \overset{\text{т.Леви}}{=} \int f dm$

26 Формула для Бета-функции

$B(s,t) = \int\limits_0^1 x^{s-1}(1-x)^{t-1}$, где s и t >0 - Бета-функция

$\Gamma(s) = \int\limits_0^{+\infty} x^{s-1}e^{-x}dx$, где s >0, тогда $B(s,t) = \frac{\Gamma(s)\Gamma(t)}{\Gamma(s+t)}$

Доказательство:

$\Gamma(s)\Gamma(t) = \int\limits_0^{+\infty} x^{s-1}e^{-x}(\int\limits_0^{+\infty} y^{t-1}e^{-y}dy)dx = \begin{bmatrix} y \to u \\ y = u - x \end{bmatrix} = \int\limits_0^{+\infty} x^{s-1}(\int\limits_x^{+\infty}(u-x)^{t-1}e^{-u}du)dx =$

$= \int\limits_{\substack{x \geq 0 \\ u \geq x}} ... =$ меняем порядок интегрирования

$= \int\limits_0^{+\infty} du \int\limits_0^u dx (x^{s-1}(u-x)^{t-1}e^{-u}) = \begin{bmatrix} x \to v = \\ x = uv \end{bmatrix} = \int\limits_0^{+\infty} e^{-u}(\int\limits_0^1 u^{s-1}v^{s-t}u^{t-1}(1-v)^{t-1}udv)du =$

$= \int\limits_0^{+\infty} u^{s+t-1}e^{-u}(\int\limits_0^1 v^{s-1}(1-v)^{t-1}dv)du = B(s,t)\Gamma(s+t)$, чтд.

27 Объем шара в $\mathbb{R}^m$

$B(0,R) \subset R^m$

$\lambda_m(B(0,R)) = \int\limits_{B(0,R)} 1 d\lambda_m = \int \mathcal{J} = \int\limits_0^R dr \int\limits_0^\pi d\phi_1 ... \int\limits_0^\pi d\phi_{m-2} \int\limits_0^{2\pi} d\phi_{m-1} r^{m-1} (sin\phi_1)^{m-}$

$\int\limits_0^\pi (sin\phi_k)^{m-2-(k+1)} = B(\frac{m-k}{2}; \frac{1}{2}) = \frac{\Gamma(\frac{m-k}{2})\Gamma(\frac{1}{2})}{\Gamma(\frac{m-k}{2}+\frac{1}{2})}$

$\to= \frac{R^m}{m} \frac{\Gamma(\frac{m-1}{2})\Gamma(\frac{1}{2})}{\Gamma(\frac{m}{2})} \frac{\Gamma(\frac{m-2}{2})\Gamma(\frac{1}{2})}{\Gamma(\frac{m-1}{2})} ... \frac{\Gamma(1)\Gamma(\frac{1}{2})}{\Gamma(\frac{3}{2})} 2\pi =$

$= \frac{\pi R^m}{\frac{m}{2}} \frac{\Gamma(\frac{1}{2})^{m-2}}{\Gamma(\frac{m}{2})} = \frac{\pi^{\frac{m}{2}}}{\Gamma(\frac{m}{2}+1)} R^m$

28 Теорема о вложении пространств L^p

$\mu E < +\infty$ $1 \leq s < r \leq +\infty$

Тогда:

1. $L_r(E,\mu) \subset Ł_s(E,\mu)$
2. $\forall f-$ измеримы $||f||_s \leq \mu E^{1/s-1/r} ||f||_r$

Доказательство:

- $2 => 1$ (Это очевидно: достаточно рассмотреть неравенство из пункта 2. Из него следует, что $||f||_s < ||f||_r$. см. опред. L_p)
- Рассмотрим два случая:
  1. $r = +\infty$ (очев.)

     $$||f||_s \leq (\int |f|^s * 1)^{1/s} \leq ((esssup|f|)^s \int 1 d\mu)^{1/s} = ||f||_\infty * \mu E^{1/s}$$

     (последнее по опред. $esssup$)
  2. $r < +\infty$

     $$(||f||_s)^s = \int |f|^s * 1 d\mu \leq (\int |f|^r)^{\frac{s}{r}} * (\int 1^{\frac{r}{r-s}})^{\frac{(r-s)}{r}} = (||f||_r)^s * \mu E^{1-\frac{s}{r}}$$

     (существенный шаг: применить неравество Гельдера)

29 Теорема о сходимости в L_p и по мере

$1 \leq p < +\infty$
$f_n \in L_p(\mathbb{X}, \mu)$
Тогда:

1. • $f \in L_p$
   • $f_n \to f$ в L_p

   Тогда: $f_n \overset{\mu}{\Rightarrow} f$ (по мере)

2. • $f_n \overset{\mu}{\Rightarrow} f$ (либо если $f_n \to f$ почти везде)
   • $|f_n| \leq g$ почти при всех n , $g \in L_p$

   Тогда: $f_n \to f$ в L_p

Доказательство:

1.
$$X_n(\epsilon) := X(|f_n \to f| \geq \epsilon)$$

$$\mu X_n(\epsilon) = \int\limits_{X_n} (\frac{f_n - f}{\epsilon})^p = \frac{1}{\epsilon^p} \int\limits_{X_n} |f_n - f|^p \leq \frac{1}{\epsilon^p} \int\limits_{X} |f_n - f|^p = \frac{1}{\epsilon^p} (||f_n - f||_p)^p \overset{n \to \infty}{\to}$$

2. $f_n \overset{\mu}{\Rightarrow} f$ Тогда $\exists n_k \mid f_{n_k} \to f$ почти везде.

   Тогда $|f| \leq g$ п. в.

   $|f_n - f|^p \leq (2g)^p$ – сумм. функции т. к. $g \in L_p$

   $||f_n - f||_p = \int\limits_X |f_n - f|^p d\mu \overset{n \to \infty}{\to} 0$ (по теореме Лебега)

30 Полнота L^p

$L_p(E,\mu)\;\; 1 \le p < \infty$ – полное
То есть любая фундаментальная последовательность сходиться по норме $||f||_p$.

$$\forall \epsilon > 0\ \exists N\ \forall n,k\ ||f_n - f_k|| < \epsilon \Rightarrow \exists f \mid\ \ ||f_n - f|| \to 0$$

__**Доказательство:**__

1. Построим f.

   Рассмотрим фундаментальную последовательность f_n.

   $\exists N_1$ при $n = n_1$ $k > N_1$ $||f_{n_1} - f_k|| < \frac{1}{2}$

   $\exists N_2$ при $n = n_2$ $k > N_2, N_1$ $||f_{n_2} - f_k|| < \frac{1}{4}$

   $\dots$

   Тогда: $\sum_{k=1}^{\infty} ||f_{n_{k+1}} - f_{n_k}|| < 1$

   $f = \lim\limits_{k\to\infty} f_{n_k}$

   Докажем, это функция f корректно задана:

   - $S_N(x) := \sum_{k=1}^{N} |f_{n_{k+1}} - f_{n_k}|$
     $||S_N||_p \le \sum_{k=1}^{N} ||f_{n_{k+1}} - f_{n_k}|| < 1$
     Тогда по Теореме Фату: $||S||_p \le 1$
     Тогда $|S|^p$ – суммируема
     Тогда $S(x)$ конечна при п. в. x и ряд $\sum f_{n_{k+1}} - f_{n_k}$ абс. сход., а значит и просто сходиться при п. в. x
     $f := f_{n_1} + \sum f_{n_{k+1}} - f_{n_k}$ т. е. $f =$ п. в. $\lim\limits_{k\to\infty} f_{n_k}$

2. Проверим, что $f_n \to f$ в L_p

   Т. к. f_n – фунд., то $\forall \epsilon > 0\ \exists N\ \forall n, n_k > N\ \ ||f_n - f_{n_k}|| < \epsilon \Rightarrow ||f_n - f_{n_k}||^p = \int\limits_E |f_n - f_{n_k}|^p d\mu < \epsilon^p$

   Тогда по теореме Фату: $\int\limits_E |f - f_n|^p \le \epsilon^p$

   Тогда $\forall \epsilon > 0\ \exists N\ \forall n > N\ ||f - f_n||_p < \epsilon$

__**Замечание:**__ L_∞ – полное (упражнение)

31 Лемма Урысона

32 Плотность в L^p непрерывных финитных функций

33 Теорема о непрерывности сдвига

34 Теорема об интеграле с функцией распределения

35 Теорема о свойствах сходимости в гильбертовом пространстве

1. $x_n \to x, y_n \to y \Rightarrow < x_n, y_n > \to < x, y >$
2. $\sum x_k$ сходится, тогда $\forall y : \sum < x_k, y > = < \sum x_k, y >$
3. $\sum x_k$ - ортогональный ряд, тогда $\sum x_k$ - сх $\Leftrightarrow \sum |x_k|^2$ сходится, при этом $|\sum x_k|^2 = \sum |x_k|^2$

__Доказательство__

1. $| < x_k, y_k > - < x, y > | = | < x_k, y_k > - < x_k, y > + < x_k, y > - < x, y > | \leqslant | < x_k, y_k - y > | + | < x_k - x, y > | \leqslant |x_k| \cdot |y_k - y| + |x_k - x| \cdot |y| \to 0$ (так как огр $\cdot$ б.м. + б.м. $\cdot$ огр $\to 0$)
2. $S_n = \sum\limits_{k=1}^{n} x_k$

   $< \sum\limits_{k=1}^{n} x_k, y > = \sum\limits_{k=1}^{n} < x_k, y >$

   Устремляя n к ∞ получаем требуемое равенство

3. Обозначим $C_n := \sum\limits_{k=1}^{n} |x_k|^2$

$|S_n|^2 =< \sum\limits_{k=1}^{n} x_k, \sum\limits_{j=1}^{n} x_j >= \sum\limits_{k,j}^{n} < x_k, x_j >= \sum\limits_{k=1}^{n} < x_k, x_k >$ (так как $k \neq j \Rightarrow < x_k, x_j >= 0) = \sum\limits_{k=1}^{n} |x_k|^2 = C_n$

Аналогично, $|S_n - S_m|^2 = |C_n - C_m|$

Тогда C_n, S_n фунадментальны одновременно $\Rightarrow$ сходятся одновременно при устремлении n к ∞