הכנה למבחן — משפטים והוכחות נבחרים — תורת המידה, 80517

22 בפברואר 2026

תוכן עניינים

1 מידה

1.1 תנאי שקול לפונקציה מדידה

משפט 1.1.1 (תנאי שקול לפונקציה מדידה): יהי $(X,\mathcal{A})$ מרחב מדיד. אם $f:X\to[-\infty,\infty]$ פונקציה אזי f מדידה אם ורק אם $f^{-1}((\alpha,\infty])$ לכל $\alpha\in\mathbb{R}$.

הוכחה:

$\Longleftarrow$ מיידי מהגדרה כי אם f מדידה לכל $E\in\mathbb{B}([-\infty,\infty])$ מתקיים $f^{-1}(E)\in\mathcal{A}$ ולכן בהינתן $\alpha\in\mathbb{R}$ כלשהו, מתקיים $(\alpha,\infty]\in\mathbb{B}([\infty,\infty])$ ובפרט $f^{-1}((\alpha,\infty])\in\mathcal{A}$.

$\Longrightarrow$ מספיק להראות שהמקור של כל אחת מהקבוצות

$$(\alpha,\beta),\qquad(\alpha,\infty],\qquad[-\infty,\beta)$$

הוא מדיד, ואכן:

1. בהינתן $\beta\in\mathbb{R}$ מתקיים

$$f^{-1}([-\infty,\alpha))=\bigcup_{n=1}^{\infty}f^{-1}\left(\left[-\infty,\beta-\frac{1}{n}\right)\right)=\bigcup_{n=1}^{\infty}f^{-1}\left(\left(\beta-\frac{1}{n},\infty\right]^c\right)=\bigcup_{n=1}^{\infty}\left(f^{-1}\left(\left(\beta-\frac{1}{n},\infty\right]\right)\right)^c\in\mathcal{A}$$

כאשר המעבר האחרון נובע מההנחה שלכל $\alpha\in\mathbb{R}$ מתקיים $f^{-1}((\alpha,\infty])$ ולכן לכל $n\in\mathbb{N}$ בפרט עבור $\alpha=\beta-\frac{1}{n}\in\mathbb{R}$ נקבל $f^{-1}\left(\left(\beta-\frac{1}{n},\infty\right]\right)\in\mathcal{A}$.

אבל $\mathcal{A}$ היא σ־אלגברה ולכן מצד אחד נקבל $\left(f^{-1}\left(\left(\beta-\frac{1}{n},\infty\right]\right)\right)^c$ לכל $n\in\mathbb{N}$ ומצד שני $\bigcup_{n=1}^{\infty}\left(f^{-1}\left(\left(\beta-\frac{1}{n},\infty\right]\right)\right)^c\in\mathcal{A}$ לכל $\beta\in\mathbb{R}$, וזה סוגר את שני המקרים הימניים.

2. בהינתן $\alpha,\beta\in\mathbb{R}$

$$f^{-1}((\alpha,\beta))=f^{-1}([-\infty,\beta)\cap(\alpha,\infty])=f^{-1}([-\infty,\beta))\cap f^{-1}((\alpha,\infty])\in\mathcal{A}$$

כאשר המעבר האחרון נובע מכך ש־σ־אלגברה סגורה לחיתוכים סופיים.

כעת, אם $U\subseteq[-\infty,\infty]$ אזי $U=\bigcup_{n=1}^{\infty}I_n$ כאשר לכל $n\in\mathbb{N}$, I_n הוא מהצורה של $(\star)$ וכי קבוצה פתוחה ב־$[-\infty,\infty]$ היא איחוד בן־מנייה של קבוצות מהצורה $(\star)$ ונקבל

$$f^{-1}(U)=f^{-1}\left(\bigcup_{n=1}^{\infty}I_n\right)=\bigcup_{n=1}^{\infty}f^{-1}(I_n)\in\mathcal{A}$$

כלומר המקור של כל קבוצה פתוחה הוא מדיד ולכן f מדידה. $\square$

1.2 מדידות נשמרת תחת הפעלת sup/inf/limsup/liminf

משפט 1.2.1 (מדידות נשמרת תחת הפעלת sup/inf/limsup/liminf): יהי $(X, \mathcal{A})$ מרחב מדידה. אם $\{f_n : X \to [-\infty, \infty]\}_{n=1}^{\infty}$ סדרת פונקציות מדידות, אז הפונקציות

$$(1)\ \sup_{n\in\mathbb{N}}\{f_n\} \qquad (2)\ \inf_{n\in\mathbb{N}}\{f_n\} \qquad (3)\ \limsup_{n\to\infty} f_n \qquad (4)\ \liminf_{n\to\infty} f_n$$

כולן מדידות.

הוכחה: (1) נסמן $g := \sup_{n\in\mathbb{N}}\{f_n\}$, ומספיק להראות שהקבוצה $g^{-1}((a,\infty])$ היא מדידה לכל $\alpha \in \mathbb{R}$, אז נרצה להראות

$$(\star)\ g^{-1}((\alpha,\infty)) = \bigcup_{n=1}^{\infty} f_n^{-1}((a,\infty])$$

$\subseteq$: אם $x \in g^{-1}((\alpha,\infty])$ אז

$$\sup_{n\in\mathbb{N}}\{f_n(x)\} = g(x) \in (\alpha,\infty] > \alpha$$

כלומר קיים $n_0 \in \mathbb{N}$ כך ש־$f_{n_0}(x) > \alpha$ (אחרת לכל $n \in \mathbb{N}$ מתקיים $f_n(x) \le \alpha$ וזו סתירה) אז

$$x \in f_{n_0}^{-1}((\alpha,\infty]) \Longrightarrow x \in \bigcup_{n=1}^{\infty} f_n^{-1}((\alpha,\infty]) \Longrightarrow g^{-1}((\alpha,\infty]) \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} f_n^{-1}((\alpha,\infty])$$

$\supseteq$: אם $x \in \bigcup_{n=1}^{\infty} f_n^{-1}((\alpha,\infty])$ אז קיים $n_0 \in \mathbb{N}$ כך ש־$x \in f_n^{-1}((\alpha,\infty])$ ולכן $f_{n_0}(x) \in (\alpha,\infty]$ כלומר $f_{n_0}(x) > \alpha$ ומתקיים

$$\sup_{n\in\mathbb{N}}\{f_n(x)\} \ge f(n_0)(x) > \alpha \Longrightarrow \sup_{n\in\mathbb{N}}\{f_n(x)\} > \alpha \Longrightarrow g(x) \in (\alpha,\infty] \Longrightarrow x \in g^{-1}((\alpha,\infty])$$

אז $(\star)$ נכון ולכן f_n מדידה לכל $n \in \mathbb{N}$ ולכן $f_n^{-1}((\alpha,\infty])$ מדידה לכל $n \in \mathbb{N}$, כלומר הקבוצה $g^{-1}((\alpha,\infty])$ היא איחוד בן־מנייה של קבוצות מדידות ולכן מדידה בעצמה וקיבלנו שהפונקציה g מדידה.
(2) זהה עבור קטעים מהצורה $[-\infty,\beta)$.
(3)

$$\limsup_{n\to\infty} f_n = \inf_{k\in\mathbb{N}}\left\{\sup_{\substack{n\in\mathbb{N}\\ n\ge k}}\{f_n\}\right\}$$

ולכן עבור סדרת הפונקציות $\{h_k : X \to [-\infty,\infty]\}_{k=1}^{\infty}$ המוגדרת על־ידי

$$\forall k \in \mathbb{N},\ h_k := \sup_{\substack{n\in\mathbb{N}\\ n\ge k}}\{f_n\}$$

מתקיים מ־(1) ש־$\{h_k\}_{k=1}^{\infty}$ סדרת פונקציות מדידות ונקבל מ־(2) ש־$\inf_{k\in\mathbb{N}}\{h_k\}$ מדידה ולכן $\limsup_{n\to\infty} f_n$ מדידה.
(4) באותו אופן למקרה הקודם רק עבור

$$\liminf_{n\to\infty} f_n = \sup_{k\in\mathbb{N}}\left\{\inf_{\substack{n\in\mathbb{N}\\ n\ge k}}\{f_n\}\right\}$$

$\square$

1.3 תכונות בסיסיות של מידה

משפט 1.3.1 (תכונות בסיסיות של מידה): אם $\mu : \mathcal{A} \to [0,\infty]$ היא מידה על מרחב מדיד $(X,\mathcal{A})$ אזי

1. $\mu \not\equiv \infty \iff \mu(\emptyset) = 0$
2. **אדטיביות סופית:** לכל אוסף סופי זר בזוגות $\left(E_i\right)_{i=1}^n \subseteq \mathcal{A}$ מתקיים $\mu\left(\bigcup_{i=1}^n E_i\right) = \sum_{i=1}^n \mu(E_i)$
3. **מונוטוניות ביחס להכלה:** אם $A \subseteq B \in \mathcal{A}$ מדידות אזי $\mu(A) \leq \mu(B)$
4. **רציפות לסדרות עולות:** תהיי $\left(A_n\right)_{n=1}^\infty \subseteq \mathcal{A}$ סדרה עולה של קבוצות מדידות אזי $\mu\left(\bigcup_{n=1}^\infty A_n\right) = \lim_{n\to\infty} \mu(A_n)$
5. **רציפות לסדרות יורדות:** תהיי $\left(C_n\right)_{n=1}^\infty$ סדרה יורדת של סדרות מדידות. אם $\mu(C_1) < \infty$ אזי $\mu\left(\bigcap_{n=1}^\infty C_n\right) = \lim_{n\to\infty} \mu(C_n)$
6. **σ־תת אדטיביות:** אם $\left(A_n\right)_{n=1}^\infty \subseteq \mathcal{A}$ אוסף כלשהו של קבוצות מדידות אזי $\mu\left(\bigcup_{n=1}^\infty A_n\right) \leq \sum_{n=1}^\infty \mu(A_n)$

הוכחה:

1. כיוון אחד נובע מהגדרת המידה, מהכיוון השני נובע שיש $A \in \mathcal{A}$ עם $\mu(A) < \infty$ ולכן ניתן להחסיר זאת, כלומר

$$\cancel{\mu(A)} = \mu\left(A \dot{\bigcup_{n\in\mathbb{N}}} \emptyset\right) \underset{\substack{\sigma\text{־אדטיביות} \\ \text{הקבוצה הריקה זרה לעצמה}}}{=} \cancel{\mu(A)} + \sum_{n\in\mathbb{N}} \mu(\emptyset) = 0$$

2. באופן דומה לסעיף הקודם נשרשר $\emptyset$ עם σ־אדטיביות וסיימנו

3. $$\mu(B) = \mu((B \setminus A) \uplus A) = \mu(B \setminus A) + \mu(A) \geq \mu(A)$$

4. נסמן $B_1 = E_1$ ולכל $n \in \mathbb{N}$ נגדיר $B_{n+1} = A_{n+1} \setminus A_n$ אזי $\left(B_n\right)_{n=1}^\infty$ סדרה של קבוצות מדידות וזרות בזוגות ולכל N מתקיים $\dot\bigcup_{n=1}^N B_n = A_N = \bigcup_{n=1}^N A_n$ ו־$\bigcup_{n=1}^\infty = \dot\bigcup_{n=1}^\infty B_n$ ולכן

$$\mu\left(\bigcup_{n=1}^\infty A_n\right) = \mu\left(\dot\bigcup_{n=1}^\infty B_n\right) = \sum_{n=1}^\infty \mu(B_n) = \lim_{N\to\infty} \sum_{n=1}^N \mu(B_n) = \lim_{N\to\infty} \mu\left(\bigcup_{n=1}^N A_n\right)$$

5. נסמן $D_n = C_n \setminus C_{n+1}$ ולכן $\bigcup_{n\in\mathbb{N}} C_n \dot\bigcup_{n\in\mathbb{N}} D_n = C_1$ ומהאדטיביות סופית והעברת אגפים (שאפשר מהסופיות) נקבל

$$\mu\left(\bigcap_{n\in\mathbb{N}} C_n\right) = \mu(C_1) - \mu\left(\dot\bigcup_{n\in\mathbb{N}} D_n\right) = \mu(C_1) - \sum_{n\in\mathbb{N}} \mu(D_n) = \lim_{N\to\infty} \mu(C_1) - \mu\left(\dot\bigcup_{n=1}^N D_n\right) = \lim_{N\to\infty} \mu(C_{N+1})$$

שכן $C_1 \setminus \dot\bigcup_{n=1}^N D_n = C_{N+1}$

6. זה בעצם אי־שיוויון בול מהסתברות רק על מרחבי מידה כלליים: נגדיר $B_1 = A_1, B_{n+1} = B_{n+1} \setminus \bigcup_{m=1}^n A_n$.
אז B_n זרים בזוגות, $B_n \subseteq A_n$ ו־$\dot\bigcup_{n\in\mathbb{N}} B_n = \bigcup_{n\in\mathbb{N}} A_n$ ומתקיים

$$\mu\left(\bigcup_{n\in\mathbb{N}} A_n\right) = \mu\left(\dot\bigcup_{n\in\mathbb{N}} B_n\right) = \sum_{n\in\mathbb{N}} \mu(B_n) \leq \sum_{n\in\mathbb{N}} \mu(A_n)$$

$\square$

2 אינטגרציה

2.1 לכל פונקציה מדידה יש סדרת פונקציות פשוטות שמתכנסת אליה

משפט 2.1.1 (לכל פונקציה מדידה יש סדרת פונקציות פשוטות שמתכנסת אליה): אם $f : X \to [0,\infty]$ פונקציה מדידה כלשהי, אז קיימת סדרת פונקציות פשוטות $\{s_n\} \mid X \to [0,\infty)_{n=1}^{\infty}$ כך שמתקיים

1. $\{s_n\}_{n=1}^{\infty}$ סדרה מונוטונית עולה וחסומה על־ידי f, כלומר

$$\forall n,m \in \mathbb{N},\ m \le n \Longrightarrow 0 \le s_m \le s_n \le f$$

2. הסדרה $\{s_n\}_{n=1}^{\infty}$ מתכנסת נקודתית ל־f, כלומר

$$\forall x \in X,\ s_n(x) \xrightarrow[n\to\infty]{} f(x)$$

הוכחה: נגדיר $\varphi_n : [0,\infty) \to [0,\infty)$ על־ידי

$$\forall x \in [0,\infty),\ \varphi_n(x) := \begin{cases} 2^{-n} \cdot \lfloor 2^n \cdot x \rfloor & 0 \le x < n \\ n & x \ge n \end{cases}$$

אז לכל $n \in \mathbb{N}$, φ_n היא צירוף לינארי של פונקציות מהצורה $\mathbb{1}_{\frac{k}{2^n},\frac{k+1}{2^n}}$ לכל $0 \le k \le n \cdot 2^n - 1$ ולכן היא מדידה בורל ביחס ל־$[0,\infty)$ ולכן תמונתה סופית ו־φ_n היא פונקציה פשוטה.
לכל $x \in [0,n]$ ולכל $n \in \mathbb{N}$ מתקיים

$$\lfloor 2^n x \rfloor \le 2^n x < \lfloor 2^n x \rfloor + 1 \Longleftrightarrow 2^{-n}\lfloor 2^n x \rfloor \le x < 2^{-n}(\lfloor 2^n x \rfloor + 1)$$

כלומר

$$\varphi_n(x) \le x < \varphi_n(x) + 2^{-n} \Longleftrightarrow \varphi_n(x) \le x \wedge x < \varphi_n(x) + 2^{-n} \Longleftrightarrow x \ge \varphi_n(x) \wedge \varphi_n(x) > x - 2^{-n} \Longleftrightarrow x - 2^{-n} < \varphi_n(x) \le x$$

ולכן $x - 2^{-n} < \varphi_n(x) \le x$ לכל $n \in \mathbb{N}, x \in [0,n]$ ומכאן הרי ש־$\varphi_n(x) \xrightarrow[n\to\infty]{} x$ לכל $x \in [0,n]$ וכן לכל $x \in [0,\infty)$ מתקיים

$$\forall n,m \in \mathbb{N},\ n \le m \Longrightarrow \varphi_n \le \varphi_m \le x$$

ולכן $\{\varphi_n\}_{n=1}^{\infty}$ סדרה מונוטונית עולה ואם לכל $n \in \mathbb{N}$ נגדיר $s_n := \varphi_n \circ f$ נקבל את הטענה שכן הרכבת פונקציות מדידות היא פונקציה מדידה, אז $\{s_n\}_{n=1}^{\infty}$ מקיימת את הנדרש. $\square$

2.2 תכונות האינטגרל

משפט 2.2.1 (תכונות האינטגרל): תהיינה $f, g : X \to [0, \infty]$ פונקציות מדידות ותהיינה $A, B, E \in \mathcal{E}$ מדידות.
האינטגרל של f, g ביחס ל־μ מקיים את התכונות הבאות

1. מונטוניות של f, g: אם $0 \leq f \leq g$ אזי $0 \leq \int_A f \,\mathrm{d}\mu \leq \int_A g \,\mathrm{d}\mu$
2. מונטוניות ביחס להכלה: אם $0 \leq f$ ו־$A \subseteq B$ אזי $\int_A f \,\mathrm{d}\mu \leq \int_B f \,\mathrm{d}\mu$
3. הומוגניות: אם $0 \leq f$ ו־$c \in [0, \infty)$ אזי $\int_A c \cdot f \,\mathrm{d}\mu = c \cdot \int_A f \,\mathrm{d}\mu$
4. אם $f|_E \equiv 0$ אזי $\int_E f \,\mathrm{d}\mu = 0$ (גם אם $\mu(E) = \infty$)
5. אינטגרציה על קבוצות ממידה אפס: אם $\mu(E) = 0$ אזי $\int_E f \,\mathrm{d}\mu = 0$ (גם אם $f|_E \equiv \infty$)
6. אינטגרציה על קבוצה בניסוח עם הפונקציה המציינת: אם $0 \leq f$ אזי $\int_E f \,\mathrm{d}\mu = \int_X f \cdot \mathbb{1}_E \,\mathrm{d}\mu$
7. אינטגרציה על איחוד זר: אם $A \cap B = \emptyset$ אזי $\int_{A \uplus B} f \,\mathrm{d}\mu = \int_A f \,\mathrm{d}\mu + \int_B \mathrm{d}\mu$

הוכחה:

1. בלי הגבלת הכלליות, $X = E$ אחרת ניקח לכל $E \in \mathcal{A}$, $f \cdot \mathbb{1}_E, g \cdot \mathbb{1}_E$ ועדיין נחשב אינטגרציה על כל X ונקבל מהגדרה

$$\int f d\mu = \sup\left\{ \int_E s d\mu \mid 0 \leq s \leq f, \text{ פשוטה } s \right\}$$

מהיות $0 \leq f \leq g$ נובע גם שלכל s כזאת מתקיים $0 \leq s \leq g$ ולכן מתקיים

$$\left\{ \int_E s d\mu \mid 0 \leq s \leq f, \text{ פשוטה } s \right\} \subseteq \left\{ \int_E s d\mu \mid 0 \leq s \leq g, \text{ פשוטה } s \right\}$$

ובפרט בלקיחת סופרמום

$$\int f d\mu = \sup\left\{ \int_E s d\mu \mid 0 \leq s \leq f, \text{ פשוטה } s \right\} \subseteq \sup\left\{ \int_E s d\mu \mid 0 \leq s \leq g, \text{ פשוטה } s \right\} = \int g d\mu$$

2. יהי $x \in X$.
אם $x \in A$ אז $\mathbb{1}_A(x) = 1$ ומהנתון $A \subseteq B$ מתקיים $\mathbb{1}_B(x) = 1$.
אם $x \notin A$ אזי $\mathbb{1}_A(x) = 0$ ויש שתי אפשרויות: או ש־$x \in B$ או ש־$x \notin B$, כלומר או ש־$\mathbb{1}_B(x) = 1$ או ש־$\mathbb{1}_B(x) = 0$.
בין כה וכה, מכך ש-$A \subseteq B$ נובע כי בהתאמה מתקיים $\mathbb{1}_A(x) \leq \mathbb{1}_B(x)$ לכל $x \in X$.
בפרט נובע מכך שלכל $x \in X$ מתקיים $f \cdot \mathbb{1}_A(x) \leq f \cdot \mathbb{1}_B(x)$ והם בהתאמה מתאימים מהגדרה ל־$\int_A f d\mu, \int_B f d\mu$.
מהסעיף הקודם נובע אם כך ש־$\int_A f d\mu \leq \int_B f d\mu$ (הסעיף הקודם הוא מונוטוניות האינטגרל) עבור $E = X$.
3. תהיי $E \in \mathcal{A}$, ותהיי $s \leq f$ פונקציה פשוטה כך שמתקיים $s = \sum_{i=1}^n \alpha_i \mathbb{1}_{E_i}$ עם $\alpha_i \geq 0$ ו־$\{E_i\}$ קבוצות זרות בזוגות ומדידות ב־E.
ראינו שמתקיים $\int_E s d\mu = \sum_{i=1}^n \alpha_i \mu(E_i)$.
נבחין שגם cs היא פונקציה פשוטה שכן

$$cs(x) = \sum_{i=1}^n (c\alpha_i)\mathbb{1}_{E_i}(x) \Longrightarrow \int_E cs(x) d\mu = \sum_{i=1}^n (c\alpha_i)\mu(E_i) = c\sum_{i=1}^n \alpha i \mu(E_i) = c\int_E s d\mu$$

נסמן מהגדרה

$$\int_E f d\mu = \sup\left\{ \int_E s d\mu \mid 0 \leq s \leq f, \text{ פשוטה } s \right\} = S_f$$

$$\int_E cf d\mu = \sup\left\{ \int_E p d\mu \mid 0 \leq p \leq cf, \text{ פשוטה } p \right\} = S_{cf}$$

נשים לב שלכל $0 \leq p \leq cf$, אם $c > 0$ אז אם נגדיר פונקציה פשוטה $0 \leq s' = \frac{p}{c} \leq f$ ומתקיים ממה שראינו לעיל,

$$\int_E p d\mu = \int_E cs d\mu = c\int_E d\mu$$

זה נכון לכל p פשוטה כזאת ולכן

$$S_{cf}=\sup\left\{c\int_E sd\mu \mid 0\le s\le f,\ \text{פשוטה } s\right\}\underset{\text{מכפלה עם סופרמה אי-שלילית}}{=}c\cdot\sup\left\{\int_E sd\mu \mid 0\le s\le f,\ \text{פשוטה } s\right\}=c\cdot S_f$$

אם $c=0$, אנחנו רוצים להראות

$$\int_E 0\cdot f\mu=0\cdot\int_E fd\mu$$

בצד שמאל יש לנו פשוט את הפונקציה $g\equiv 0$ וזאת כמובן פונקציה פשוטה ולכן

$$\int_E 0d\mu=\sum_{i=1}^n\alpha_i\mu(E_i)=\sum_{i=1}^n 0\mu(E_i)=0$$

מצד שני, יש לנו $0\cdot\int_E fd\mu$ שתמיד כמובן שווה לאפס בזכות הקונבנציה $0\cdot\infty=0$.

4. תהיי $s=\sum_{i=1}^n\alpha_i\mathbb{1}_{A_i}$ פונקציה פשוטה ואם נסתכל על E אזי $0\le s\le f$ וכן $f|_E\equiv 0$ ולכן על E, $s(x)=0$ לכל $x\in E$ ומהגדרה

$$\int_E s\,\mathrm{d}\mu=\sum\alpha_i\mu(A_i\cap E)$$

ולכן אם $A_i\cap E$ לא ריקה אז המקדמים α_i חייבים להיות אפסים ולכן הסכום הוא בידיוק 0; מהגדרת אינטגרל לבג

$$\int_E f\,\mathrm{d}\mu=\sup\left\{\int_E s\,\mathrm{d}\mu \mid 0\le s\le f,\text{פשוטה } s\right\}$$

אבל לכל פשוטה הנימוק לעיל תקף כלומר האינטגרל על כל הקבוצה הוא 0 ולכן $\int_E f\,\mathrm{d}\mu=0$ (ניזכר כי $0\cdot\infty=0$ ולכן גם הסוגריים נכונים).

5. תהיי $0\le s\le f$ פונקציה פשוטה $s=\sum_{i=1}^n\alpha_i\mathbb{1}_{A_i}$ ומהגדרת האינטגרל

$$\int_E s\,\mathrm{d}\mu=\sum_{i=1}^n\alpha_i\cdot\mu(A_i\cap E)$$

אבל $\mu(E)=0$ ו־$A_i\cap E\subseteq E$ ולכן ממונטוניות, $\mu(A_i\cap E)=0$ כלומר $\int_E s\,\mathrm{d}\mu=0$; זה נכון לכל פונקציה פשוטה ולכן מהגדרת האינטגרל מתקיים $\int_E f\,\mathrm{d}\mu=0$ (אפשר וצריך לסיים עם משפט ההתכנסות המונוטונית ועם $\{s_n\}_{n=1}^\infty$ פשוטות כך ש־$s_n\nearrow f$)

6. מתקיים

$$\int_E\mathbb{1}_A\,\mathrm{d}\mu=\mu(A\cap E)$$

אבל $\mathbb{1}_{A\cap E}=\mathbb{1}_A\cdot\mathbb{1}_E$ ולכן

$$\int_X\mathbb{1}_A\cdot\mathbb{1}_E\,\mathrm{d}\mu=\int_X\mathbb{1}_{A\cap E}\,\mathrm{d}\mu=\mu(A\cap E)$$

אז הטענה נכונה לאינדיקטורים; תהיי $s=\sum_{i=1}^n\alpha_i\mathbb{1}_{A_i}$ פונקציה פשוטה, אז

$$\int_E s\,\mathrm{d}\mu=\sum_{i=1}^n\alpha_i\int_E\mathbb{1}_{A_i}\,\mathrm{d}\mu=\sum_{i=1}^n\alpha_i\int_X\mathbb{1}_{A_i}\cdot\mathbb{1}_E\,\mathrm{d}\mu=\int_X\left(\sum_{i=1}^n\alpha_i\mathbb{1}_{A_i}\right)\cdot\mathbb{1}_E\,\mathrm{d}\mu=\int_X s\cdot\mathbb{1}_E\,\mathrm{d}\mu$$

והטענה נכונה לפונקציות פשוטות; לבסוף, נשתמש במשפט ההתכנסות המונוטונית שכן יש $\{s_n\}_{n=1}^\infty$ פשוטות כך ש־$s_n\nearrow f$ נקודתית ונקבל

$$\int_E f\,\mathrm{d}\mu=\int_E\left(\lim_{n\to\infty}s_n\right)\mathrm{d}\mu=\lim_{n\to\infty}\int_E s_n\,\mathrm{d}\mu=\lim_{n\to\infty}\int_X s_n\cdot\mathbb{1}_E\,\mathrm{d}\mu=\int_X\left(\lim_{n\to\infty}s_n\cdot\mathbb{1}_E\right)\mathrm{d}\mu=\int_X f\cdot\mathbb{1}_E\,\mathrm{d}\mu$$

7. מתקיים $\mathbb{1}_{A\cup B}(x)=\mathbb{1}_A(x)+\mathbb{1}_B(x)$ ולכן מהפעלת הסעיף הקודם פעמיים בקצוות

$$\int_{A\uplus B}f\,\mathrm{d}\mu=\int_X f\cdot\mathbb{1}_{A\uplus B}\,\mathrm{d}\mu=\int_X f\cdot(\mathbb{1}_A+\mathbb{1}_B)\,\mathrm{d}\mu\underset{\text{לינאריות}}{=}\int_X f\cdot\mathbb{1}_A\,\mathrm{d}\mu+\int_X f\cdot\mathbb{1}_B\,\mathrm{d}\mu=\int_A f\,\mathrm{d}\mu+\int_B f\,\mathrm{d}\mu$$

□

2.3 משפט ההתכנסות המונוטונית

משפט 2.3.1 (משפט ההתכנסות המונוטונית): יהי $(X, \mathcal{A}, \mu)$ מרחב מידה ותהיי $\{f_n \mid X \to [0,\infty]\}_{n=1}^{\infty}$ סדרת פונקציות מדידות.
אם $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ סדרה מונוטונית עולה, אזי הפונקציה

$$f \coloneqq \lim_{n\to\infty} f_n = \sup_{n\in\mathbb{N}}\{f_n\}$$

מקיימת

$$\forall A\in\mathcal{A} \qquad \int_A f \,\mathrm{d}\mu = \lim_{n\to\infty}\int_A f_n \,\mathrm{d}\mu \Longrightarrow \forall A\in\mathcal{A} \qquad \int_A \lim_{n\to\infty} f_n \,\mathrm{d}\mu = \lim_{n\to\infty}\int_A f_n \,\mathrm{d}\mu$$

הוכחה: נוכיח עבור $A = X$ ואז להתבונן ב־$g_n = f_n \mathbb{1}_A$ ולהסיק את המקרה הכללי.
ממונוטוניות האינטגרל $0 \le \int f_1 \,\mathrm{d}\mu \le \int f_2 \,\mathrm{d}\mu \le \cdots \le \int f \,\mathrm{d}\mu$ ולכן $\alpha = \sup_n \int f_n \,\mathrm{d}\mu$ יקיים $\alpha \le \int f \,\mathrm{d}\mu$ ונרצה להראות $\alpha \ge \int f \,\mathrm{d}\mu$.
נראה שלכל $0 \le s \le f$ פשוטה מתקיים $\int s \,\mathrm{d}\mu \le \alpha$: תהיי $0 \le s \le f$ פשוטה ונקבע $0 < c < 1$, נסמן $E_n \coloneqq \{x\in X \mid f_n(x) \ge cs(x)\}$ ו־$E_n \nearrow X$ כלומר זוהי סדרה עולה של קבוצות מדידות שאיחודן הוא כל X.
מרציפות המידה לסדרות עולות נסיק כי לכל $A\in\mathcal{A}$

$$\mu(A\cap E_n) \underset{(\star)}{\to} \mu(A\cap(\cup E_n)) = \mu(A)$$

s פשוטה ולכן $s = \sum_{i=1}^m \alpha_i \mathbb{1}_{A_i}$ ולכל n מתקיים

$$\alpha \ge \int f_n \,\mathrm{d}\mu \ge \int_{E_n} f_n \,\mathrm{d}\mu \ge c\cdot\int_{E_n} s \,\mathrm{d}\mu = c\cdot\sum_{i=1}^m \alpha_i\mu(A_i\cap E_n) \underset{(\star)}{\to} c\cdot\sum_{i=1}^m \alpha_i\mu(A_i) = c\cdot\int s \,\mathrm{d}\mu$$

$\square$

2.4 החלפת סדר אינטגרציה וסכום

משפט 2.4.1 (החלפת סדר אינטגרציה וסכום): יהי $(X, \mathcal{A}, \mu)$ מרחב מידה. אם $\{f_n \mid X \to [0,\infty]\}_{n=1}^{\infty}$ סדרת פונקציות מדידות, אזי

$$\int_X \sum_{n=1}^{\infty} f_n \,\mathrm{d}\mu = \sum_{n=1}^{\infty} \int_X f_n \,\mathrm{d}\mu$$

הוכחה: באינדוקציה על $N \in \mathbb{N}$.
מקרה בסיס הוא אדטיביות האינטגרל עבור $N=2$ (עבור $N=1$ הטענה טריוויאלית): תהיינה $s,t : X \to [0,\infty]$ פונקציות פשוטות כלשהן כאשר

$$s = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \mathbb{1}_{A_i} \qquad t = \sum_{j=1}^{m} \beta_j \mathbb{1}_{B_j}$$

עבור $\{A_i\}_{i=1}^{n}, \{B_j\}_{j=1}^{m}$ הן חלוקות של X ומתקיים

1. $\{A_i \cap B_j\}_{(i,j)\in[n\times m]}$ חלוקה של X
2. לכל $j \in [m]$ מתקיים $\bigcup_{i=1}^{n} A_i \cap B_j = B_j$ כי $\{A_i\}_{i=1}^{n}$ חלוקה של X
3. לכל $i \in [n]$ מתקיים $\bigcup_{j=1}^{m} A_i \cap B_j = A_i$ כי $\{B_j\}_{j=1}^{m}$ חלוקה של X

מאדטיביות סופית של מידה נקבל

$$\sum_{j=1}^{m} \mu(A_i \cap B_j) \overset{(\star)}{=} \mu(A_i) \qquad \sum_{i=1}^{n} \mu(A_i \cap B_j) \overset{(\star\star)}{=} \mu(B_j)$$

אבל גם $s+t$ היא פונקציה פשוטה שכן

$$s+t = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} (\alpha_i + \beta_j) \mathbb{1}_{A_i \cap B_j}$$

ולכן

$$\begin{aligned}\int_X (s+t)\,\mathrm{d}\mu &= \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} (\alpha_i+\beta_j)\cdot\mu(A_i\cap B_j) = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot \sum_{j=1}^{m} \mu(A_j \cap B_j) + \sum_{j=1}^{m} \beta_j \cdot \sum_{i=1}^{n} \mu(A_i \cap B_j) \\ &\underset{(\star),(\star\star)}{=} \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \cdot \mu(A_i) + \sum_{j=1}^{m} B_j \cdot \mu(B_j) = \int_X s\,\mathrm{d}\mu + \int_X t\,\mathrm{d}\mu\end{aligned}$$

אז הטענה נכונה עבור פונקציות פשוטות.
תהיינה $f_1, f_2 \in \{f_n \mid X \to [0,\infty]\}_{n=1}^{\infty}$ מדידות ותהיינה $\{s_n\}_{n=1}^{\infty}, \{t_n\}_{n=1}^{\infty}$ סדרות עולות של פונקציות פשוטות כך שמתקיים

$$s_n \xrightarrow[n\to\infty]{} f_1 \qquad t_n \xrightarrow[n\to\infty]{} f_2$$

נקודתית ומאריתמטיקה של גבולות נקבל $s_n + t_n \xrightarrow[n\to\infty]{} f_1 + f_2$ כאשר זו התכנסות עולה לכן לפי משפט ההתכנסות המונוטונית

$$\begin{aligned}\int_X (f_1+g_2)\,\mathrm{d}\mu &= \lim_{n\to\infty} \int_X (s_n+t_n)\,\mathrm{d}\mu = \lim_{n\to\infty}\left(\int_X s_n\,\mathrm{d}\mu + \int_X t_n\,\mathrm{d}\mu\right) = \lim_{n\to\infty}\int_X s_n\,\mathrm{d}\mu + \lim_{n\to\infty}\int_X t_n\,\mathrm{d}\mu \\ &= \int_X f_1\,\mathrm{d}\mu + \int_X f_2\,\mathrm{d}\mu\end{aligned}$$

וזה מראה את בסיס האינדוקציה.
בשביל לסיים את האינדוקציה נשים לב $\sum_{n=1}^{N} f_n \xrightarrow[N\to\infty]{} \sum_{n=1}^{\infty} f_n$ נקודתית כאשר הסדרה $\left\{\sum_{n=1}^{N} f_n\right\}_{n=1}^{\infty}$ היא סדרה מונוטונית עולה ולכן ממשפט ההתכנסות המונוטוניות נקבל את הטענה, כנדרש. $\square$

2.5 קיום מידת אינטגרל

משפט 2.5.1 (קיום מידת אינטגרל): יהי $(X, \mathcal{A}, \mu)$ מרחב מידה. אם $h : X \to [0, \infty]$ מדידה אזי הפונקציה $\nu : A \to [0, \infty]$ המוגדרת על־ידי

$$\forall E \in \mathcal{A},\ \nu(E) = \int_E h \,\mathrm{d}\mu$$

היא מידה על $(X, \mathcal{A})$ ובמקרה זה נסמן $\mathrm{d}\nu := h \,\mathrm{d}\mu$ ויתר על־כן מתקיים

$$\int_X g \,\mathrm{d}\nu = \int_X g \cdot h \,\mathrm{d}\mu$$

לכל $g : X \to [0, \infty]$ מדידה.

הוכחה: בשביל להראות מידה עלינו להראות ש־ν אינה קבועה אינסוף ושהיא σ אדטיבית: ואכן, $\nu(\emptyset) = 0$ ושנית תהיי $\{E_n\}_{n=1}^{\infty}$ סדרת כלשהי של קבוצות מדידות זרות בזוגות ונסמן $E = \bigcup_{n=1}^{\infty} E_n$ ואז

$$(\star)\ \mathbb{1}_E = \mathbb{1}_{\bigcup_{n=1}^{\infty} E_n} = \sum_{n=1}^{\infty} \mathbb{1}_{E_n}$$

ולכן

$$\nu\left(\dot{\bigcup_{n=1}^{\infty}} E_n\right) = \nu(E) \underset{\text{הגדרה}}{=} \int_E h \,\mathrm{d}\mu = \int_X h \mathbb{1}_E \,\mathrm{d}\mu \underset{(\star)}{=} \int_X h \sum_{n=1}^{\infty} \mathbb{1}_{E_n} \,\mathrm{d}\mu$$
$$= \int_X \sum_{n=1}^{\infty} h \cdot \mathbb{1}_{E_n} \,\mathrm{d}\mu = \sum_{n=1}^{\infty} \int_X h \cdot \mathbb{1}_{E_n} \,\mathrm{d}\mu = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{E_n} h \,\mathrm{d}\mu = \sum_{n=1}^{\infty} \nu(E_n)$$

ולכן ν מידה על $(X, \mathcal{A})$.
עבור החלק השני, תהיי $s = \sum_{i=1}^{k} \alpha_i \mathbb{1}_{E_i}$ פונקציה פשוטה, אז

$$\int_X s \,\mathrm{d}\nu = \sum_{i=1}^{k} \alpha_i \nu(E_i) = \sum_{i=1}^{k} \alpha_i \int_{E_i} h \,\mathrm{d}\mu = \sum_{i=1}^{k} \int_{E_i} \alpha_i h \,\mathrm{d}\mu = \sum_{i=1}^{k} \int_X \alpha_i \mathbb{1}_{E_i} h \,\mathrm{d}\mu$$
$$= \int_X \sum_{i=1}^{k} \alpha_i \mathbb{1}_{E_i} h \,\mathrm{d}\mu = \int_X h \cdot \sum_{i=1}^{k} \alpha_i \mathbb{1}_{E_i} \,\mathrm{d}\mu = \int_X h \cdot s \,\mathrm{d}\mu$$

אז עבור g מדידה כלשהי ניקח $\{s_n\}_{n=1}^{\infty}$ סדרה עולה של פונקציות פשוטות כך ש־$s_n \xrightarrow[n\to\infty]{} g$ ונקבל ממשפט ההתכנסות המונוטוניות על מרחב המידה $(X, \mathcal{A}, \nu)$ שמתקיים

$$\int_X g \,\mathrm{d}\nu = \lim_{n\to\infty} \int_X s_n \cdot h \,\mathrm{d}\mu = \int_X g \cdot h \,\mathrm{d}\mu$$

כי $\{s_n \cdot h\}_{n=1}^{\infty}$ היא עולה ו־$s_n \cdot h \xrightarrow[n\to\infty]{} g \cdot h$. □

2.6 הלמה של פאטו

משפט 2.6.1 (הלמה של פאטו): יהי $(X,\mathcal{A},\mu)$ מרחב מידה. אם $\{f_n : X \to [0,\infty]\}_{n=1}^{\infty}$ סדרת פונקציות מדידות כלשהי, אזי

$$\int_X \liminf_{n\to\infty} f_n \,\mathrm{d}\mu \leq \liminf_{n\to\infty} \int_X f_n \,\mathrm{d}\mu$$

הוכחה: לכל $k\in\mathbb{N}$ נסמן $g_k := \inf_{\substack{n\in\mathbb{N}\\ n\Rightarrow k}}\{f_n\}$ אזי הסדרה $\{g_k\}_{k=1}^{\infty}$ סדרה מונוטונית עולה ואי־שלילית.
ממשפט ההתכנסות המונוטונית נקבל

$$\int_X \lim_{k\to\infty} g_k \,\mathrm{d}\mu = \lim_{k\to\infty}\int_X g_k \,\mathrm{d}\mu$$

ומתקיים מהגדרה

$$\lim_{k\to\infty} g_k = \lim_{k\to\infty}\inf_{\substack{n\in\mathbb{N}\\ n\geq k}}\{f_n\} = \liminf_{n\to\infty} f_n$$

וביחד

$$(\star)\quad \int_X \liminf_{n\to\infty} f_n \,\mathrm{d}\mu = \lim_{k\to\infty}\int_X g_k \,\mathrm{d}\mu$$

מצד שני

$$\forall k\in\mathbb{N},\ g_k = \inf_{\substack{n\in\mathbb{N}\\ n\geq k}}\{f_n\} \leq f_k \Longrightarrow g_k \leq f_k$$

ממונטוניות האינטגרל נקבל

$$\forall k\in\mathbb{N},\ a_k := \int_X g_k \,\mathrm{d}\mu \leq \int_X f_k \,\mathrm{d}\mu =: b_k$$

אז לכל $k\in\mathbb{N}$ מתקיים $a_k\leq b_k$ וכן מ־$(\star)$ נובע כי $\lim_{k\to\infty} a_k$ קיים ונקבל

$$\int_X \liminf_{n\to\infty} f_n \,\mathrm{d}\mu \underset{(\star)}{=} \lim_{k\to\infty}\int_X g_k \,\mathrm{d}\mu = \lim_{k\to\infty} a_k \leq \liminf_{k\to\infty} b_k = \liminf_{k\to\infty}\int_X f_k \,\mathrm{d}\mu \Longrightarrow \int_X \liminf_{n\to\infty} f_n \,\mathrm{d}\mu \leq \liminf_{k\to\infty}\int_X f_k \,\mathrm{d}\mu$$

$\square$

2.7 הלמה של בורל־קנטלי

משפט 2.7.1 (הלמה של בורל־קנטלי)**:** יהי $(X, \mathcal{A}, \mu)$ מרחב מידה ותהיי $\mathcal{A} \supseteq (E_n)_{n=1}^{\infty}$ סדרה של קבוצות מדידות כך שמתקיים

$$\sum_{n=1}^{\infty} \mu(E_n) < \infty$$

אז

$$\mu\left(\limsup_{n\to\infty} E_n\right) = 0$$

הוכחה: ממונוטוניות המידה והגדרת החיתוך

$$\limsup_{n\to\infty} E_n = \bigcap_{i=1}^{\infty}\bigcup_{j=i}^{\infty} E_j \implies \mu\left(\limsup_{n\to\infty} E_n\right) = \mu\left(\bigcap_{i=1}^{\infty}\bigcup_{j=1}^{\infty} E_j\right) \underset{\forall i\in\mathbb{N}}{\leq} \mu\left(\bigcup_{j=i}^{\infty} E_j\right) \underset{\text{תת-אדטיביות המידה}}{\leq} \sum_{j=i}^{\infty} \mu(E_j) < \infty$$

כאשר המעבר האחרון נובע מההנחה ומטור זנב ולכן $\lim_{i\to\infty}\sum_{n=i}^{\infty}\mu(E_n) = 0$, כלומר $\mu(\limsup_{n\to\infty} E_n) \leq 0$.
אבל μ מידה ולכן $0 \leq \mu(\limsup_{n\to\infty} E_n)$ כלומר $\mu(\limsup_{n\to\infty} E_n) = 0$. □

משפט 2.7.2 (אי־שיוויון המשולש האינטגרלי): אם $f \in L^1(\mu)$ אזי $\left|\int_X f \, \mathrm{d}\mu\right| \le \int_X |f| \, \mathrm{d}\mu$.

הוכחה: $\int_X f \, \mathrm{d}\mu \in \mathbb{C}$ ולכן קיים $\alpha \in \mathbb{C}$ עם $|\alpha| = 1$ עבורו מתקיים $\alpha \int_X f \, \mathrm{d}\mu = \left|\int_X f \, \mathrm{d}\mu\right| \in \mathbb{R}$ $(\star)$.
נקבל אם־כך

$$\begin{aligned}
\left|\int_X f \, \mathrm{d}\mu\right| &= \alpha \int_X f \, \mathrm{d}\mu \\
&= \underbrace{\int_X \alpha f \, \mathrm{d}\mu}_{\in\mathbb{R}} \\
&= \int_X Re(\alpha f) \, \mathrm{d}\mu + i \cancel{\int_X Im(\alpha f) \, \mathrm{d}\mu} \\
&= \int_X Re(\alpha f) \, \mathrm{d}\mu \\
&\le \int_X |Re(\alpha f)| \, \mathrm{d}\mu \\
&\le \int_X |\alpha f| \, \mathrm{d}\mu = \int_X |f| \, \mathrm{d}\mu
\end{aligned}$$

הערה: שכן אם נסמן $z = \int_X f \, \mathrm{d}\mu$ אז אם $z = 0$ אז $\alpha z = |z| \in \mathbb{R}$ לכל $\alpha \in \mathbb{C}$ עם $|\alpha| = 1$ כי נקבל ש־$0 = 0$.
אחרת, אם $z \neq 0$ אז קיים $\theta \in \mathbb{R}$ כך ש־$z = |z| \cdot e^{i\theta}$ וניקח $\alpha = e^{-i\theta}$ ונקבל

$$\alpha z = e^{-i\theta} \cdot \left(|z| e^{i\theta}\right) = |z| \left(e^{-i\theta} \cdot e^{i\theta}\right)) = |z| \in \mathbb{R}$$

ולכן יש $\alpha \in \mathbb{C}$ המקיים זאת.

$\square$

2.8 משפט ההתכנסות הנשלטת

משפט 2.8.1 (*משפט ההתכנסות הנשלטת*):

הגדרה 2.8.1 (סדרת פונקציות נשלטת): תהיי X קבוצה ותהיי $\{f_n \mid X \to \mathbb{R}\}_{n=1}^{\infty}$ סדרת פונקציות כלשהי ותהיי $g : X \to \mathbb{R}$ פונקציה.
נאמר שהסדרה $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ נשלטת על־ידי הפונקציה g אם ורק אם לכל $n \in \mathbb{N}$ מתקיים $|f_n| \le g$.

תהיי $\{f_n \mid X \to \mathbb{C}\}_{n=1}^{\infty}$ סדרת פונקציות מדידות המתכנסת נקודתית לפונקציה $f : X \to \mathbb{C}$.
אם קיימת $g \in L^1(\mu)$ כך שהסדרה $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ נשלטת על־ידי g אזי $f \in L^1(\mu)$ ומתקיים

$$\int_X |f_n - f| \,\mathrm{d}\mu \xrightarrow[n\to\infty]{} 0$$

ובפרט

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

הוכחה: ראשית מכך ש־$|f_n| \le g$ לכל $n \in \mathbb{N}$ נובע כי $\{f_n\}_{n=1}^{\infty} \subseteq L^1(\mu)$ וגם מתקיים $|f| \le g$ אז $f \in L^1(\mu)$.
בפרט מתקיים לכל $n \in \mathbb{N}$ ש־$|f - f_n| \le 2g$ אז נגדיר $h_n := 2g - |f - f_n|$ ומהלמה של פאטו עבור סדרת הפונקציות $\{h_n\}_{n=1}^{\infty}$ נקבל

$$(\star) \quad \int_X \liminf_{n\to\infty} h_n \,\mathrm{d}\mu \le \liminf_{n\to\infty} \int_X h_n \,\mathrm{d}\mu$$

וכן $h_n \xrightarrow[n\to\infty]{} 2g$ נקודתית, אז בפרט $2g(x) = \liminf_{n\to\infty} h_n(x)$ לכל $x \in X$, אז ייגבע מכך

$$\int_X 2g \,\mathrm{d}\mu = \int_X \liminf_{n\to\infty} h_n \,\mathrm{d}\mu \underset{(\star)}{\le} \liminf_{n\to\infty} \int_X h_n \,\mathrm{d}\mu = \liminf_{n\to\infty} \int_X (2g - |f - f_n|) \,\mathrm{d}\mu$$

מכאן מתקיים

$$\int_X 2g \,\mathrm{d}\mu \le \liminf_{n\to\infty} \int_X (2g - |f - f_n|) \,\mathrm{d}\mu \underset{\text{לינאריות האינטגרל}}{=} \liminf_{n\to\infty} \left(\int_X 2g \,\mathrm{d}\mu - \int_X |f - f_n| \,\mathrm{d}\mu \right)$$

$$= \liminf_{n\to\infty} \int_X 2g \,\mathrm{d}\mu + \liminf_{n\to\infty} \left(- \int_X |f - f_n| \,\mathrm{d}\mu \right) \underset{\liminf_{n\to\infty}(-a_n) = -\limsup_{n\to\infty} a_n}{=} \int_X 2g \,\mathrm{d}\mu - \limsup_{n\to\infty} \int_X |f - f_n| \,\mathrm{d}\mu$$

כלומר

$$\int_X 2g \,\mathrm{d}\mu \le \int_X 2g \,\mathrm{d}\mu - \limsup_{n\to\infty} \int_X |f - f_n| \,\mathrm{d}\mu$$

אבל $g \in L^1(\mu)$ אי־שלילית ולכן $\int_X 2g \,\mathrm{d}\mu < \infty$ ולכן ניתן להחסיר ולקבל $\limsup_{n\to\infty} \int_X |f - f_n| \,\mathrm{d}\mu = 0$ ובפרט מאי־שיוויון המשולש האינטגרלי

$$\left| \int_X f \,\mathrm{d}\mu - \int_X f_n \,\mathrm{d}\mu \right| = \left| \int_X (f - f_n) \,\mathrm{d}\mu \right| \le \int_X |f - f_n| \,\mathrm{d}\mu \xrightarrow[n\to\infty]{} 0$$

□

2.9 אי־שיוויון מרקוב

משפט 2.9.1 (אי־שיוויון מרקוב):

1. תהיי f מדידה ואי־שלילית, אז לכל $0 < a < \infty$ מתקיים

$$\mu(f^{-1}[\alpha,\infty]) \leq \frac{\int f \,\mathrm{d}\mu}{a}$$

2. תהיי $f : X \to [0,\infty]$ אינטגרבילית. אז $\mu(f^{-1}(\{\infty\})) = 0$ והקבוצה $f^{-1}((0,\infty))$ היא σ־סופית.

הוכחה:

1. נגדיר

$$E_a := f^{-1}([a,\infty]) = \{x \in X \mid f(x) \geq a\}$$
$$g(x) = a \cdot \mathbb{1}_{E_a}(x)$$

אם $x \in E_a$ אזי $f(x) \geq a$ ו־$g(x) = a \cdot 1 = a$ ולכן $f(x) \geq g(x)$.
אם $x \notin E_a$ אז $f(x) \geq 0$ ו־$g(x) = a \cdot 0 = 0$ ולכן $f(x) \geq g(x)$ כלומר לכל $x \in X$ מתקיים $g(x) \leq f(x)$.
ממונוטוניות אינטגרל לבג נקבל

$$\int_X g \,\mathrm{d}\mu \leq \int_X f \,\mathrm{d}\mu$$

אבל

$$\int_X g \,\mathrm{d}\mu = \int_X a \cdot \mathbb{1}_{E_a} \,\mathrm{d}\mu = a \cdot \int_X \mathbb{1}_{E_a} \,\mathrm{d}\mu = a \cdot \mu(E_a)$$

כלומר

$$a \cdot \mu(E_a) \leq \int_X f \,\mathrm{d}\mu$$

היות ו־$0 < a < \infty$ ניתן לחלק בלי לשנות את כיוון אי־השיוויון ונקבל

$$\mu(E_a) \leq \frac{1}{a} \int_X f \,\mathrm{d}\mu$$

2. מהמקרה הקודם אנחנו מקבלים שאם $\int f \,\mathrm{d}\mu < \infty$ אזי אגף ימין שואף לאינסוף כאשר $a \to \infty$ ולכן מרציפות המידה מלמעלה (חיתוכים יורדים) נסיק כי

$$\mu(f^{-1}(\{\infty\})) = 0$$

מתקיים

$$\mu\left(f^{-1}\left[\frac{1}{n},\infty\right]\right) < \infty$$

ולכן

$$f^{-1}((0,\infty)) = \bigcup_{n=1}^{\infty} f^{-1}\left(\left[\frac{1}{n},\infty\right]\right)$$

היא σ־סופית.

$\square$

3 קבוצות ממידה אפס

3.1 סדרת פונקציות כמעט־תמיד

משפט 3.1.1 (סדרות פונקציות וכמעט־תמיד): תהיי $\{f_n \mid X \to \mathbb{C}\}_{i=1}^{n}$ סדרת פונקציות מדידות המוגדרות μ־כמעט תמיד.
אם $\sum_{n=1}^{\infty} |f_n| \, \mathrm{d}\mu < \infty$ אז

1. הפונקציה $f : X \to \mathbb{C}$ הנתונה על־ידי $x \mapsto \sum_{n=1}^{\infty} f_n(x)$ מוגדרת μ־כמעט תמיד
2. $f \in L^1(\mu)$
3. $\int_X f \, \mathrm{d}\mu = \sum_{n=1}^{\infty} f_X f_n \, \mathrm{d}\mu$

הוכחה:

1. נניח ש־f_n מוגדרת על קבוצה $S_n \subseteq X$ כך ש־$\mu(S_n^c) = 0$, אז $\varphi = \sum_{n=1}^{\infty} |f_n|$ מוגדרת על $S := \bigcap_{n=1}^{\infty} S_n$ ומתקיים

$$\mu(S^c) = \mu\left(\left(\bigcap_{n=1}^{\infty} S_n\right)^c\right) = \mu\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} S_n^c\right) = 0 \Longrightarrow \mu(S^c) = 0$$

ולכן φ מוגדרת μ־כמעט תמיד ומהטענה אודות החלפת סדר של גבול ואינטגרל עבור טורים של פונקציות אי־שליליות מתקיים

$$\int_X \varphi \, \mathrm{d}\mu = \int_X \sum_{n=1}^{\infty} |f_n| \, \mathrm{d}\mu = \sum_{n=1}^{\infty} \int_X |f_n| \, \mathrm{d}\mu < \infty \Longrightarrow \int_X \varphi \, \mathrm{d}\mu < \infty$$

בפרט $\mu(|\varphi(x)|) < \infty$ μ־כמעט לכל $x \in X$ ולכן $\varphi \in L^1(\mu)$ ולכן עבור μ־כמעט לכל $x \in X$ הטור $\sum_{n=1}^{\infty} f_n(x)$ מתכנס בהחלט μ־כמעט תמיד ולכן הוא מתכנס ב־$\mathbb{C}$ μ־כמעט תמיד ולכן $f = \sum_{n=1}^{\infty} f_n$ מוגדרת μ־כמעט תמיד

2. לכל $k \in \mathbb{N}$ נסמן $g_k := \sum_{n=1}^{k} f_n$ ומתקיים

$$\forall k \in \mathbb{N}, \ |g_k| = \left|\sum_{n=1}^{k} f_n\right| \le \sum_{n=1}^{k} |f_n| \le \sum_{n=1}^{\infty} |f_n| = \varphi \Longrightarrow |g_k| \le \infty$$

כלומר סדרת הפונקציות $\{g_k\}_{k=1}^{\infty}$ נשלטת על־ידי $\varphi \in L^1(\mu)$ ומכאן ממשפט ההתכנסות הנשלטת עבור $f \xrightarrow[k\to\infty]{} g_k$ נובע כי $f \in L^1(\mu)$ וכן מהטענה על החלפת סדר סכום ואינטגרל

$$\int_X f \, \mathrm{d}\mu = \lim_{k\to\infty} \int_X g_k \, \mathrm{d}\mu = \lim_{k\to\infty} \sum_{n=1}^{k} \int_X f_n \, \mathrm{d}\mu = \sum_{n=1}^{\infty} \int_X f_n \, \mathrm{d}\mu \Longrightarrow \int_X f \, \mathrm{d}\mu = \sum_{n=1}^{\infty} \int_X f_n \, \mathrm{d}\mu$$

וזה מוכיח גם את 3.

$\square$

3.2 תנאים שקולים לשלמות

משפט 3.2.1 (תנאים שקולים לשלמות): *תזכורת:* יהי $(X,\mathcal{A},\mu)$ מרחב מידה. נאמר שהם **שלם** אם כל קבוצה $E\subseteq X$ המוכלת בקבוצה ממידה אפס היא מדידה בעצמה. ההשלמה של $(X,\mathcal{A},\mu)$ ניתנת על־ידי ה־σ־אלגברה

$$\overline{\mathcal{A}}:=\{A\cup E\mid A\in\mathcal{A},E\subseteq N,\mu(N)=0\}$$

והמידה

$$\overline{\mu}(A\cup E)=\mu(A)$$

יהי $(X,\mathcal{A},\mu)$ מרחב מידה, אזי הגרירות הבאות נכונות אם ורק אם μ שלמה:

1. אם f מדידה ו־$f=g$ μ־כמעט תמיד, אז g היא מדידה
2. אם $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ סדרת פונקציות מדידות ובנוסף $f_n\to f$ μ־כמעט תמיד, אזי f היא מדידה

הוכחה: בשביל ההוכחה נשתמש בטענה מהסוג הבא שנכונה במרחבי מידה שלמים: נניח כי E,G מדידות ו־$E\subseteq F\subseteq G$ עם $\mu(G\setminus E)=0$.
אז F מדידה: זה נכון כי $F\setminus E\subseteq G\setminus E$ והתלכדות המידות גוררת ש־$\mu(G\setminus E)=0$ ולכן $F\setminus E$ מדידה וגם F.
שלמות $\Longleftarrow$ 1: אם f מדידה ו־$f=g$ μ־כמעט תמיד, נרשום

$$N:=\{x\mid f(x)\neq g(x)\}$$

מאחר ו־N מוכלת בקבוצה ממידה אפס ו־μ שלמה אזי N מדידה.
מתקיים

$$g^{-1}(A)=(g^{-1}(A)\cap f^{-1}(A))\cup(g^{-1}(A)\setminus f^{-1}(A))$$

מאחר ו־N^c היא בידיוק הקבוצה בה הפונקציות מתלכדות, נוכל לכתוב

$$f^{-1}(A)\cap N^c\subseteq f^{-1}(A)\cap g^{-1}(A)\subseteq f^{-1}(A)$$

ומהיות

$$f^{-1}(A)\setminus(f^{-1}(A)\cap N^c)\subseteq N$$

נדע ששרשרת ההכלות היא כפי שמופיע בטענה שנוסחה בתחילת ההוכחה ולכן הקבוצה $f^{-1}(A)\cap g^{-1}(A)$ היא מדידה ובאופן דומה נשים לב

$$g^{-1}(A)\setminus f^{-1}(A)\subseteq N$$

ולכן כקבוצה המוכלת בקבוצה ממידה אפס היא מדידה.
$1\Longleftarrow$ שלמות: תהיי E קבוצה המוכלת בקבוצה ממידה אפס אזי $\mathbb{1}_E=0$ כמעט־תמיד ולכן $\mathbb{1}_E$ מדידה, אבל אינדיקטור מדיד אם ורק אם הקבוצה שהוא מציין מדידה, כלומר E מדידה.
$1\Longleftarrow 2$: מאחר והוכחנו ש־1 שקול לשלמות, אז μ שלמה. נניח ש־$f_n\to f$ μ־כמעט תמיד.
לכן קיימת קבוצה N כך ש־$\mu(N)=0$ ובנוסף $f_n(x)\to f(x)$ לכל $x\in N^c$ ונגדיר

$$\tilde{f}_n(x)=\begin{cases}f_n(x) & x\in N^c\\ 0 & x\in N\end{cases}$$

אזי מהסעיף הקודם לכל $n\in\mathbb{N}$ מתקיים ש־$\tilde{f}$ מדידה כי $\tilde{f}_n=f_n$ μ־כמעט תמיד ו־$\tilde{f}$ מתכנסת נקודתית לפונקציה

$$\tilde{f}(x)=\begin{cases}f(x) & x\in N^c\\ 0 & x\in N\end{cases}$$

ולכן $\tilde{f}$ מדידה ול־$f=\tilde{f}$ μ־כמעט תמיד ולכן f מדידה.
$2\Longleftarrow 1$: נניח ש־$f=g$ μ־כמעט תמיד ו־f מדידה, אז נגדיר את f_n להיות הסדרה הקבועה $f_n=f$ ומתקיים $f_n\to g$ כמעט־תמיד ולכן g מדידה מההנחה של 2, כנדרש. □

3.3 תנאים שקולים לפונקציה אפסה כמעט־תמיד

משפט 3.3.1 (תנאים שקולים לפונקציה אפסה כמעט־תמיד):

1. אם $f : X \to [0, \infty]$ מדידה עם $\int_X f \,\mathrm{d}\mu = 0$ אם ורק אם $f \underset{\mu}{=} 0$
2. אם $f : X \to \mathbb{C}$ מדידה ולכל $E \in \mathcal{A}$ מתקיים $\int_E f \,\mathrm{d}\mu = 0$ אזי $f \underset{\mu}{=} 0$

הוכחה:

1. ההנחה ש־$\int_X f \,\mathrm{d}\mu = 0$ גוררת ש־$\mu\big(\{x \in X \mid f(x) \geq \frac{1}{n}\}\big) = 0$ הכח $n \in \mathbb{N}$ ולכן $f = 0$, μ־כמעט תמיד
2. נסמן $f = u + iv$ ותהיי $E = \{x \in X \mid u(x) \geq 0\}$. אז מהגדרת E ומההנחה שלכל $E \in \mathcal{A}$ מתקיים $\int_E f \,\mathrm{d}\mu = 0$ נובע $\int_E Re(f) \,\mathrm{d}\mu =$ 0 ולכן לכל $h \in \{u, v\}$ מתקיים

$$0 = \int_E Re(f) \,\mathrm{d}\mu = \int_E h \,\mathrm{d}\mu = \int_X h^{\pm} \,\mathrm{d}\mu \Longrightarrow h^{\pm} \underset{\mu}{=} 0$$
$$\Longrightarrow h^{\pm} \underset{\mu}{=} 0 \Longrightarrow u^{\pm}, v^{\pm} \underset{\mu}{=} 0 \Longrightarrow u, v \underset{\mu}{=} 0 \Longrightarrow f \underset{\mu}{=} 0$$

□

3.4 טענה על ממוצעי פונקציה

משפט 3.4.1 (טענה על ממוצעי פונקציה):

תזכורת (ממוצע של פונקציה): יהי $(X, \mathcal{A}, \mu)$ מרחב מידה סופי, תהיי $f \in L^1(\mu)$ ותהיי $E \in \mathcal{A}$ קבוצה מדידה עם $\mu(E) > 0$.
הממוצע של f על E ביחס ל־μ הוא

$$A_E(f) := \frac{1}{\mu(E)} \int_E f \,\mathrm{d}\mu$$

ועכשיו למשפט:

יהי $(X, \mathcal{A}, \mu)$ מרחב מידה סופי ותהיי $f \in L^1(\mu)$. אם $\Omega \subseteq \mathbb{C}$ קבוצה סגורה כך שלכל קבוצה מדידה $E \in \mathcal{A}$ עם $\mu(E) > 0$ מתקיים $A_E(f) \in \Omega$ אז $f(x) \in \Omega$ μ־כמעט לכל $x \in X$.

הוכחה: לכל $r > 0$ ולכל $\alpha \in \mathbb{C}$ נסמן ב־$\overline{B}_r(\alpha)$, הכדור הסגור ברדיוס r סביב α.
מכך ש־Ω סגורה נובע כי Ω^c פתוחה ולכן יש איחוד בן־מנייה של כדורים פתוחים שעל־ידו ניתן לייצג את Ω^c.
אבל ב־$\mathbb{C}$, כל כדור פתוח ניתן להצגה כאיחוד בן־מנייה של כדורים סגורים, ולכן Ω^c היא איחוד בן־מנייה של כדורים סגורים.
לכן, מספיק להראות שעבור כל $\overline{B}_r(\alpha) \subseteq \Omega^c$ מתקיים $\mu\left(f^{-1}\left(\overline{B}_r(\alpha)\right)\right) = 0$, כאשר

$$f^{-1}\left(\overline{B}_r(\alpha)\right) = \left\{x \in X \mid f(x) \in \overline{B}_r(\alpha)\right\}$$

נניח בשלילה שקיים כדור סגור $\overline{B}_r(\alpha) \subseteq \Omega^c$ כך ש־$\mu\left(f^{-1}\left(\overline{B}_r(\alpha)\right)\right) > 0$ ונסמן $E := f^{-1}\left(\overline{B}_r(\alpha)\right)$.
על E מתקיים $|f - \alpha| \le r$ ולכן

$$|A_E(f) - \alpha| = \left|\frac{1}{\mu(E)} \int_E f \,\mathrm{d}\mu - \frac{1}{\mu(E)} \cdot \mu(E) \cdot \alpha\right| = \left|\frac{1}{\mu(E)} \int_E f \,\mathrm{d}\mu - \frac{1}{\mu(E)} \int_E \alpha \,\mathrm{d}\mu\right|$$

$$= \left|\frac{1}{\mu(E)}\left(\int_E f \,\mathrm{d}\mu - \int_E \alpha \,\mathrm{d}\mu\right)\right| \underset{\substack{\text{לינאריות האינטגרל} \\ \mu(E)>0}}{=} \frac{1}{\mu(E)}\left|\int_E (f - \alpha) \,\mathrm{d}\mu\right| \underset{\text{אי־שיוויון המשולש}}{\le} \frac{1}{\mu(E)} \int_E |f - \alpha| \,\mathrm{d}\mu \le \frac{1}{\mu(E)} \int_E r \,\mathrm{d}\mu$$

$$= \frac{1}{\mu(E)} \cdot r \cdot \mu(E) = r$$

כלומר $|A_E(f) - \alpha| \le r$ ולכן $A_E(f) \in \overline{B}_r(\alpha) \subseteq \Omega^c$ ולכן $A_E(f) \in \Omega^c$.
אבל זו סתירה להנחה ש־$A_E(f) \in \Omega$. $\square$

4 משפט ההצגה של ריס

4.1 משפט ההצגה של ריס – יחידות

משפט 4.1.1 (יחידות במשפט ההצגה של ריס): יהי $\Lambda : \mathbb{C}_C(\mathbb{R}) \to \mathbb{C}$ פונקציונל לינארי חיובי ונניח כי μ_1, μ_2 הן מידות על $(\mathbb{R}, \mathrm{Borel}_{\mathbb{R}})$ המקיימות

1. $\int_X f \,\mathrm{d}\mu_i = \Lambda f$ לכל $f \in C_C(\mathbb{R})$
2. $\mu_i(K) < \infty$ לכל $K \subseteq \mathbb{R}$ קומפקטית
3. כל קבוצות בורל ב־$\mathbb{R}$ הן רגולריות פנימית וחיצונית ביחס ל־μ_i

הוכחה: נבחין תחילה ש־μ_1, μ_2 מוגדרות ביחידות על־ידי הערכים שלהן על קבוצות קומפקטיות.

ראשית מ־(2) נובע כי עבור $K \subseteq \mathbb{R}$ קומפקטית מתקיים $\mu_i(K) < \infty$.

יהי $\varepsilon > 0$ ומהרגולריות החיצונית נובע כי קיימת $K \subseteq V$ כאשר V פתוחה כך שמתקיים $\mu_2(V) < \mu_2(K) + \varepsilon$.

מהלמה של אוריסון נובע כי קיימת $f \in C_C(\mathbb{R})$ כך שמתקיים $f(X) \subseteq [0,1]$ ומהלמה של אוריסון מתקיים ש־$K \prec f \prec V$, כלומר $\mathbb{1}_K \le f$ וכן $\mathrm{supp}(f) \subseteq V$ ולכן $\mathbb{1}_{\mathrm{supp}(f)} \subseteq \mathbb{1}_V$ אבל $f(X) \subseteq [0,1]$ ולכן $f \le \mathbb{1}_V$, אזי

$$\mu_1(k) = \int_X \mathbb{1}_K \,\mathrm{d}\mu_1 \le \int_X f \,\mathrm{d}\mu_1 \underset{(1)}{=} \Lambda f \underset{(1)}{=} \int_X f \,\mathrm{d}\mu_2 \le \int_X \mathbb{1}_V \,\mathrm{d}\mu_2 = \mu_2(V) < \mu_2(K) + \varepsilon$$

כלומר $\mu_1(K) \le \mu_2(K)$ לכל K קומפקטית ומהסימטרייה נקבל $\mu_2 \le \mu_1$, כלומר $\mu_1 = \mu_2$. $\square$

5 רגולריות ומידות רדון

5.1 תכונות מידת רדון על מרחב σ־קומפקטי

משפט 5.1.1 (תכונות מידת רדון על מרחב σ־קומפקטי): יהי (X, m, μ) מרחב מידה המכיל את σ־אלגברת בורל על X.
אם X הוא σ־קומפקטי ו־μ מידת רדון אז מתקיימים

1. לכל $\varepsilon > 0$ ולכל $E \in m$ קיימת קבוצה פתוחה $V \subseteq X$ וקבוצה סגורה $F \subseteq X$ עם $F \subseteq E \subseteq V$ כך ש־$\mu(V \setminus F) < \varepsilon$
2. כל קבוצה $E \in m$ היא רגולרית פנימית וחיצונית
3. לכל $E \in m$ קיימות $A, B \in m$ כאשר A היא F_σ ו־B היא G_σ כך ש־$A \subseteq E \subseteq B$ וגם $\mu(B \setminus A) = 0$

הוכחה: ראשית מהיות X σ־קומפקטי נובע שקיים אוסף בן־מנייה של קבוצות קומפקטיות $\{K_n\}_{n=1}^{\infty}$ כך ש־$X = \cup_{n=1}^{\infty} K_n$.

1. תהיי $E \in m$ מדידה
   1. מהיות $\{K_n\}_{n=1}^{\infty}$ כיסוי של X מתקיים ש־$E = \cup_{n=1}^{\infty} E \cap K_n$.
   מהיות μ מידת רדון ו־K_n קומפקטית נובע ש־$\mu(K_n) < \infty$ לכל $n \in \mathbb{N}$ ולכן בפרט ממונוטוניות $\mu(E \cap K_n) < \infty$.
   מהרגולריות החיצונית של μ נובע שלכל $\varepsilon > 0$ קיימת $V_n \in m$ פתוחה עם $E \cap K_n \subseteq V_n$ כך ש־$\mu(V_n) \underset{(\star)}{<} \mu(E \cap K_n) + \frac{\varepsilon}{2^{n+1}}$.
   נסמן $V := \cup_{n=1}^{\infty} V_n$ ומתקיים מכך ש־$E \cap K_n \subseteq K_n$

$$V \setminus E = \left(\bigcup_{n=1}^{\infty} V_n\right) \setminus \left(\bigcup_{n=1}^{\infty} E \cap K_n\right) \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} V_n \setminus (E \cap K_n)$$

ולכן

$$\mu(V \setminus E) \underset{\text{מונוטוניות}}{\leq} \mu\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} V_n \setminus (E \cap K_n)\right) \underset{\text{תת-אדטיביות}}{\leq} \sum_{n=1}^{\infty} \mu(V_n \setminus (E \cap K_n)) = \sum_{n=1}^{\infty} (\mu(V_n) - \mu(E \cap K_n)) \underset{(\star)}{<} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\varepsilon}{2^{n+1}} = \frac{\varepsilon}{2}$$

   2. עבור $E^c \in m$ מתקיים גם ש־$E^c = \cup_{n=1}^{\infty} E^c \cap K_n$ אפשר לעשות את אותו תהליך שוב: מהיות μ מידת רדון נובע כי $E^c \cap K_n$ רגולרית חיצונית ולכן קיימת פתוחה $U_n \in m$ עם $E^c \cap K_n \subseteq U_n$ כך ש־$\mu(U_n) \underset{(\diamondsuit)}{<} \mu(E^c \cap K_n) + \frac{\varepsilon}{2^{n+1}}$.
   נסמן $U := \cup_{n=1}^{\infty} U_n$ ואז U פתוחה כאיחוד של פתוחות ו־$E^c \subseteq U$ (כי $E^c = \cup_{n=1}^{\infty} E^c \cap K_n \subseteq \cup_{n=1}^{\infty} U_n = U$) ונקבל

$$U \setminus E^c = \left(\bigcup_{n=1}^{\infty} U_n\right) \setminus \left(\bigcup_{n=1}^{\infty} E^c \cap K_n\right) \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} U_n \setminus (E^c \cap K_n)$$

ובהתאם

$$\mu(U \setminus E^c) \leq \mu\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} U_n \setminus (E^c \cap K_n)\right) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \mu(U_n \setminus E^c \cap K_n) = \sum_{n=1}^{\infty} \mu(U_n) - \mu(E^c \cap K_n) \underset{(\diamondsuit)}{<} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\varepsilon}{2^{n+1}} = \frac{\varepsilon}{2}$$

אז אם נסמן $F := U^c$ נקבל
1. U פתוחה $\Longleftarrow$ F סגורה
2. $E^c \subseteq U \Longleftarrow U^c \subseteq E \Longleftarrow F \subseteq E$
3. מתקיים

$$E \setminus F = E \cap F^c = F^c \cap E = F^c \setminus E^c \Longrightarrow \mu(E \setminus F) = \mu(F^c \setminus E^c) = \mu(U \setminus E^c) < \frac{\varepsilon}{2}$$

אם כך קיבלנו בסך־הכל קבוצה פתוחה $E \subseteq V$ ו־$F \subseteq E$ סגורה המקיימות

$$(1)\ \mu(V \setminus E) = \mu(V) - \mu(E) < \frac{\varepsilon}{2} \qquad (2)\ \mu(E \setminus F) = \mu(E) - \mu(F) < \frac{\varepsilon}{2}$$

ולכן

$$\mu(V \setminus F) = \underbrace{\mu(V) - \mu(E)}_{\mu(V \setminus E)} + \underbrace{\mu(E) - \mu(F)}_{\mu(E \setminus F)} \underset{(1),(2)}{<} \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon \Longrightarrow \mu(V \setminus F) < \varepsilon$$

2. מהסעיף הקודם, לכל $E \in \mathfrak{m}$ קיימת קיימת קבוצה סגורה $F \in \mathfrak{m}$ עם $F \subseteq E$ ו־$\frac{\varepsilon}{2}$ > $\mu(E \setminus F)$ ושוב מה־σ־קומפקטיות, $F = \cup_{n=1}^{\infty} F \cap K_n$, אבל לכל n, $F \cap K_n$ היא קבוצה קומפקטית (כי חיתוך של קבוצה קומפקטית עם קבוצה סגורה הוא קומפקטי) ולכן לכל $N \in \mathbb{N}$ נובע כי $\cup_{n=1}^{N} (F \cap K_n)$ היא קבוצה קומפקטית כאיחוד סופי של קומפקטיות, אז מרציפות המידה לאיחודים עולים נקבל

$$\lim_{N\to\infty} \mu\left(\bigcup_{n=1}^{N} F \cap K_n\right) = \mu\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} F \cap K_n\right) = \mu(F) \Longrightarrow \mu(F) = \lim_{N\to\infty} \mu\left(\bigcup_{n=1}^{N} F \cap K_n\right)$$

כלומר לכל $\varepsilon > 0$ קיים $N \in \mathbb{N}$ כך שלכל $k \geq N$ מתקיים

$$\mu\left(F \setminus \bigcup_{n=1}^{k} F \cap K_n\right) = \mu(F) - \mu\left(\bigcup_{n=1}^{k} F \cap K_n\right) < \frac{\varepsilon}{2}$$

נסמן $K := \cup_{n=1}^{N} F \cap K_n$ ואז $K \subseteq F \subseteq E$ כאשר K קומפקטית ומאי־השיוויון לעיל נקבל שלכל $\varepsilon > 0$ קיימת $K \subseteq X$ קומפקטית עם $K \subseteq E$ כך שמתקיים

$$\mu(E) - \mu(K) = \mu(E) - \mu(F) + \mu(F) - \mu(K) = \mu(E \setminus F) + \mu(F \setminus K) < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon$$

$$\Longrightarrow \mu(E) - \mu(K) < \varepsilon \Longleftrightarrow \mu(K) > \mu(E) - \varepsilon \Longrightarrow \mu(E) = \sup\{\mu(C) \mid C \subseteq E \text{ קומפקטית } C\}$$

כלומר $E \in \mathfrak{m}$ רגולרית פנימית ומהיות μ מידת רדון ולכן רגולרית חיצונית ביחס לכל קבוצה מדידה, מהיות $E \in \mathfrak{m}$ שרירותי נובע כי סעיף 2 נכון.

3. תהיי $E \in \mathfrak{m}$. מסעיף 1 נובע קיום של $V_n \in \mathfrak{m}$ פתוחה ו־$F_n \in \mathfrak{m}$ סגורה עם $F_n \subseteq E \subseteq V_n$ כך ש־$\mu(V_n \setminus F_n) < \frac{1}{n}$.
נגדיר $A := \cup_{n=1}^{\infty} F_n, B := \cup_{n=1}^{\infty} V_n$ אז A היא F_σ ו־B היא G_σ ומתקיים

$$B \setminus A = \bigcap_{n=1}^{\infty} V_n \setminus \bigcup_{n=1}^{\infty} F_n = \bigcap_{n=1}^{\infty} V_n \cap \left(\bigcup_{n=1}^{\infty} F_n\right)^c = \left(\bigcap_{n=1}^{\infty} V_n\right) \cap \left(\bigcap_{n=1}^{\infty} F_n^c\right) \subseteq \bigcap_{n=1}^{\infty} (V_n \cap F_n^c) = \bigcap_{n=1}^{\infty} (V_n \setminus F_n)$$

אבל $\mu(V_n \setminus F_n) < \frac{1}{n}$ ולכן

$$\forall n \in \mathbb{N},\ 0 \leq \mu(B \setminus A) \leq \mu\left(\bigcap_{n=1}^{\infty} V_n \setminus F_n\right) \underset{\bigcap_{n=1}^{\infty} V_n \setminus F_n \subseteq V_n \setminus F_n}{\leq} \mu(V_n \setminus F_n) < \frac{1}{n} \xrightarrow[n\to\infty]{} 0$$

$\square$

5.2 תנאים שגוררים שמידה היא מידת רדון

משפט 5.2.1 (תנאים שגוררים שמידה היא מידת רדון): יהי X מרחב האוסדרוף קומפקטי־מקומית המקיים שכל קבוצה פתוחה בו היא σ־קומפקטית. אם μ מידה על $\mathbb{B}(X)$ המקיימת $\mu(K)<\infty$ לכל $K\subseteq X$ קומפקטית, אזי μ היא מידת רדון על $\mathscr{m}$ וכל קבוצה מדידה $E\in\mathscr{m}$ היא רגולרית פנימית וחיצונית.

הוכחה: נחלק את ההוכחה לשלבים כדי לבנות מפתח:

1. **סופית על קומפקטיות:** מהיות μ סופית על קומפקטיות, נקבל ש־$\Lambda f=\int_X f\,\mathrm{d}\mu$ היינו פונקציונל לינארי חיובי על $C_c(X)$.
2. **משפט ההצגה של ריס:** ממשפט ההצגה של ריס נובע שקיימת מידת רדון λ על X המקיימת $\int_X f\,\mathrm{d}\lambda \underset{(\star)}{=} \int_X f\,\mathrm{d}\mu$, לכל $f\in C_C(X)$.
3. **שימוש ב־σ־קומפקטיות:** תהיי $V\in\mathscr{m}$ פתוחה, מהנתון נובע שהיא σ־קומפקטית ולכן קיים אוסף $\{K_n\}_{n=1}^{\infty}$ של קבוצות קומפקטיות כך שמתקיים
$$V=\bigcup_{n=1}^{\infty}K_n$$
4. **שימוש בלמה של אוריסון:** מהלמה, נובע שלכל $n\in\mathbb{N}$ קיימת $g_n\in C_C(X)$ עם $K_n\prec g_n\prec V$.
תזכורת (הלמה של אוריסון): כי מהלמה של אוריסון, במרחב האוסדרוף קומפקטי־מקומית, לכל $K,V\subseteq X$ עם $K\subseteq V$ כאשר K קומפקטית ו־V פתוחה, קיימת $f\in C_C(X)$ המקיימת $K\prec f\prec V\iff \mathbb{1}_K\le f,\operatorname{supp}(f)\subseteq V$
5. **משפט ההתכנסות המונוטונית:** תהיי $\{f_N\}_{N=1}^{\infty}$ סדרת פונקציות המוגדרת על־ידי
$$\forall N\in\mathbb{N},\ f_N\coloneqq\max_{i\in[N]}\{g_i\}$$
נשים לב שמתקיים
   1. $\{f_N\}_{N=1}^{\infty}\subseteq C_C(X)$
   2. $\{f_N\}_{N=1}^{\infty}$ מונוטונית עולה
   3. $f_N\xrightarrow[N\to\infty]{}\mathbb{1}_V$ נקודתית כי $V=\cup_{n=1}^{\infty}K_n$ ו־$K_n\prec g_n\prec V$

   אם־כך, אנחנו מקיימים את תנאי משפט ההתכנסות המונוטונית ולכן נקבל
$$\mu(V)=\int_X\mathbb{1}_V\,\mathrm{d}\mu=\int_X\lim_{N\to\infty}f_N\,\mathrm{d}\mu=\lim_{N\to\infty}\int_X f_N\,\mathrm{d}\mu=\lim_{N\to\infty}\int_X f_N\,\mathrm{d}\lambda=\int_X\lim_{N\to\infty}f_N\,\mathrm{d}\lambda=\int_X\mathbb{1}_V\,\mathrm{d}\lambda$$
כלומר לכל $V\in\mathscr{m}$ פתוחה מתקיים $\mu(V)=\lambda(V)$
6. **שימוש בתכונות מידת רדון:** יהי $\varepsilon>0$, מהיות λ מידת רדון נובע שלכל $E\in\mathscr{m}$ קיימת קבוצה פתוחה $U\subseteq X$ וקבוצה סגורה $F\subseteq X$ עם $F\subseteq E\subseteq U$ כך ש־$\mu(V\setminus F)<\varepsilon$.
בפרט, נובע מהיות $F\subseteq E$ כי $U\setminus E\subseteq U\setminus F$ ולכן ממונוטוניות $\lambda(U\setminus E)\underset{(\star)}{<}\varepsilon$.
אבל $U\setminus F$ היא פתוחה (כי הפרש של פתוחה וסגורה היא פתוחה) ו־$\mu(V)=\lambda(V)$ לכל פתוחה ומדידה, ולכן $\mu(U\setminus F)=\lambda(U\setminus F)<\varepsilon$, כלומר
$$\mu(U)-\mu(E)\underset{\text{מונוטוניות}}{\le}\mu(U)-\mu(F)=\mu(U\setminus F)<\varepsilon\Longrightarrow\mu(U)-\varepsilon<\mu(E)$$
ולכן מתקיים
$$\lambda(E)-\varepsilon\underset{\text{מונוטוניות}}{\le}\lambda(U)-\varepsilon\underset{\substack{\lambda(U)=\mu(U)\\ \text{עבור } U \text{ פתוחה}}}{=}\mu(E)\underset{\text{מונוטוניות}}{<}\mu(U)\underset{\substack{\lambda(U)=\mu(U)\\ \text{עבור } U \text{ פתוחה}}}{=}\lambda(U)\underset{\star}{<}\lambda(E)+\varepsilon$$
$$\Longrightarrow\lambda(E)-\varepsilon<\mu(E)<\lambda(E)+\varepsilon\iff-\varepsilon<\mu(E)-\lambda(E)<\varepsilon\iff|\mu(E)-\lambda(E)|<\varepsilon$$
מהיות ε שרירותי נובע כי $\mu(E)=\lambda(E)$ לכל $E\in\mathscr{m}$ כלומר $\lambda=\mu$ ולכן μ מידת רדון, ומתכונות מידת רדון נובע כי כל קבוצה מדידה $E\in\mathscr{m}$ היא רגולרית פנימית וחיצונית.

$\square$

6 התכנסות חלשה-*

משפט 6.0.1: תכניסי פה את הטענה מהמבחן

7 שלושת העקרונות של Littlewood

7.1 משפט לוזין

משפט 7.1.1 (*משפט לוזין*): יהי X מרחב האוסדרוף קומפקטי מקומית ותהיי μ מידת רדון על X.
תהיי $f : X \to \mathbb{C}$ מדידה המקיימת $A \supseteq \{x \mid f(x) \neq 0\}$ כאשר $\mu(A) < \infty$.
אזי לכל $\varepsilon > 0$ קיימת $g \in C_C(X)$ עבורה $\mu(\{x \mid f(x) \neq g(x)\}) < \varepsilon$.

הוכחה הוכחה במרחב מידה סופי: נוכיח את משפט לוזין במקרה של מרחב מידה X ממידה סופית ונשתמש במשפט אגרוב/אגורוף.
יהי $\varepsilon > 0$, אם $f = \mathbb{1}_E$ עבור E מדידה, מרגולריות נוכל למצוא $F \subseteq E \subseteq U$ כך ש־F קומצפקטית ו־U פתוחה ו־$\mu(U \setminus F) < \varepsilon$.
מהלמה של אוריסון נוכל בחור $\mathbb{1}_K \leq g \leq \mathbb{1}_U$ רציפה וזה מסיים עבור פונקציות מציין.
עבור פונקציות פשוטות שהן הסכום של k פונקציות מציינות נשתמש בלוזין עבור פונקצייה מציינת לכל אחת מהן כשנזרוק כל פעם $\frac{\varepsilon}{k}$ ושוב נסיים.
אם f מדידה ניקח סדרה של פשוטות המתכנסות אליה $f \to s_n$. ממשפט לוזין לפונקציות פשוטות נוכל לכל n לבחור g_n המתלכדת עם s_n מחוץ לקבוצה ממידה $\frac{\varepsilon}{2} \cdot 2^{-n}$.
אז מחוץ לאיחוד כל הקבוצות האלו שמתת־אדטיביות תהיה לו מידה $\frac{\varepsilon}{2}$ לכל היותר מתקיים $f \to g_n$. בעזרת משפט אגרוב/אגורוף נוכל לזרוק עוד קבוצה ממידה $\frac{\varepsilon}{2}$ שמחוץ אליה $f \to g_n$ במידה שווה ואז קיבלנו שמחוץ לקבוצה ממידה ε יש סדרת פונקציות המתכנסת ל־f במידה שווה, כלומר f רציפה בקבוצה זו. $\square$

7.2 משפט אגרוב/אגורוף

משפט 7.2.1 (משפט אגרוב/אגורוף): יהי $(X,\mathcal{A},\mu)$ מרחב מידה סופי ונניח כי $f_n : X\to\mathbb{R}$ מתכנסת כמעט־תמיד ל־$f : X\to\mathbb{R}$ מדידה. אז לכל $\varepsilon>0$ קיימת $E\in\mathcal{A}$ עם $\mu(E)<\varepsilon$ כך ש־$f_n\to f$ במידה שווה ב־E^c.

הוכחה: יהי $\varepsilon>0$ ונסמן

$$n_k(x) := \min\left\{n \mid \forall N>n,\ |f_N(x)-f(x)|<\frac{1}{k}\right\} \qquad (\min(\emptyset)=\infty)$$

עבור $x\in X$, $f_n(x)\to f(x)$ מתקיים $n_k(x)<\infty$ לכל $k\in\mathbb{N}$ ולכן מהנתון על התכנסות כמעט־תמיד נובע ש־$n_k^{-1}(\{\infty\})$ היא ממידה אפס לכל $k\in\mathbb{N}$.

נסתכל על הקרנות $(0,m)$ עבור $m\in\mathbb{N}$ ונקבל ש־n_k מדידה:

$$x\in n_k^{-1}((0,m)) \iff n_k(x)\geq m \iff x\in\bigcup_{N\geq m}\left\{x \mid |f_N(x)-f(x)|<\frac{1}{k}\right\}$$

והימנית מדידה, אז

$$\bigcap_{m=1}^{\infty} n_k^{-1}((m,\infty]) = n_k^{-1}(\{\infty\})$$

מרציפות מלמעלה (ניתן להשתמש כי הנחנו שהמרחב מידה סופי).

אז לכל $k\in\mathbb{N}$ הסדרה $\mu(n_k^{-1}((m,\infty]))$ מתכנסת ל־0.

לכל $k\in\mathbb{N}$ נבחר m_k כך שלכל $m>m_k$ מתקיים

$$\mu(n_k^{-1}((m,\infty]))<\varepsilon\cdot 2^{-k} \implies \mu\left(\bigcup_{k=1}^{\infty} n_k^{-1}((m_k,\infty])\right) < \sum_{k=1}^{\infty}\varepsilon\cdot 2^{-k}=\varepsilon$$

אז $E=\bigcup_{k=1}^{\infty} n_k^{-1}((m_k,\infty])$ ולכן לכל $x\in E^c$ ולכל $k\in\mathbb{N}$ מתקיים $x\notin n_k^{-1}((m_k,\infty])$ כלומר $n_k(x)\leq m_k(x)$ כלומר לכל $N\geq m_k$ מתקיים $|f_N(x)-f(x)|<\frac{1}{k}$ ולכן $f_n\to f$ במידה שווה ב־E^c. $\square$

8 מרחבי L^p

8.1 אי־שוויון יאנסן

משפט 8.1.1 (אי־שוויון יאנסן): יהי $(X,\mathcal{A},\mu)$ מרחב הסתברות ותהיי $\varphi:(a,b)\to\mathbb{R}$ קמורה. אם $f:X\to(a,b)$ פונקציה מדידה, אזי

$$\varphi\left(\int_X f\,\mathrm{d}\mu\right)\le\int_X\varphi\circ f\,\mathrm{d}\mu$$

הוכחה: נסמן $T:=\int_X f\,\mathrm{d}\mu$.
מהיות $Im(f)\subseteq(a,b)$ ומהיות X מרחב הסתברות, נובע ש־$T\in(a,b)$ ונסמן

$$\beta:=\sup_{s\in(a,T)}\left\{\frac{\varphi(T)-\varphi(s)}{T-s}\right\}$$

אזי לכל $s\in(a,b)$ עם $s<T$ מתקיים

$$\frac{\varphi(T)-\varphi(s)}{T-s}\le\beta\iff\varphi(T)-\varphi(s)\le\beta(T-s)\iff\varphi(s)\ge\varphi(T)+\beta(s-T)$$

φ קמורה ולכן מהאיפיון השקול לקמירות עבור $s\in(a,b)$ עם $s>T$ מתקיים

$$\frac{\varphi(T)-\varphi(s)}{s-T}\ge\beta\iff\varphi(s)-\varphi(T)\ge\beta(s-T)\iff\varphi(s)\ge\varphi(T)+\beta(s-T)$$

ולכן לכל $s\in(a,b)$ מתקיים $\varphi(s)\ge\varphi(T)+\beta(s-T)$.
בפרט זה נכון לכל $x\in X$ (כי $s=f(x)$) ולכן $\varphi\circ f\ge\varphi(T)+\beta(f-T)$ ונקבל

$$\int_X\varphi\circ f\,\mathrm{d}\mu\underset{\text{מונוטוניות האינטגרל}}{\ge}\int_X(\varphi(T)+\beta(f-T)\,\mathrm{d}\mu)\underset{\text{לינארית האינטגרל}}{=}\int_X\varphi(T)\,\mathrm{d}\mu+\beta\left(\int_X f\,\mathrm{d}\mu-\int_X T\,\mathrm{d}\mu\right)$$

$$=\varphi(T)\varphi(X)+\beta(T-T\mu(X))\underset{\mu(X)=1}{=}\varphi(T)+\beta(T-T)=\varphi\left(\int_X f\,\mathrm{d}\mu\right)$$

$\square$

8.2 אי־שיוויון הולדר ואי־שיוויון מניקובסקי

משפט 8.2.1 (אי־שיוויון הולדר ואי־שיוויון מניקובסקי): יהי $(X, \mathcal{A}, \mu)$ מרחב מידה ונניח כי $1 \le p, q \le \infty$ ומקיימים

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$$

אז לכל f, g מדידות אי־שליליות מתקיימים

$$(1)\ \int_X fg \, \mathrm{d}\mu \le \left(\int_X f^p \, \mathrm{d}\mu\right)^{\frac{1}{p}} \left(\int_X g^p \, \mathrm{d}\mu\right)^{\frac{1}{q}}$$

$$(2)\ \left(\int_X (f+g)^p \, \mathrm{d}\mu\right)^{\frac{1}{p}} \le \left(\int_X f^p \, \mathrm{d}\mu\right)^{\frac{1}{p}} + \left(\int_X g^p \, \mathrm{d}\mu\right)^{\frac{1}{p}}$$

כאשר הראשון זה אי־שיוויון הולדר והשני הוא אי־שיוויון מניקובסקי ואם $p = q = 2$ זה אי־שיוויון קושי־שוורץ.

הוכחה: נוכיח את (1) בהנחה ש־$\|f\|_p = \|g\|_q = 1$ ונראה כי $\|fg\|_1 \le 1$: $\log$ היא פונקציה קעורה ולכן אם נניח ש־$fg \neq 0$ נקבל

$$\log(fg) = \log f + \log g = \frac{\log f^p}{p} + \frac{\log g^q}{q} \le \log\left(\frac{f^p}{p} + \frac{g^q}{q}\right)$$

ואם נעלה את e בחזקת אלו נקבל

$$(\star)\ fg \le \frac{f^p}{p} + \frac{g^q}{q}$$

אי־שיוויון זה טריוויאלי במקרה שבו $fg = 0$ ולכן נוכל להתעלם מההנחה הזאת ומלינאריות, מונוטוניות ומההנחה ש־$\|f\|_p = \|g\|_q = 1$ נקבל

$$\int_X \frac{f^p}{p} + \frac{g^q}{q} \, \mathrm{d}\mu = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$$

ואם ניקח אינטגרל על שני האגפים, $(\star)$ יביא לנו $\|fg\|_1 \le 1$.
כדי להוכיח את (2) נניח ש־$\|f\|_p = \|g\|_p = 1$ ונשתמש בקמירות x^p ונקבל שלכל $t \in (0,1)$

$$((1-t)f + tg)^p \le (1-t)f^p + tg^p$$

ושוב מלינאריות וממונוטוניות

$$\int_X ((1-t)f + tg)^p \, \mathrm{d}\mu = (1-t) + t = 1$$

ולכן

$$\|(1-t)f + tg\|_p^p \le 1$$

כלומר $\|(1-t)f + tg\| \le 1$.
ללא ההנחה, נכתוב את $f + g$ כממוצע משוקלל של פונקציות מנורמה 1, כלומר $g = \|g\|_p \overline{g}, f = \|f\|_p \overline{p}$ ונקבל

$$\|f+g\|_p = \left\|\overline{f} \cdot \|f\|_p + \overline{g}\|g\|_p\right\|_p = \left(\|f\|_p + \|g\|_p\right) \cdot \left\|\overline{f}\frac{\|g\|_p}{\|f\|_p + \|g\|_p} + \overline{g}\frac{\|f\|_p}{\|f\|_p + \|g\|_p}\right\|_p$$

נבחין שאת גורם המכפלה מימין הוא בידיוק ביטוי של נורמה של ממוצע משוקלל של פונקציות מנורמה 1 ולכן נוכל לחסום אותו מלעיל על־ידי 1 ולקבל

$$\|f+g\|_p \le \|f\|_p + \|g\|_p$$

$\square$

8.3 $\mathcal{L}^p(\mu)$ הוא מרחב וקטור מעל $\mathbb{C}$

משפט 8.3.1 ($\mathcal{L}^p(\mu)$ הוא מרחב וקטור מעל $\mathbb{C}$): $\mathcal{L}^p(\mu)$ הוא מרחב וקטורי מעל $\mathbb{C}$.

הוכחה:

משפט 8.3.2: אם $p,q \in [1,\infty]$ חזקות צמודות ו־$f \in \mathcal{L}^p(\mu), g \in \mathcal{L}^q(\mu)$ אזי $f \cdot g \in \mathcal{L}^1(\mu)$.

הוכחה: עבור $p,q \in (1,\infty)$ הטענה נובעת מאי־שיוויון הולדר. אם $p = 1$ ו־$q = \infty$ מתקיים $g \in \mathcal{L}^\infty(\mu)$ וגם $(\star)\ |g(x)| \le \|g\|_\infty$ μ-כמעט תמיד ולכן

$$\|f \cdot g\|_1 = \int_X |f \cdot g| \,\mathrm{d}\mu = \int_X |f| \cdot |g| \,\mathrm{d}\mu \underset{(\star)}{\le} \int_X |f| \cdot \|g\|_\infty \,\mathrm{d}\mu = \|g\|_\infty \cdot \int_X |f| \,\mathrm{d}\mu < \infty$$

כלומר $\|f \cdot g\|_1 < \infty$ ולכן $f \cdot g \in \mathcal{L}^1(\mu)$. $\square$

משפט 8.3.3 (אי־שיוויון המשולש של נורמת p): אם $p \in [1,\infty]$ אזי לכל $f,g \in \mathcal{L}^p(\mu)$ מתקיים $\|f+g\|_p \le \|f\|_p + \|g\|_p$.

הוכחה: אם $p \in (1,\infty)$ אז הטענה נובעת מאי־שיוויון מניקובסקי.

אם $p \in \{1,\infty\}$ אז הטענה נובעת מאי־שיוויון המשולש של הערך המוחלט ב־$\mathbb{R}$. $\square$

הוכחה: נשאר להראות הומגניות – אם $f \in \mathcal{L}^p(\mu)$ ו־$\lambda \in \mathbb{C}$ אזי $\lambda \cdot f \in \mathcal{L}^p(\mu)$:

$$\int_X |f\lambda f|^p \,\mathrm{d}\mu = \int_X (|\lambda| \cdot |f|)^p \,\mathrm{d}\mu = \int_X |\lambda|^p \cdot |f|^\lambda \,\mathrm{d}\mu = |\lambda|^p \int_X |f|^p \,\mathrm{d}\mu < \infty$$

כאשר השתמשנו בתכונות ערך המוחלט ומהומוגניות האינטגרל למכפלה בקבוע.

אי־השיוויון האחרון נובע מהיות $|\lambda|^p < \infty$ ומהיות $\int |f|^p \,\mathrm{d}\mu < \infty$ כי $f \in \mathcal{L}^p$ ולכן המכפלה היא סופית. $\square$

8.4 טענות חשובות מתרגילי הבית

משפט 8.4.1 (טענות חשובות מתרגילי הבית):

משפט 8.4.2 (הכלת מרחבי L^p): יהי $(X,\mathcal{A},\mu)$ מרחבי מידה σסופי ויהיו $q \leq p \in [1,\infty]$

1. $L^p(\mu) \subseteq L^q(\mu) \iff \mu(X) < \infty$
2. $L^q(\mu) \subseteq L^p(\mu) \iff \exists \varepsilon > 0,\ \forall A \in \mathcal{A},\ \mu(A) < \varepsilon \implies \mu(A) = 0$

משפט 8.4.3 (תכונות L^∞): נניח ש־$(X,\mathcal{A},\mu)$ מרחב מידה סופי ותהיי $f \in L^\infty(\mu)$

1. אם $\|f\|_\infty = 1$ אז הסדרה $\{a_n\}_{n=1}^\infty$ המוגדרת על־ידי $a_n = \int_X |f|^n \,\mathrm{d}\mu$ מתכנסת
2. אם $\|f\|_\infty > 0$ אזי

$$\lim_{n\to\infty} \frac{\|f\|_{n+1}^{n+1}}{\|f\|_n^n} = \|f\|_\infty$$

8.5 לכל $p\in[1,\infty]$, המרחב הנורמי $\left(L^p(\mu),\|\cdot\|_p\right)$ הוא מרחב בנך

משפט 8.5.1 (לכל $p\in[1,\infty]$ המרחב הנורמי $\left(L^p(\mu),\|\cdot\|_p\right)$ הוא מרחב בנך): לכל $p\in[1,\infty]$, המרחב הנורמי $\left(L^p(\mu),\|\cdot\|_p\right)$ הוא מרחב בנך (אם ורק אם הוא שלם במטריקה המושרית מהנורמה, כלומר כל סדרת קושי היא מתכנסת).

הוכחה: תהיי $\left\{[f_n]_\mu\right\}_{n=1}^{\infty}\subseteq L^p(\mu)$ סדרת קושי ותהיי $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ נציגים של מחלקות שקילות אלו.

1. נניח ש־$p\in[1,\infty)$, אז לכל $k\in\mathbb{N}$ קיים $n_k\in\mathbb{K}$ כך ש־$\left\|f_{n_{k+1}}-f_{n_k}\right\|<\frac{1}{2^k}$ כי הסדרה קושי.
תהיי $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ $\left\{f_{n_k}\right\}_{k=1}^{\infty}$ תת־הסדרה המקיימת זאת ולכל $k\in\mathbb{N}$ נגדיר

$$g_k:=\sum_{i=1}^{k}\left|f_{n_{i+1}}-f_{n_i}\right|$$

ומתקיים

$$\|g_k\|_p=\left\|\sum_{i=1}^{k}\left|f_{n_{i+1}}-f_{n_i}\right|\right\|_p\le\sum_{i=1}^{k}\left\|f_{n_{i+1}}-f_{n_i}\right\|_p<\sum_{i=1}^{k}\frac{1}{2^i}<\infty$$

ולכן $g_k\in L^p(\mu)$ ונסמן $g:=\sum_{i=1}^{\infty}\left|f_{n_{i+1}}-f_{n_i}\right|$ והסדרה $\left\{g_k^p=\left[\sum_{i=1}^{k}\left|f_{n_{i+1}}-f_{n_i}\right|\right]^p\right\}_{k=1}^{\infty}$ היא סדרה מונוטוניות עולה של פונקציות אי־שלילית המקיימת $g_k^p\xrightarrow[k\to\infty]{}g^p=\left[\sum_{i=1}^{\infty}\left|f_{n_{i+1}}-f_{n_i}\right|\right]^p$ נקודתית, אז ממשפט ההתכנסות המונוטונית נקבל

$$\|g\|_p^p=\int_X\left(\sum_{i=1}^{\infty}\left|f_{n_{i+1}}-f_{n_i}\right|\right)^p\mathrm{d}\mu=\int_X g^p\,\mathrm{d}\mu=\lim_{k\to\infty}\int_X g_k^p\,\mathrm{d}\mu=\lim_{k\to\infty}\|g_k\|_p^p<1$$

כאשר אי־השיוויון האחרון נובע מהיות

$$\|g_k\|_p<\sum_{i=1}^{k}\frac{1}{2^i}<\sum_{i=1^\infty}\frac{1}{2^i}\underset{\text{סכום טור הנדסי}}{=}\frac{\frac{1}{2}}{1-\frac{1}{2}}=1\Longrightarrow\|g_k\|_p<1\Longrightarrow\|g_k\|_p^p<1$$

ולכן בפרט $\|g\|_p<1$ ולכן $g(x)<\infty$ μ־כמעט לכל $x\in X$ כלומר הטור מתכנס בהחלט μ־כמעט תמיד אז נגדיר

$$f:=f_{n_1}+\sum_{i=1}^{\infty}\left(f_{n_{i+1}}-f_{n_i}\right)$$

ונרצה להראות שהסדרה $\{f_m\}_{m=1}^{\infty}$ מתכנסת ל־f וכן ש־$f\in L^p(\mu)$: f מוגדרת μ־כמעט תמיד לכן נקבע $f=0$ היכן ש־f לא מוגדרת ואז

$$f(x)=f_{n_1}+\sum_{i=1}^{\infty}\left(f_{n_{i+1}}-f_{n_i}\right)=\lim_{i\to\infty}f_{n_i}(x)$$

שכן זהו טור טלסקופי ולכל $m\in\mathbb{N}$ מתקיים $\left|f_m-f_{n_i}\right|^p\xrightarrow[i\to\infty]{}|f_m-f|^p$ כמעט לכל $x\in X$, אז

$$\|f_m-f\|_p^p=\int_X|f_m-f|^p\,\mathrm{d}\mu=\int_X\liminf_{i\to\infty}\left|f_m-f_{n_i}\right|^p\mathrm{d}\mu\underset{\text{פאטו}}{\le}\liminf_{i\to\infty}\int_X\left|f_m-f_{n_i}\right|^p\mathrm{d}\mu=\liminf_{i\to\infty}\left\|f_m-f_{n_i}\right\|_p^p$$

אבל $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ היא סדרת קושי, אז לכל $\varepsilon>0$ קיים $N\in\mathbb{N}$ כך שלכל $n,m\in\mathbb{N}$ עם $n,m>N$ מתקיים $\left\|f_m-f_{n_i}\right\|_p<\varepsilon$ ובפרט עבור $m>N$ נקבל

$$\|f_m-f\|_p^p\le\liminf_{i\to\infty}\left\|f_m-f_{n_i}\right\|_p^p<\varepsilon^p\Longrightarrow f_m\xrightarrow[m\to\infty]{\|\cdot\|_p}f$$

וכן

$$\|f\|_p\underset{\text{אי־שיוויון המשולש}}{\le}\|f-f_m\|_p+\|f_m\|_p<\infty\Longrightarrow f\in L^p(\mu)$$

2. אם $p=\infty$ אז $\{f_n\}_{n=1}^{\infty} \subseteq L^{\infty}(\mu)$ סדרת קושי של נציגים עבורה קיימת תת־סדרה $\left\{f_{n_i}\right\}_{i=1}^{\infty}$ כך שמתקיים

$$\forall i \in \mathbb{N},\ \left\|f_{n_{i+1}}-f_{n_i}\right\|_{\infty}<\frac{1}{2^k}$$

נסמן לכל $n \in \mathbb{N}, k \in \mathbb{N}$

$$A_n := \left\{x \in X \mid |f_n(x)| > \|f_n\|_{\infty}\right\} = |f_n|^{-1}\left(\left(\|f_n\|_{\infty}, \infty\right]\right)$$

$$B_{n,k} := \left\{x \in X \mid |f_n(x)-f_k(x)| > \|f_n-f_k\|_{\infty}\right\} = |f_n-f_k|^{-1}\left(\left(\|f_n-f_k\|_{\infty}, \infty\right]\right)$$

אבל $f_n \in L^{\infty}(\mu)$ אז מהגדרה $\|\cdot\|_{\infty} = \text{ess sup}\{|\cdot|\}$ ש־$\mu(A_n)=\mu(B_{n,k})=0$ אז

$$E := \left(\bigcup_{n\in\mathbb{N}} A_n\right) \cup \left(\bigcup_{n,k\in\mathbb{N}} B_{n,k}\right)$$

ומ־σ־אדטיביות של μ נקבל $\mu(E)=0$.

כעת $\sum_{i=1}^{\infty}\left(f_{n_{i+1}}-f_{n_i}\right)$ מתכנס במידה שווה ממבחן ה־M של ויירשטראס על $X \setminus E$ (כי $\sum_{k=1}^{\infty} 2^{-k} < \infty$) ולכן $f_{n_1}+\sum_{i=1}^{\infty}\left(f_{n_{i+1}}-f_{n_i}\right)$ מתכנסת במידה שווה ל־f על $X \setminus E$.

אז $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ סדרת קושי ונקבל שהגבול $f(x)=\lim_{n\to\infty} f_n(x)$ מוגדר וקיים μ־כמעט לכל $x \in X$ ו־f חסומה על־ידי $\lim_{n\to\infty}\|f_n\|_{\infty}$ μ־כמעט לכל $x \in X$, כלומר $f \in L^{\infty}(\mu)$ ומתקיים $\|f-f_n\|_{\infty} \xrightarrow[n\to\infty]{} 0$.

□

8.6 $L^p(\mu)$ צפופה ב־$\mathcal{S}$

משפט 8.6.1 ($\mathcal{S}$ צפופה ב־$L^p(\mu)$): יהי $\mathcal{S} \subseteq \mathbb{C}^X$ האוסף הנתון על־ידי

$$\mathcal{S} := \{s : X \to \mathbb{C}, \text{פשוטה } s \mid \mu(\{x \in X \mid s(x) \neq 0\}) < \infty\}$$

אזי לכל $p \in [1, \infty)$ מתקיים ש־$\mathcal{S}$ צפופה ב־$L^p(\mu)$ (כלומר, לכל $f \in L^p(\mu)$ קיימת סדרת פונקציות $\{s_n\}_{n=1}^\infty \subseteq \mathcal{S}$ כך ש־f $(s_n \xrightarrow[n\to\infty]{\|\cdot\|_p}$.

הוכחה: מכך שלכל $s \in \mathcal{S}$ מתקיים $|s(X)| < \infty$, יחד עם התנאי $\mu(\{x \in X \mid s(x) \neq 0\}) < \infty$ נסיק כי $S \subseteq L^p(\mu)$ לכל $p \in [1, \infty)$.
תהיי $f \in L^p(\mu)$ אי־שלילית ותהיי $\{s_n : X \to \mathbb{C}\}_{n=1}^\infty$ המתכנסת אליה נקודתית.
אזי מהתנאי $0 \le s_n \le f \in L^p(\mu)$ נובע $\{s_n\}_{n=1}^\infty \subseteq L^p(\mu)$.
נניח בשלילה שקיים $n_0 \in \mathbb{N}$ כך ש־$s_{n_0} \notin \mathcal{S}$, כלומר $\mu\Big(\Big\{x \in X \mid s_{n_0}(x) \neq 0\Big\}\Big) = \infty$, אז נסמן

$$c := \min\Big\{0 \le \alpha < \infty \mid \mu\Big(\Big\{x \in X \mid s_{n_0}(x) = \alpha\Big\}\Big)\Big\} = \alpha$$

שמוגדר היטב כי $|s(X)| < \infty$.
מתקיים

$$s_{n_0}^{-1}(\{\alpha\}) = \Big\{x \in X \mid s_{n_0}(x) = \alpha\Big\} \Longrightarrow c = \min\Big\{\alpha \in [0, \infty) \mid \mu\Big(s_{n_0}^{-1}(\{\alpha\})\Big) = \infty\Big\}$$

ולכן

$$\|f\|_p^p = \int_X |f|^p \,\mathrm{d}\mu \underset{(1)}{=} \int_X f^p \,\mathrm{d}\mu \underset{(2)}{\ge} \int_X s_{n_0}^p \,\mathrm{d}\mu \underset{(3)}{\ge} \int_{s_{n_0}^{-1}(\{c\})} s_{n_0}^p \,\mathrm{d}\mu \underset{(4)}{\ge} c^p \cdot \mu\Big(s_{n_0}^{-1}(\{c\})\Big) = \infty$$

כאשר

1. נובע מהיות f אי־שלילית
2. לכל $n \in \mathbb{N}$, $0 \le s_n \le f$ אם ורק אם $0 \le s_n^p \le f^p$
3. מונוטוניות המידה ביחס להכלה
4. מהגדרת $s_{n_0}^{-1}(\{c\})$ ומהגדרת c

כלומר $\|f\|_p = \infty \Longleftrightarrow \|f\|_p^p = \infty$ אבל $f \in L^p(\mu)$ וזאת סתירה ולכן $\mu(\{x \in X \mid s_n(x) \neq \infty\}) < \infty$ לכל $n \in \mathbb{N}$.
מתקיים

$$s_n \xrightarrow[n\to\infty]{} f \Longleftrightarrow s_n - f \xrightarrow[n\to\infty]{} 0 \Longleftrightarrow |s_n - f| \xrightarrow[n\to\infty]{} 0 \Longleftrightarrow |s_n - f|^p \xrightarrow[n\to\infty]{} 0$$

כלומר $|s_n - f|^p \xrightarrow[n\to\infty]{} 0$ נקודתית ומתקיים לכל $n \in \mathbb{N}$

$$|f - s_n|^p = (f - s_n)^p \le f^p \in L^p(\mu)$$

כלומר הסדרה $\{|f - s_n|^p\}_{n=1}^\infty$ נשלטת על־ידי הפונקציה f^p אבל $f \in L^p(\mu)$ ולכן $f \in L^1(p)$ וממשפט ההתכנסות הנשלטת

$$\|f - s_n\|_p^p = \int_X |f - s_n|^p \,\mathrm{d}\mu \xrightarrow[n\to\infty]{} 0 \Longrightarrow s_n \xrightarrow[n\to\infty]{\|\cdot\|_p} f$$

מהיות f שרירותית נובע כי ניתן לקרב כל $f \in L^p(\mu)$ על־ידי איברים מ־$\mathcal{S}$ ולכן $\overline{\mathcal{S}} = L^p(\mu)$. $\square$

הערה (אי־נכונות הטענה ב־L^∞): $\mathcal{S}$ איננה צפופה ב־$L^\infty(\mathrm{Leb}_\mathbb{R})$: ניקח $f(x) = 1$ לכל $x \in \mathbb{R}$ ו־$f \in L^\infty(\mathbb{R})$ כי $\|f\|_\infty = 1$.
תהיי $s \in \mathcal{S}$ ולכן קיימת E כך ש־$\mu(E) < \infty$ ו־s נתמכת על E ולכן

$$s(x) = 0 \ \forall x \in E^c$$

אזי

$$\|f - s\|_\infty = \text{ess sup}_{x\in\mathbb{R}} |f(x) - s(x)|$$

אבל $\mu(\mathbb{R}) = \infty$ ו־$\mu(E) < \infty$ ולכן $\mu(E^c) = \infty$ וכמובן איננה ממידה אפס ועל E^c מתקיים

$$|f(x) - s(x)| = |1 - 0| = 1 \Longrightarrow \|f - s\|_\infty \ge 1$$

אז אי אפשר לבנות סדרה שמתכנסת ל־0 ולכן $\mathcal{S}$ לא צפופה ב־$L^\infty(\mathrm{Leb}_\mathbb{R})$.

8.7 קירוב על־ידי פונקציות רציפות

משפט 8.7.1 (קירוב על־ידי פונקציות רציפות): יהי X מרחב האוסדרוף קומפקטי־מקומית ותהיי μ ממידת רדון על X.
לכל $p \in [1, \infty)$ הקבוצה $C_C(X)$ צפופה ב־$L^p(\mu)$.

הוכחה:

1. **$C_C(X) \subseteq L^p(\mu)$:** אם $f \in C_C(X)$ אזי f רציפה ו־$\operatorname{supp}(f)$ קומפקטית ולכן f חסומה ב־$\operatorname{supp}(f)$ וכן $|f|^p$ חסומה ב־$\operatorname{supp}(f)$ ולכן קיים $M > 0$ כך ש־$|f|^p \le M$ על $\operatorname{supp}(f)$.
μ מידת רדון ולכן היא סופית על קומפקטיות ומתקיים $\mu(\operatorname{supp}(f)) < \infty$ ולכן

$$\|f\|_p^p = \int_{\operatorname{supp}(f) \uplus} (\operatorname{supp}(f))^c |f|^p \,\mathrm{d}\mu = \int_{\operatorname{supp}(f)} |f|^p \,\mathrm{d}\mu + \int_{(\operatorname{supp}(f))^c} |f|^p \,\mathrm{d}\mu = \int_{\operatorname{supp}(f)} |f|^p \,\mathrm{d}\mu$$
$$\le \int_{\operatorname{supp}(f)} M \,\mathrm{d}\mu = M \cdot \mu(\operatorname{supp}(f)) < \infty \implies f \in L^p(X)$$

2. **שימוש בצפיפות $\mathcal{S}$:** אז אם

$$\mathcal{S} := \{s : X \to \mathbb{C}, \text{פשוטה } s \mid \mu(\{x \in X \mid s(x) \ne 0\}) < \infty\}$$

מספיק שנראה $S \subseteq \overline{C_C(X)}$ כי אז נקבל $L^p(\mu) = \overline{S} \subseteq \overline{C_C(X)} \subseteq \overline{L^p(\mu)} = L^p(\mu)$ שהמעבר האחרון נובע מהיות $\left(L^p(\mu), \|\cdot\|_p\right)$ מרחב שלם.
אז תהיי $s \in \mathcal{S}$ וממשפט Lusin, לכל $\varepsilon > 0$ קיימת $g \in C_C(X)$ עם

$$\sup_{x \in X}\{|g(x)|\} \le \sup_{x \in X}\{|s(x)|\} =: M_s$$

כך שמתקיים

$$\mu(\{x \in X \mid s(x) \ne g(x)\}) \ll \frac{\varepsilon^p}{2^p M_s^p}$$

ומאי־שיוויון המשולש נקבל $|g - s| \le 2M_s$.
נסמן

$$A := \{x \in X \mid g(x) = s(x)\}$$

ואז על A מתקיים $|g - s|^p \equiv 0$ וגם $\mu(A^c) < \frac{\varepsilon^p}{2^p M_s^p}$ ונקבל

$$\|g - s\|_p^p = \int_X |g - s|^p \,\mathrm{d}\mu = \int_{A \uplus A^c} |g - s|^p \,\mathrm{d}\mu = \int_A |g - s|^p \,\mathrm{d}\mu + \int_{A^c} |g - s|^p \,\mathrm{d}\mu$$
$$\le \int_{A^c} 2^p M_s^p \,\mathrm{d}\mu = 2^p M_s^p \cdot \mu(A^c) < 2^p M_s^p \cdot \frac{\varepsilon^p}{2^P M_s^p} = \varepsilon^p$$

כלומר

$$\|g - s\|_p^p < \varepsilon^p \implies \|g - s\|_p < \varepsilon$$

אז הטענה נכונה לכל $\varepsilon > 0$ ו־M_s תלוי ב־s ולא ב־g אז לכל s ניתן לצוא חסם M_s שחוסם את $g \in C_C(X)$, כלומר כל $s \in \mathcal{S}$ ניתן לקירוב על־ידי פונקציה מ־$C_C(X)$ ולכן $C_C(X)$ צפופה ב־$\mathcal{S}$ כשהאחרון צפוף ב־$L^p(\mu)$ ולכן $C_C(X)$ צפוף ב־$L^p(\mu)$.

$\square$

הערה (אי־נכונות הטענה ב־L^∞): הדוגמה מהטענה הקודמת מראה את אי־נכונות הטענה גם כאן.

9 יחסים בין מידות

תהיינה μ,ν מידות על מרחב מדיד $(X,\mathcal{A})$.

הגדרה 9.0.1 (מידה רציפה בהחלט): נאמר ש־ν רציפה בהחלט ביחס ל־μ ונסמן $\nu \ll \mu$ אם ורק אם

$$\forall E\in\mathcal{A},\ \mu(E)=0 \Longrightarrow \nu(E)=0$$

הגדרה 9.0.2 (מידות שקולות): נאמר ש־μ ו־ν הן שקולות ונסמן $\mu\sim\nu$ אם ורק אם $\nu\ll\mu$ וגם $\mu\ll\nu$, כלומר

$$\forall E\in\mathcal{A},\ \mu(E)=0 \Longleftrightarrow \nu(E)=0$$

הגדרה 9.0.3 (מידות סינגולריות): נאמר ש־μ ו־ν סינגולריות ונסמן $\nu\perp\mu$ אם ורק אם קיימות $A,B\in\mathcal{A}$ מדידות וזרות כך שמתקיים $\mu(A^c)=\mu(B^c)=0$ (באופן שקול, אם $X=A\uplus B$ ו־$\nu(B)=\mu(A)=0$).

9.1 טענה שקולה לרציפות בהחלט במרחב סופי

משפט 9.1.1 (טענה שקולה לרציפות בהחלט במרחב סופי): אם μ סופית אז $\nu\ll\mu$ אם ורק אם לכל $\varepsilon>0$ קיים $\delta>0$ כך שאם $\nu(A)<\delta$ אזי $\mu(A)<\varepsilon$.

הוכחה: $\Longleftarrow$ נניח כי $\nu\ll\mu$. יהי $\varepsilon>0$ ונניח בשלילה שלכל $n\in\mathbb{N}$ קיימת A_n עם $\nu(A_n)<2^{-n}$ כך ש־$\mu(A^n)>\varepsilon$.
לפי בורל־קנטלי $\nu(\cap\cup A_n)=0$ אבל מרציפות בהחלט ומסופיות μ

$$\mu\left(\bigcap_{m=1}^{\infty}\bigcup_{n=m}^{\infty}A_n\right)=\mu(\limsup A_n)\geq\limsup\mu(A_n)\geq\varepsilon$$

$\Longrightarrow$ נניח כי $\nu(A)=0$ אז $\nu(A)<\delta$ לכל $\delta>0$ ולכן $\mu(A)<\varepsilon$ לכל $\varepsilon>0$ ולכן $\mu(A)=0$. □

9.2 טענה שקולה לרציפות בהחלט במרחב σ־סופי

משפט 9.2.1 (טענה שקולה לרציפות בהחלט במרחב σ־סופי): אם μ מידה σ־סופית ו־ν מידה כלשהי אז $\nu\ll\mu$ אם ורק אם $\nu|_A\ll\mu|_A$ לכל A עם $\mu(A)<\infty$.

הוכחה: $\Longleftarrow$ כי אם $\nu\ll\mu$ זה נכון גם לצמצום.
$\Longrightarrow$ נכתוב $X=\bigcup_n A_n$ עם $\mu(A_n)<\infty$ ונניח כי $\mu(E)=0$ אז נראה כי $\nu(E)=0$: $E_n=A_n\cap E$ אז מהיות $\mu(E)=0$ נובע כי $\mu(E_n)=0$ ממונוטוניות המידה (כי חיתוך קבוצות מדידות הוא קבוצה מדידה) ולכן $\mu|_{A_n}(E)=0$ ולכן מההנחה

$$\nu|_{A_n}(E)=0=\nu(E\cap A_n)$$

ולכן

$$\nu(E)\leq\sum_{n=1}^{\infty}\nu(E\cap E_n)=0$$

□

9.3 תנאי שקול למידת האפס

משפט 9.3.1 (אם מידה רציפה בהחלט וסינגולרית ביחס למידה אחרת היא מידת האפס): אם $\mu\ll\nu$ וגם $\mu\perp\nu$ אז μ היא מידת האפס.

הוכחה: מהסינגולריות של המידות נובע כי μ נתמכת על הקבוצה A כך ש־$\nu(A)=0$ ומרציפות בהחלט נובע כי $\mu(A)=0$, כלומר $\mu\equiv 0$. □

9.4 תנאי שקול לסינגולריות על מידות חיוביות

משפט 9.4.1 (תנאי שקול לסינגולריות על מידות חיוביות): יהיו μ,ν מידות חיוביות על X. אז $\nu\perp\mu$ אם ורק אם לכל $\varepsilon>0$ קיימת קבוצה $A\subset X$ מדידה כך ש־$\mu(A)<\varepsilon,\nu(A^c)<\varepsilon$.

הוכחה: $\Longleftarrow$ אם $\nu\perp\mu$ אזי קיימת קבוצה A כך ש־$\mu(A)=0$ ו־$\nu(A^c)=0$, כנדרש.
$\Longrightarrow$ נבחר $(A_n)_{n=1}^{\infty}$ סדרת קבוצות כך שמתקיים

$$\mu(A_n)<2^{-n},\nu(A_n^c)<2^{-n}$$

נגדיר $A = \limsup A_n$ ומבורל־קנטלי נקבל $\mu(A) = 0$, מצד שני מהלמה של פאטו

$$\nu(A^c) = \nu(\liminf A_n^c) \leq \liminf_{n\to\infty} \nu(A_n^c) = 0$$

$\square$

9.5 מסקנה מתרגילי הבית

משפט 9.5.1 (מסקנה מתרגילי הבית): $\mu, \nu_1, \nu_2, \dots$ מידות חיוביות על X ונגדיר $\nu = \sum_{i=1}^{\infty} \nu_i$ אזי

$$(1)\ \forall i \in \mathbb{N},\ \nu_i \perp \mu \Longrightarrow \nu \perp \mu \qquad (2)\ \forall i \in \mathbb{N},\ \nu_i \ll \mu \Longrightarrow \nu \ll \mu$$

10 מרחבי הילברט

10.1 משפט ההצגה של Riesz–Fréchet

משפט 10.1.1 (משפט ההצגה של Riesz–Fréchet): יהי $\mathcal{H}$ מרחב הילברט, ההעתקה ששולחת כל וקטור $h \in \mathcal{H}$ לפונקציונל $\phi_h(x) := \langle x, h\rangle$ הינה איזומורפיזם צמוד־לינארי בין $\mathcal{H}$ ל־$\mathcal{H}^*$ שהיינה גם איזומטריה. *תזכורת:*

$$\mathcal{H}^* := \left\{\phi \in \operatorname{Hom}(\mathcal{H}, \mathbb{C}) \mid \|\phi\|_{\mathsf{op}} < \infty\right\}$$

הוכחה:

1. מהגדרת המכפלה הפנימית נסיק $h \mapsto \phi_h$ היא צמודה־לינארית
2. מאי־שיוויון קושי־שוורץ לכל $\|x\| = 1$ מתקיים

$$|\varphi_h(x)| = |\langle x,h\rangle| \leq \|x\| \cdot \|h\| = \|h\|$$

3. נובע אם כך $\|\phi_h\|_{\mathsf{op}} \leq \|h\|$ אבל $\frac{h}{\|h\|}$ הוא מנורמה 1 ומקיים $\phi_h\left(\frac{h}{\|h\|}\right) = \langle \frac{h}{\|h\|} \ , \ h\rangle = \|h\|$
4. אז $\|\phi_h\|_{\mathsf{op}} = \|h\|$ ולכן ההעתקה היא איזומטריה
5. יהי $\ell \in \mathcal{H}^*$ ונסמן $V = \ker \ell$, אז $V \subseteq \mathcal{H}$ תת־מרחב סגור כי ℓ פונקציונל חסום ולכן רציף ו־V היא המקור של קבוצה סגורה $\{0\}$.
6. אם $V = \mathcal{H}$ אז $\ell = \phi_0$
7. אחרת, $V \subset \mathcal{H}$ ולכן קיים $0 \neq z \in V^\perp$ אז נוכיח שהוקטור $w = \frac{\overline{\ell(z)}}{\|z\|^2} \cdot z$ מקיים $\ell = \phi_w$
8. אכן לכל $x \in \mathcal{H}$ מתקיים

$$\begin{aligned} &\ell(\ell(z) \cdot x - \ell(x) \cdot z) = \ell(z) \cdot \ell(x) - \ell(x) \cdot \ell(z) = 0 \\ &\Longrightarrow \ell(z) \cdot x - \ell(x) \cdot z \in \ker \ell = V \\ &\Longrightarrow \langle \ell(z) \cdot x - \ell(x) \cdot z \ , \ z\rangle = 0 \\ &\Longrightarrow \ell(x) = \langle x \ , \ \frac{\overline{\ell(z)}}{\|z\|^2} \cdot z\rangle \Longrightarrow \ell = \phi_w \end{aligned}$$

□

10.2 אם μ איננה מידת האפס אז יש מידה סופית ששקולה לה

משפט 10.2.1: אם $\mu \neq 0$ מידה σ־סופית על מרחב מדיד $(X,\mathcal{A})$, אזי קיימת מידה סופית ν על $(X,\mathcal{A})$ כך ש־$\nu \sim \mu$.

הוכחה:

1. **שימוש ב־σ סופיות:** מהיות $(X,\mathcal{A},\mu)$ מרחב מידה σ־סופי נובע שקיים אוסף $\{A_n\}_{n=1}^{\infty}$ עם $\mu(A_n)$ לכל $n \in \mathbb{N}$ כך ש־$X = \cup_{n=1}^{\infty} A_n$
2. **הגדרת פונקציית עזר:** נגדיר $w : X \to [0,1]$ על־ידי

$$w(x) := \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2^{-n}}{1+\mu(A_n)} \cdot \mathbb{1}_{A_n}(x)$$

3. **w מדידה:** כגבול של סדרת פונקציות שהן צירופים לינאריים סופיים של פונקציות מציינות שהן כמובן מדידות
4. **$0 \leq w \leq 1$:** לכל $x \in X$ ברור שהביטוי אי־שלילי. כמו־כן, מה־σ־סופיות נובע שקיים לפחות $N \in \mathbb{N}$ אחד כך ש־$x \in A_n$ ולכן

$$w(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2^{-n}}{1+\mu(A_n)} \cdot \mathbb{1}_{A_n}(x) \geq \frac{2^{-n}}{1+\mu(A_n)} \cdot \mathbb{1}_{A_n}(x) = \frac{2^{-n}}{1+\mu(A_n)} > 0$$

5. **חסימות:** מהיות $\mu(A_n) > 0$ נובע כי $1+\mu(A_n) > 1$ נובע כי $\frac{1}{1+\mu(A_n)} \leq 1$, אז

$$0 < w \underset{\text{הורדנו אינדקטור}}{\leq} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2^{-n}}{1+\mu(A_n)} \leq \sum_{n=1}^{\infty} 2^{-n} = 1 \Longrightarrow w(x) \in (0,1]$$

6. **הגדרת מידה חדשה:** נגדיר $u : \mathcal{A} \to [0,\infty]$ מידה המוגדרת על־ידי $\mathrm{d}\nu = w\,\mathrm{d}\mu$ ראינו שזאת מידה וש־$\nu \ll \mu$
7. **$\mu \ll \nu$:** תהיי $E \in \mathcal{A}$ כך ש־$\int_E w\,\mathrm{d}\mu = \nu(E) = 0$.
   מהיות $w > 0$ נסיק כי $\mu(E) = 0$ כי אחרת אם $w > 0$ וגם $\mu(E) > 0$ נקבל כי $0 = \nu(E) = \int_E w\,\mathrm{d}\mu > 0$ בסתירה ולכן $\mu \ll \nu$
8. **הגדרה של מידות שקולות:** מצאנו כי $\nu \ll \mu$ וכן $\mu \ll \nu$ ולכן מהגדרה של מידות שקולות נובע כי $\nu \sim \mu$

□

11 נגזרת רדון־ניקודים

11.1 משפט נגזרת רדון־ניקודים־לבג

משפט 11.1.1 (משפט נגזרת רדון־ניקודים־לבג): יהי $(X, \mathcal{A})$ מרחב מדיד ויהיו μ, ν שתי מידות σ־סופיות על X.
אזי קיימות ויחידות שתי מידות ν_a, ν_s המקיימות $\nu = \nu_a + \nu_s$ כאשר $\nu_a \ll \mu$ וגם $\nu_s \perp \mu$ (פירוק לבג).
כמו־כן, קיימת ויחידה $h : X \to [0, \infty)$ מדידה עבורה מתקיים $\mathrm{d}\nu_a = h \,\mathrm{d}\mu$ ונקרא ל־h נגזרת רדון־ניקודים של ν_a ביחס ל־μ ונסמנה $\frac{\mathrm{d}\nu_a}{\mathrm{d}\mu}$.
יתר על־כן אם ν סופית אזי $h \in L^1(\mu)$.

הוכחה:

1. הוכחת הטענה נכונה כאשר ν מידה סופית ו־μ מידה σ־סופית ונראה כי זה גורר נכונות עבור מידות μ, ν σ־סופיות:
   מהיות המרחב σ־סופי ולכן קיים אוסף $\mathcal{A} \supseteq \{A_n\}_{n=1}^{\infty}$ של קבוצות מדידות ממידה סופית תחת ν ובלי הגבלת הכלליות נניח שהן זרות זו מזו (תמיד ניתן להזיר אותם) כך ש־$X \underset{(\star)}{=} \biguplus_{n=1}^{\infty} A_n$ ולכל $n \in \mathbb{N}$ נסמן את מרחב המידה המצומצם
   $$v_n := \nu|_{A_n} \qquad A_n := \mathcal{A}|_{A_n}$$
   אז ν_n מידה על מרחב מדיד מצומצם ומהסופיות של ν_n נובע שגם $(A_n, \mathcal{A}_n)$ מרחב מידה סופי.
   מ־$(\star)$ נובע כי $\nu = \sum_{n=1}^{\infty} \nu_n$ ומההנחה ניתן ליישם את הטענה עבור המידות μ ו־ν_n על $(A_n, \mathcal{A}_n)$:
   אז קיימות $\nu_{n,a}, \nu_{n,s}$ על $(A_n, \mathcal{A}_n)$ עם $\nu_{n,a} \ll \mu$ וגם $\nu_{n,s} \perp \mu$ כך ש־$\nu_n = \nu_{n,a} + \nu_{n,s}$ אז נגדיר
   $$\nu_s := \sum_{n=1}^{\infty} \nu_{n,s} \qquad \nu_a := \sum_{n=1}^{\infty} \nu_{n,a}$$
   ונקבל אם כך
   $$\nu = \sum_{n=1}^{\infty} \nu_n = \sum_{n=1}^{\infty} \nu_{n,a} + \nu_{s,n} = \sum_{n=1}^{\infty} \nu_{n,a} + \sum_{n=1}^{\infty} \nu_{s,n} = \nu_a + \nu_s$$
   ולכל $n \in \mathbb{N}$:
   1. אם $E \in \mathcal{A}_n$ עם $\mu(E) = 0$ אזי $\nu_{n,a} \ll \mu$ ולכן $\nu_{n,a}(E) = 0$, מכאן ש־$\nu_a(E) = \sum_{n=1}^{\infty} \nu_{n,a} = 0$ ולכן $\nu_a \ll \mu$
   2. מכך ש־$\mu \perp \nu_{n,s}$ ולכן קיימות $A, B \in \mathcal{A}$ מדידות וזרות כך ש־$\mu(A^c) = \nu_{n,s}(B^c) = 0$ ולכן
   $$\nu_s(B^c) = \sum_{n=1}^{\infty} \nu_{n,s}(B^c) = 0 = \mu(A^c) \Longrightarrow \nu_s \perp \mu$$
2. נניח ש־ν מידה סופית.
   1. מטענה שראינו נובע שקיימת פונקציה מדידה וחיובית $w : X \to (0, 1]$ שעבורה $w \,\mathrm{d}\mu$ היא ממידה סופית אז נגדיר את המדיה הסופית
   $$\mathrm{d}\lambda = \mathrm{d}\nu + w \,\mathrm{d}\mu$$
      1. לכל $f \in L^2(\lambda)$ מתקיים
      $$\left|\int f \,\mathrm{d}\nu\right| \le \int |f| \,\mathrm{d}\nu \le \int |f| (\mathrm{d}\nu + w \,\mathrm{d}\mu) = \int |f| \cdot 1 \,\mathrm{d}\lambda \underset{\text{קושי־שוורץ}}{\le} \sqrt{\int |f^2| \,\mathrm{d}\lambda} \sqrt{\int |1^2| \,\mathrm{d}\lambda} = \sqrt{\lambda(X)} \|f\|_{L^2(\lambda)}$$
      2. אז הפונקציונל $\phi : L^2(\lambda) \to \mathbb{C}$ הנתון על־ידי $\phi(f) = \int f \,\mathrm{d}\nu$ הוא חסום
      3. ממשפט הצגה של פרשה־ריס, נסיק שקיימת $g \in L^2(\lambda)$ כך שלכל $f \in L^2(\lambda)$ מתקיים
      $$(\triangle) \quad \int f \,\mathrm{d}\nu = \phi(f) = \int f \cdot g \,\mathrm{d}\lambda$$
         1. לכל $E \in \mathcal{A}$ עם $\lambda(E) > 0$ מתקיים $\mathbb{1}_E \in L^2(\lambda)$ ולכן $\nu(E) = \int_E g \,\mathrm{d}\lambda$, כלומר
         $$0 \le \frac{\nu(E)}{\lambda(E)} = \frac{1}{\lambda(E)} \int_E g \,\mathrm{d}\lambda \le 1$$
      4. מלמה שראינו על ממוצעים של פונקציות על קבוצות מדידות נסיק $0 \le g \le 1$, λ־כמעט תמיד
      5. על־ידי שינוי של g על קבוצה מ־λ־מידה אפס נוכל להסיק כי $0 \le g \le 1$ תמיד
      6. נגדיר

$$A \coloneqq \{x \in X \mid g(x) \in [0,1)\} \qquad B \coloneqq \{x \in X \mid g(x) = 1\}$$
$$\nu_a \coloneqq \nu|_A \qquad \nu_s \coloneqq \nu|_B$$

7. מכך ש־$X = A \uplus B$ הרי ש־$\nu = \nu_a + \nu_s$
8. שכתוב של $\triangle$ מביא שלכל f

$$\int f \, \mathrm{d}\nu = \int fg \, \mathrm{d}\nu + \int fgw \, \mathrm{d}\mu \underset{(\star)}{\iff} \int f(1-g) \, \mathrm{d}\nu = \int fgw \, \mathrm{d}\mu$$

9. נראה ש־$\mu \perp \nu_s$: מהיות $(1-g)|_B \equiv 0$ אז $f = \mathbb{1}_B$ ומ־$(\star)$ נקבל

$$0 = \int_B (1-g) \, \mathrm{d}\nu = \int_B gw \, \mathrm{d}\mu$$

אבל $w > 0$ ולכן $\mu(B) = 0$ ולכן $\nu_s(B^c) = 0 = \mu(B)$ כלומר $\nu_s \perp \mu$

10. נראה ש־$\mu \ll \nu_a$: כי $f = (1 + g + g^2 + \cdots + g^n)\mathbb{1}_E$ אז עבור $E \in \mathcal{A}$ מ־$(\star)$ נקבל

$$\int_E (1 - g^{n+1}) \, \mathrm{d}\nu = \int_E (1 + g + g^2 + \cdots + g^n) gw \, \mathrm{d}\mu$$

אבל $g|_A < 1$ והרי $(1-g^{n+1})\mathbb{1}_E \nearrow 1_{A \cap E}$ מונטונית ולכן באגף שמאל נקבל

$$\int_E (1 - g^{n+1}) \, \mathrm{d}\nu \underset{n \to \infty}{\to} \nu(A \cap E) = \nu_a(E)$$

מצד שני $(1 + g + g^2 + \cdots + g^n) gw \nearrow h$ מתכנסת מונוטונית ל־h מדידה ב־$[0,\infty)$ ולכן באגף ימין

$$\int_E (1 + g + g^2 + \cdots + g^n) gw \, \mathrm{d}\mu \underset{n \to \infty}{\to} \int_E h \, \mathrm{d}\mu$$

אז $\mathrm{d}\nu_a = h \, \mathrm{d}\mu$ ולכן $\nu_a \ll \mu$.

מכך ש־ν_a ממידה סופית נסיק כי $h \in L^1(\mu)$.

$\square$

12 גזירה של מידות רדון ב-$\mathbb{R}^d$

12.1 משפט לב הגזירה

משפט 12.1.1 (משפט לב הגזירה): תהיינה λ, μ מידות רדון על $\mathbb{R}^d$ ו-$A \subseteq \mathbb{R}^d$ קבוצה מדידה וחסומה ו-$0 < t < \infty$

1. אם $\underline{D}(\mu, \lambda, x) \leq t$ לכל $x \in A$ אזי $\mu(A) \leq t \cdot \lambda(A)$
2. אם $\overline{D}(\mu, \lambda, x) \geq t$ לכל $x \in A$ אזי $\mu(A) \geq t \cdot \lambda(A)$

הוכחה: נוכיח את (1) ו-(2) הוא אנלוגי.

1. **כיסוי בסיקוביץ':** יהי $\varepsilon > 0$ אזי קיים כיסוי בסיקוביץ' $\mathcal{F}$ של A המקיים

$$(1)\ \forall B \in \mathcal{F}, \frac{\mu(B)}{\lambda(B)} < t + \varepsilon \qquad (2)\ \forall x \in A, \inf\{r \mid B_r(x) \in \mathcal{F}\} = 0$$

2. **שימוש ברגולריות פנימית:** נבחר $U \supseteq A$ פתוחה עבורה מתקיים $(\star)\ \lambda(U) < \lambda(A) + \varepsilon$
3. **צמצום הכיסוי:** נזרוק מ-$\mathcal{F}$ את כל הכדורים שלא מוכלים ב-U והכיסוי החדש עדיין מקיים את $(1), (2)$ ובפרט זה עדיין כיסוי בסיקוביץ' (בגלל (2))
4. **שימוש בטענה שראינו:** ממשפט שראינו נובע שקיים תת-אוסף בן-מנייה $\tilde{E} \subseteq \mathcal{F}$ של כדורי זרים בזוגות עם $\mu\left(A \setminus \bigcup \tilde{E}\right) = 0$
5. **שימוש במונוטוניות:**

$$\mu(A) \leq \mu\left(\bigcup \tilde{E}\right) + \mu\left(A \setminus \bigcup \tilde{E}\right) \underset{\text{תת-אדטיביות}}{\leq} \sum_{B \in \tilde{E}} \mu(B) \underset{(2)}{\leq} \sum_{B \in \tilde{E}} (t+\varepsilon)\lambda(B) \underset{(\star\star)}{=} (t+\varepsilon) \cdot \lambda\left(\bigcup \tilde{E}\right)$$
$$\underset{(\star)}{\leq} (t+\varepsilon)\lambda(U) \underset{(\star)}{\leq} (t+\varepsilon)(\lambda(A)+\varepsilon) = t \cdot \lambda(A) + \varepsilon(\lambda(A)+\varepsilon+t) \underset{\varepsilon \to 0}{\to} t \cdot \lambda(A)$$

כאשר $(\star\star)$ נובע מכך שזה אוסף זר של כדורים זרים בזוגות ומ-σ-אדטיביות.

$\square$

12.2 הטענות על כיסוי בסיקוביץ'?

12.3 משפט הגזירה של לבג־בסיקוביץ'

משפט 12.3.1 (משפט הגזירה של לבג־בסיקוביץ'): תהיינה $\lambda .\mu$ מידות רדון על $\mathbb{R}^d$

1. $D(\mu, \lambda, x)$ קיים וסופי λ־כמעט תמיד
2. $\underline{D}(\mu, \lambda, x) < \infty$ μ־כמעט תמיד אם ורק אם $\mu \ll \lambda$
3. אם $\mu \ll \lambda$ אזי $D(\mu, \lambda, x) = \frac{\mathrm{d}\mu}{\mathrm{d}\lambda}$

הוכחה:

1. לכל $0 < r < \infty, 0 \le s < t < \infty$ נגדיר

$$A_{t,r} \coloneqq \left\{x \in B_r(0) \mid \overline{D}(\mu, \lambda, x) \ge t\right\} \qquad A_{s,t,r} \coloneqq \left\{x \in B_r(0) \mid \underline{D}(\mu, \lambda, x) \le s < t \le \overline{D}(\mu, \lambda, x)\right\}$$

ומתקיים $A_{s,t,r} \subseteq A_{t,r}$ מתקיים מטענה על גזירהה שראינו

$$t \cdot \lambda\left(A_{s,t,r}\right) \underset{\overline{D} \ge t}{\le} \mu\left(A_{s,t,r}\right) \underset{\underline{D} \le s}{\le} \cdot \lambda\left(A_{s,t,r}\right)$$

ומהיות $s < t$ ו־$\lambda\left(A_{s,t,r}\right) < \infty$ הרי ש־$\lambda\left(A_{s,t,r}\right) = 0$ לכל $s < t, r$. עבור $A_{t,r}$ מתקיים

$$t \cdot \lambda\left(A_{t,r}\right) \le \mu\left(A_{t,r}\right) \le \mu(B_r(0)) < \infty$$

נסמן

$$A_{\infty,r} \coloneqq \left\{x \in B_r(0) \mid \overline{D}(\mu, \lambda, x) = \infty\right\}$$

ולכן $A_{\infty,r} = \bigcap_{n \in \mathbb{N}} A_{n,r}$ מהיות $\lambda(A_1, r) < \infty$, ממונוטוניות לסדרות יורדות נסיק

$$\lambda\left(A_{\infty,r}\right) = \lim_{n \to \infty} \lambda\left(A_{n,r}\right) \le \lim_{n \to \infty} \frac{1}{n} \mu(B_r(0)) = 0$$

אזי

$$\left\{x \in B_r(0) \mid \overline{D}(\mu, \lambda, x) = 0 \text{ או } D(\mu, \lambda, x) \text{ לא קיים}\right\} = A_{\infty,r} \bigcup_{s < t \in \mathbb{Q}} A_{s,t,r}$$

זה איחוד בן־מנייה של קבוצות מ־λ־מידה אפס ולכן זה נכון לכל $r > 0$ וזה גורר את 1

2. $\Longrightarrow$ אם $\mu \ll \lambda$ אז מ־(1) נובע ש־$D < \infty$ קיים μ־כמעט תמיד.

$\Longleftarrow$ אם A עם $\lambda(A) = 0$, אז אם $\underline{D}(\mu, \lambda, x) < \infty$ μ־כמעט תמיד אז

$$\mu(A) = \mu\left(\bigcup_{\substack{n \in \mathbb{N} \\ k \in \mathbb{N}}} A_{n,k}\right)$$

כאשר

$$A_{n,k} \coloneqq \{x \in A \cap B_k(0) \mid \underline{D}(\mu, \lambda, x) \le n\}$$

ולכן מטענה שראינו נובע

$$\mu\left(A_{n,k}\right) \le n \cdot \lambda\left(A_{n,k}\right) \le n \cdot \lambda(A) = 0 \Longrightarrow \mu(A) = 0 \Longrightarrow \mu \ll \lambda$$

3. תהיי $B \subseteq \mathbb{R}^d$ מדידה וחסומה כלשהי ונראה ש־$\int_B D(\mu, \lambda, x)\,\mathrm{d}\lambda \le \mu(B)$ ויתקיים שיוויון כאשר $\mu \ll \lambda$.
נבחר $1 < t < \infty$ כלשהו ונסמן עבור $p \in \mathbb{Z}$

$$B_p \coloneqq \{x \in B \mid t^p \le D(\mu, \lambda, x) \le T^{p+1}\} \qquad B_+ \coloneqq \{x \in B \mid 0 < D(\mu, \lambda, x) < \infty\} = \dot{\bigcup_{p \in \mathbb{Z}}} B_p$$

אז

$$\int_B D(\mu, \lambda, x)\,\mathrm{d}\lambda \underset{(1)}{=} \int_{B_+} D(\mu, \lambda, x)\,\mathrm{d}\lambda = \sum_{p \in \mathbb{Z}} \int_{B_p} D(\mu, \lambda, x)\,\mathrm{d}\lambda \le \sum_{p \in \mathbb{Z}} t^{p+1} \lambda\left(B_p\right) \underset{(\star)}{\le} \sum_{p \in \mathbb{Z}} t^{p+1}\left(\frac{1}{t^p}\mu\left(B_p\right)\right) = t\sum_{p \in \mathbb{Z}} \mu\left(B_p\right) \le t\mu(B)$$

כאשר (1) נובע מסעיף (1) ומכך שזרקנו קבוצה עליה האינטגרנד הוא אפס ו־$(\star)$ נובע מהטענה שראינו על גזירה. כאשר $t \searrow 1$ נקבל את הטענת עזר.

אם $\lambda \ll \mu$ אז מ־(1) וההחלפת תפקידים בין λ ,μ נסיק $D(\lambda,\mu,x) < \infty$ μ־כמעט תמיד ולכן $D(\mu,\lambda,x) > 0$ μ־כמעט תמיד

ומאחר ש־$\lambda \ll \mu$ הרי ש־$D(\mu,\lambda,x) < \infty$ μ־כמעט תמיד ולכן $\mu(B) = \mu(B_+)$ ולכן

$$\int_B D(\mu,\lambda,x)\,\mathrm{d}\lambda = \int_{B_+} D(\mu,\lambda,x)\,\mathrm{d}\lambda = \sum_{p\in\mathbb{Z}} \int_{B_p} D(\mu,\lambda,x)\,\mathrm{d}\lambda \geq \sum_{p\in\mathbb{Z}} t^p \lambda\big(B_p\big) \geq \sum_{p\in\mathbb{Z}} \frac{t^p}{t^{p+1}} \mu\big(B_p\big) = t^{-1} \sum_{p\in\mathbb{Z}} \mu\big(B_p\big) = t^{-1}\mu(B_+) = t^{-1}\mu(B)$$

נשאיף את $t \searrow 1$ ונקבל שיוויון ואת (3).

$\square$

12.4 משפט הגזירה של לבג

משפט 12.4.1 (משפט הגזירה של לבג): תהיי $f \in L^1([a,b])$. אזי הפונקציה $F(x) = \int_a^x f \,\mathrm{d}\lambda$ גזירה כמעט בכל מקום ומקיימת $F'(x) = f(x)$ עבור כמעט כל $x \in [a,b]$ (ביחס למידת לבג).

הוכחה: נראה שכמעט לכל $x \in [a,b]$ מתקיים

$$\lim_{h\to 0} \frac{1}{h} \int_x^{x+h} f \,\mathrm{d}\lambda = f(x)$$

אם f רציפה אז זה המשפט היסודי ולכן נניח ש־f חסומה. לפי משפט לוזין לכל $n \in \mathbb{N}$ יש קבוצה A_n כך ש־$\lambda(A_n) < \frac{1}{n}$ ופונקציה רציפה g_n כך שמחוץ ל־A_n, f ו־g_n מתלכדות ונסמן λ_n מידת לבג מצומצמת ל־A_n.
שימוש במשפט הגזירה של בסיקוביץ': מהיות $\frac{\mathrm{d}\lambda_n}{\mathrm{d}\lambda} = \mathbb{1}_{A_n}$, ממשפט הגזירה של בסיקוביץ' כמעט לכל $x \in A_n^c$ מתקיים

$$\lim_{h\to 0} \frac{\lambda_n((x-h,x+h))}{\lambda((x-h,x+h))} = \lim_{h\to 0} \frac{\lambda(A_n \cap (x-h,x+h))}{2h} = \mathbb{1}_{A_n}(x) = 0$$

אם $x \in A_n^c$ מתקיים

$$\left|\frac{1}{h}\int_x^{x+h} f \,\mathrm{d}\lambda - \frac{1}{h}\int_x^{x+h} g \,\mathrm{d}\lambda\right| \le \frac{1}{h}\int_x^{x+h} |f-g| \,\mathrm{d}\lambda) = \frac{1}{h}\int_{A_n\cap(x,x+h)} |f-g| \,\mathrm{d}\lambda$$

g חסומה ב־$[a,b]$ כפונקציה רציפה ו־f חסומה מההנחה ולכן קיים $M > 0$ כך שמתקיים $|f-g| < M$, כלומר

$$\frac{1}{h}\int_{A_n\cap(x,x+h)} |f-g| \,\mathrm{d}\lambda \le M \cdot \frac{\lambda(A_n \cap (x-h,x+h))}{h}$$

אגף ימין שואף ל־0 כאשר $h \to 0$ ולכן אם ניקח גבול נקבל

$$\lim_{h\to 0}\left|\frac{1}{h}\int_x^{x+h} f \,\mathrm{d}\lambda - \frac{1}{h}\int_x^{x+h} g \,\mathrm{d}\lambda\right| = 0 \Longrightarrow \lim_{h\to 0}\frac{1}{h}\int_x^{x+h} f \,\mathrm{d}\lambda = \lim_{h\to 0}\frac{1}{h}\int_x^{x+h} g \,\mathrm{d}\lambda = g(x) = f(x)$$

קיבלנו את השוויון שרצינו לכל $x \in A_n^c$ ומאחר ונוכל לקחת את A_n להיות עם מידה קטנה כרצוננו, כמעט כל $x \in [a,b]$ יהיה באחת מ־A_n^c והטענה נכונה עבור f חסומה.
עבור f כללית: נסמן לכל $n \in \mathbb{N}$ את $f_n = \mathbb{1}_{|f|<n} \cdot f$ וממשפט הגזירה של בסיקוביץ' (על המידות $|f-f_n| \,\mathrm{d}\lambda, \mathrm{d}\lambda$) מתקיים כמעט לכל $x \in [a,b]$

$$\lim_{h\to 0}\frac{1}{h}\int_x^{x+h} |f-f_n| \,\mathrm{d}\lambda \le \lim_{h\to 0}\frac{2}{2h}\int_x^{x+h} |f-f_n| \,\mathrm{d}\lambda = |f(x)-f_n(x)|$$

אגף ימין הוא אפס כמעט לכל $x \in \mathbb{1}_{|f|<n}$ ומאחר $f \in L^1$ אז $|f|^{-1}(\{\infty\})$ קבוצה ממידה אפס ולכן כמעט כל $x \in [a,b]$ נמצא ב־$\mathbb{1}_{|f|<n}$ עבור n כלשהו ולכן

$$f(x) = f_n(x) = \lim_{h\to 0}\frac{1}{h}\int_x^{x+h} f_n(x) = \lim_{h\to 0}\frac{1}{h}\int_x^{x+h} f(x)$$

□

13 מרחבי מכפלה

13.1 משפט פוביני

משפט 13.1.1 (משפט פוביני): יהיו $(X, \mathcal{A}, \mu)$ ו־$(Y, \mathcal{C}, \nu))$ מרחבי מידה σ־סופיים.

1. תהיי $f : X \times Y \to [0, \infty]$ מדידה, אזי f_x ו־f^y הן $\mathcal{A}, \mathcal{C}$־מדידות (בהתאמה) לכל x, y וכן

$$\int f \, \mathrm{d}(\mu \times \nu) = \int \left(\int f(x,y) \, \mathrm{d}\mu(x) \right) \mathrm{d}\nu(y) = \int \left(\int f(x,y) \, \mathrm{d}\nu(y) \right) \mathrm{d}\mu(x)$$

2. אם $f : X \times Y \to \mathbb{C}$ מדידה ומקיימת $\int |f_x| \, \mathrm{d}\nu < \infty$ אזי $f \in L^1(\mu \times \nu)$
3. אם $f \in L^1(\mu \times \nu)$ אזי $f_x \in L^1(\nu)$ μ־כמעט לכל $x \in X$ וגם $f^y \in L^1(\mu)$ ν־כמעט לכל $y \in Y$ ומתקיים

$$\int f \, \mathrm{d}(\mu \times \nu) = \iint f \, \mathrm{d}\mu \, \mathrm{d}\nu = \iint f \, \mathrm{d}\nu \, \mathrm{d}\mu$$

הוכחה:

1. הוכחנו את הטענה עבור פונקציות מציינות $\mathbb{1}_Q$ כש־$Q \in \mathcal{A} \times \mathcal{C}$ ולכן זה נכון עבור פונקציות פשוטות (כסכום סופי של פונקציות מציינות).
תהיי $f : X \times Y \to [0, \infty]$ מדידה ותהיי $(s_n)_{n=1}^{\infty}$ סדרה של פונקציות פשוטות שמתכנסות ל־f.
ממשפט ההתכנסות המונוטונית, הפונקציות

$$\varphi(x) = \int f_x \, \mathrm{d}\nu \qquad \psi(y) = \int f^y \, \mathrm{d}\nu$$

הן גבולות עולים של

$$\varphi_n(x) = \int (s_n)_x \, \mathrm{d}\nu \qquad \psi_n(y) = \int (s_n)^y \, \mathrm{d}\nu$$

ואילו צירופים לינאריים של פשוטות ולכן φ_n, ψ_n מדידות ולכן גם φ_ψ.
נעשה שימוש נוסף במשפט ההתכנסות המונוטונית ייתן מ־ψ $\varphi_n \nearrow \varphi, \psi_n \nearrow$ שמתקיים

$$\int \varphi \, \mathrm{d}\mu = \lim_{n \to \infty} \int \varphi_n \, \mathrm{d}\mu = \lim_{n \to \infty} \int \psi_n \, \mathrm{d}\nu = \int \psi \, \mathrm{d}\nu$$

ומתקיים השיוויון

$$\int f \, \mathrm{d}(\mu \times \nu) = \lim_{n \to \infty} s_n \, \mathrm{d}(\mu \times \nu) = \int \varphi \, \mathrm{d}\mu = \int \psi \, \mathrm{d}\nu$$

2. נפעיל את (1) עם $|f|$
3. נפעיל את (1) עם הפירוק של פונקציות מרוכבות לסכום אי־שלילי

$$f = u + iv = u_+ - u_- + i(v_+ - v_-)$$

ומכך שמתקיים $\iint |f| \, \mathrm{d}\mu \, \mathrm{d}\nu < \infty$ גורר שמתקיים ל־ν־כמעט כל $y \in Y$ ש־$\int |f^y| \, \mathrm{d}\mu < \infty$ וכנ"ל הפוך.

$\square$

מסקנה 13.1.1: אם $f : X \times Y \to \mathbb{C}$ מדידה ומקיימת $\iint |f(x,y)| \, \mathrm{d}\mu(x) \, \mathrm{d}\nu(y) < \infty$ אזי $\int f \, \mathrm{d}(\mu \times \nu) = \iint f \, \mathrm{d}\mu \, \mathrm{d}\nu = \iint f \, \mathrm{d}\nu \, \mathrm{d}\mu$

הוכחה: נובע ישירות מ־(2) + (3) במשפט פוביני. $\square$