

שדות ותורת גלואה  
מערכי תרגול קורס 88-311

אוקטובר 2021, גרסה 0.27

## תוכן העניינים

<b>3</b>	<b>מבוא</b>	
<b>4</b>	<b>1 תרגול ראשון</b>	
4	1.1 תזכורת מתורת החוגים	
7	1.2 קריטריון אייזנשטיין והלמה של גאוס	
<b>7</b>	<b>2 תרגול שני</b>	
9	2.1 הרחבת שדות	
<b>11</b>	<b>3 תרגול שלישי</b>	
11	3.1 חישוב פולינום מינימלי	
12	3.2 כפליות הממד	
<b>13</b>	<b>4 תרגול רביעי</b>	
13	4.1 שורשי יחידה	
15	4.2 שדות פיצול	
<b>15</b>	<b>5 תרגול חמישי</b>	
15	5.1 המשך שדות פיצול	
17	5.2 המשכה	
<b>18</b>	<b>6 תרגול שישי</b>	
18	6.1 קומפוזיטום	
18	6.2 פולינומים ספרביליים	
19	6.3 הרחבות ספרביליות	
<b>21</b>	<b>7 תרגול שביעי</b>	
21	7.1 חבורת גלואה	
22	7.2 מבוא לחישוב חבורות גלואה	

## מבוא

כמה הערות טכניות לתחילת הקורס:

- דף הקורס נמצא באתר [www.math-wiki.com](http://www.math-wiki.com).
- שאלות בנוגע לחומר הלימודי מומלץ לשאול בדף השיחה באתר של הקורס.
- החומר בחוברת הזו נאסף מכמה מקורות, ומבוסס בעיקרו על שינויים ותוספות למערכי תרגול של איתמר שטיין ושירה גילת.
- נשתדל לכתוב **בגופן הזה** כשהגדרות ומושגים חשובים מופיעים בפעם הראשונה. נוסף בצד גם את השם באנגלית, שעשוי לעזור כשמחפשים חומר נוסף שאינו בעברית.
- נשמח לכל הערה על מסמך זה.

מחבר בתשע"ט ותש"ף: תומר באואר  
עדכונים בתשפ"ב: גיא בלשר

# 1 תרגול ראשון

## 1.1 תזכורת מתורת החוגים

Rng, or  
non-unital ring  
Additive group

**הגדרה 1.1.** חוג בלי יחידה  $(R, +, \cdot, 0)$  הוא מבנה אלגברי המקיים:

1.  $(R, +, 0)$  הוא חבורה אבלית. נקראת החבורה החיבורית של החוג.

2.  $(R, \cdot)$  הוא חבורה למחצה.

3. מתקיים פילוג (משמאל ומימין). כלומר לכל  $a, b, c \in R$  מתקיים

$$(a + b)c = ac + bc, \quad a(b + c) = ab + ac$$

כאשר ההקשר ברור, נכתוב רק  $R$  במקום  $(R, +, \cdot, 0)$ .

**הגדרה 1.2.**  $R$  הוא שדה אם  $(R \setminus \{0\}, \cdot)$  חבורה אבלית.

Field

שדות הם חוגים מאוד טובים. הם חילופיים וכל איבר לא אפסי בהם הפיך.

**הגדרה 1.3.** יהי  $R$  חוג. **אידיאל** של  $R$  הוא תת-חבורה חיבורית  $I \subseteq R$  שמקיימת בליעה ביחס לכפל:  $IR, RI \subseteq I$ .

Ideal

**תזכורת 1.4.** יהי  $F$  שדה. נתבונן בחוג  $F[x]$ .

• זהו תחום אוקלידי – ניתן לחלק פולינומים עם שארית;

• לכן, זהו תחום ראשי – כל אידיאל ב- $F[x]$  נוצר על ידי פולינום אחד. אפשר ממש למצוא את היוצר: היוצר של אידיאל  $I \triangleleft F[x]$  הוא הפולינום הלא אפסי מדרגה מינימלית ששייך ל- $I$ .

• האידיאלים המקסימליים ב- $F[x]$  הם בדיוק האידיאלים מהצורה  $\langle f(x) \rangle$  כאשר  $f \neq 0$  הוא פולינום אי-פריק.

• (אפשר להמשיך למספר משתנים: החוג  $F[x_1, \dots, x_n]$  הוא תחום פריקות יחידה ובפרט תחום שלמות, אבל לא תחום ראשי.)

**מסקנה 1.5.** אם  $F$  שדה ו- $f \in F[x]$  פולינום אי-פריק, אז  $F[x]/\langle f \rangle$  הוא שדה, ו- $F$  משוכן בתוכו:

$$F \hookrightarrow F[x]/\langle f \rangle$$

לפי המסקנה האחרונה, כדי להבין שדות, עלינו להבין פולינומים אי פריקים.

**תזכורת 1.6.** יהי  $R$  תחום שלמות. איבר לא הפיך  $a \in R$  נקרא **אי פריק** אם  $a = bc$  גורר ש- $b$  הפיך או  $c$  הפיך.

Irreducible

**שאלה 1.7.** בהינתן פולינום  $f(x) \in F[x]$  איך ניתן לקבוע אם הוא אי פריק או לא?

חשוב להדגיש כל הזמן מה השדה שעובדים מעליו. למשל  $x^2 - 2$  פריק מעל  $\mathbb{R}$  אבל לא מעל  $\mathbb{Q}$ . עבורנו התכונה אי פריק היא "הבסיסית" יותר, ופולינום נקרא פריק אם הוא לא אי פריק. נציג מספר שיטות, ונתחיל בכמה אבחנות קלות:

- כל פולינום ממעלה 1 הוא אי פריק. אז המקרה הזה משעמם. מעכשיו נניח כי  $\deg f(x) \geq 2$  בטענות לא טריוויאליות.

- כל פולינום שיש לו שורש בשדה  $F$  הוא פריק. הסבר:  $\alpha$  שורש של  $f(x)$  אם ורק אם  $x - \alpha \mid f(x)$ .

- אם ל- $f(x)$  אין שורשים בשדה  $F$  זה לא אומר שהוא אי פריק. למשל ל- $f(x) = (x^2 - 5)^2$  מעל  $\mathbb{Q}$  אין שורשים, אבל הוא פריק.

טענה 1.8. לפולינום  $f(x) \in F[x]$  ממעלה  $n$  מעל שדה יש לכל היותר  $n$  שורשים.

**דוגמה 1.9.** האם  $x^n - 1$  פריק עבור  $n > 1$  (נניח מעל  $\mathbb{Q}$ )? כן, כי מייד רואים ש- $x = 1$  הוא שורש.

**תרגיל 1.10.** יהי  $f(x)$  פולינום ממעלה 2 או 3. אז  $f(x)$  אי פריק אם ורק אם אין ל- $f(x)$  שורשים.

פתרון. אם ל- $f(x)$  יש שורש הסברנו כבר שהוא פריק. מצד שני אם  $f(x) = g(x)h(x)$  כאשר  $\deg g(x), \deg h(x) \geq 1$  אז אחד מהם חייב להיות ממעלה 1 וזה אומר של- $f(x)$  יש שורש.

**דוגמה 1.11.** האם  $x^2 - x - 1$  פריק מעל  $\mathbb{Q}$ ? בעזרת "נוסחת השורשים" מגלים שהשורשים הם  $\frac{1 \pm \sqrt{5}}{2}$  שאינם רציונליים, ולכן הפולינום אי פריק.

**תרגיל 1.12.** האם הפולינום  $x^3 - x + 1$  פריק מעל  $\mathbb{Z}_3$ ?

פתרון. יש בסך הכל 3 מספרים בשדה. מסתבר שאף אחד מהם לא מאפס את הפולינום ולכן הוא אי פריק.

לשמחתנו, גם אם עובדים מעל  $\mathbb{Q}$  יש דרך להגיע למספר סופי של שורשים אפשריים שצריך לבדוק.

1.13. הערה. אם  $f(x) \in \mathbb{Q}[x]$  אז ניתן להכפיל במכפלה משותפת של המכנים ולקבל פולינום עם מקדמים שלמים שהוא פריק אם ורק אם  $f(x)$  פריק. לכן כשעובדים מעל  $\mathbb{Q}$  ניתן תמיד להניח שהמקדמים שלמים. למשל, לעבוד עם  $3x^2 + 2$  במקום עם  $\frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{3}$ .

**תרגיל 1.14.** יהי  $f(x) = a_n x^n + \dots + a_0$  כאשר כל המקדמים שלמים, הוכיחו כי אם השבר המצומצם  $\frac{q}{r}$  הוא שורש של  $f(x)$  אז

$$q \mid a_0, \quad r \mid a_n$$

פתרון. לפי הנתון

$$a_n \left(\frac{q}{r}\right)^n + \dots + a_0 = 0$$

נכפול ב- $r^n$  ונקבל

$$a_n q^n + a_{n-1} q^{n-1} r + \dots + a_1 q r^{n-1} + a_0 r^n = 0$$

מה שאומר ש- $a_0 r^n \mid a_n q^n - 1$  ו- $r \mid a_n q^n - 1$ , אבל בגלל ש- $r$  ו- $q$  זרים (הרי השבר מצומצם) אז מתקיים

$$q \mid a_0, \quad r \mid a_n$$

**תרגיל 1.15.** האם הפולינום  $x^3 - x - 6$  אי פריק מעל  $\mathbb{Q}[x]$ ?

פתרון. לפי התרגיל הקודם, אם  $\frac{q}{r}$  פתרון (שהוא שבר מצומצם) אז

$$q \mid 6, \quad r \mid 1$$

כך שבסך הכל האפשרויות הן:

$$\frac{q}{r} \in \{\pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 6\}$$

אם עוברים עליהן אפשר לראות ש-2 הוא שורש ולכן הפולינום פריק.

**תרגיל 1.16.** מצאו את הפירוק של  $x^3 - x - 6$  לגורמים אי פריקים מעל  $\mathbb{Q}$ .

פתרון. היות ש-2 שורש של הפולינום אנחנו יודעים ש- $x - 2 \mid x^3 - x - 6$ . נשתמש בחילוק פולינומים ונגלה

$$\frac{x^3 - x - 6}{x - 2} = x^2 + 2x + 3$$

ל- $x^2 + 2x + 3$  אין שורשים מעל  $\mathbb{Q}$  ולכן הוא אי פריק. לסיכום הפירוק הוא

$$x^3 - x - 6 = (x - 2)(x^2 + 2x + 3)$$

כמובן ששיטה זו עובדת גם מעל שדות סופיים.

גם עבור פולינום ממעלה גבוהה מ-3 או פולינומים מעל  $\mathbb{R}$  אפשר להשתמש בשיטה הזו, אבל רק כדי למצוא שורש רציונלי ולהראות פריקות. אם לא מוצאים שורש אי אפשר להגיד כלום (בינתיים).

הערה 1.17. זכרו כי לפולינום ממעלה אי זוגית מעל  $\mathbb{R}$  תמיד יש שורש אחד לפחות ולכן הוא תמיד פריק.

## 1.2 קריטריון אייזנשטיין והלמה של גאוס

נעבור לטכניקות אחרות לבדיקת פריקות. מעכשיו נניח כי  $R$  תחום שלמות ו- $F$  שדה השברים שלו. הדוגמה שבדרך כלל תשמש אותנו היא  $R = \mathbb{Z}$  ו- $F = \mathbb{Q}$ .

Eisenstein's  
criterion

**משפט 1.18** (קריטריון אייזנשטיין). יהי  $P \triangleleft R$  אידיאל ראשוני. יהי  $f(x) = a_n x^n + \dots + a_1 x + a_0 \in R[x]$  פולינום המקיים

$$i \neq n \quad a_i \in P \quad \bullet$$

$$a_n \notin P \quad \bullet$$

$$a_0 \notin P^2 \quad \bullet$$

אז  $f$  אי פריק ב- $F[x]$  (אין לו פירוק אמיתי מעל  $R$ ). אם  $f$  פרימיטיבי ב- $R$  (המחלק המשותף המרבי של מקדמיו הוא 1), אז  $f$  אי פריק ב- $R[x]$ . במקרה הפרטי שבו  $P = \langle p \rangle$  עבור איבר ראשוני  $p$  התנאים לעיל שקולים לכך ש- $p$  לא מחלק את  $a_n$ , מחלק את  $a_i$  עבור  $i \neq n$  ו- $p^2$  לא מחלק את  $a_0$ .

**דוגמה 1.19**.  $x^n - 4x + 2$  אי פריק מעל  $\mathbb{Q}$  כי הוא אייזנשטיין עבור  $p = 2 \in \mathbb{Z}$ . לפעמים צריך להתחכם יותר.

**תרגיל 1.20**. האם הפולינום  $x^4 + 4x^3 + 6x^2 - 1$  אי פריק מעל  $\mathbb{Q}$ ?

כדי לפתור את התרגיל נעזר בעובדה ההבאה:

טענה 1.21.  $f(x)$  אי פריק אם ורק אם  $f(x+c)$  אי פריק לכל  $c \in F$ .

הוכחה. קל לוודא שתמיד  $f(x)$  ו- $f(x+c)$  מאותה מעלה ולכן  $f(x) = g(x)h(x)$  פירוק אם ורק אם  $f(x+c) = g(x+c)h(x+c)$  פירוק.  $\square$

פתרון. אם נשים לב שהפולינום שלנו הוא למעשה

$$(x+1)^4 - 4(x+1) + 2$$

היות ש- $x^4 - 4x + 2$  אי פריק לפי קריטריון אייזנשטיין, אז גם הפולינום שלנו אי פריק.

## 2 תרגול שני

לשיטה הבאה שנציג צריך תזכורת נוספת:

**תזכורת 2.1** (גרסה ללמה של גאוס). יהי  $R$  תחום שלמות ויהי  $F$  שדה השברים שלו. יהי  $f(x) \in R[x]$ . אז  $f(x)$  אי פריק ב- $F[x]$  אם ורק אם הוא לא ניתן לפירוק למכפלת פולינומים לא קבועים שמעלתם קטנה מ- $\deg f(x)$ .

**תזכורת 2.2** (גרסה ללמה של גאוס). יהי  $f(x)$  פולינום שכל מקדמיו שלמים. נניח שהוא פרימיטיבי. אז  $f(x)$  אי פריק ב- $\mathbb{Z}[x]$  אם ורק אם הוא אי פריק ב- $\mathbb{Q}[x]$ .

**משפט 2.3** (שיטת הרדוקציה). יהי  $f(x) \in \mathbb{Z}[x]$  ויהי  $p$  ראשוני כלשהו. נסמן ב- $\bar{f}(x)$  את הפולינום המתקבל מביצוע מודולו  $p$  למקדמי  $f$ . אם  $\deg \bar{f}(x) = \deg f(x)$  ו- $\bar{f}(x)$  אי פריק אז גם  $f(x)$  אי פריק.

את ההוכחה נשאיר כתרגיל מודרך לשיעורי בית. כעת נראה יישום.

**תרגיל 2.4.** האם הפולינום  $8x^3 - 6x - 1$  אי פריק ב- $\mathbb{Q}[x]$ ?

פתרון. היות ש- $\gcd(8, 6, 1) = 1$  הפולינום אי פריק ב- $\mathbb{Q}[x]$  אם ורק אם הוא אי פריק ב- $\mathbb{Z}[x]$ . ננסה להשתמש בשיטת הרדוקציה.

ננסה  $p = 2$ : מתקבל  $-1$  שאינו באותה מעלה כמו  $f$ .

ננסה  $p = 3$ : מתקבל  $2x^3 - 1$  שהוא פריק ( $x = 2$  שורש).

ננסה  $p = 5$ : מתקבל  $3x^3 - x - 1$  שהוא במקרה אי פריק (בודקים 5 אפשרויות). לכן גם הפולינום  $8x^3 - 6x - 1$  אי פריק.

**תרגיל 2.5.** הפולינום  $f(x) = x^4 + 1$  הוא אי-פריק מעל  $\mathbb{Q}$ . הראו שלכל  $p$  ראשוני,  $f$  פריק ב- $\mathbb{F}_p$ .

פתרון. ראשית, כדי להוכיח ש- $f(x)$  אי-פריק מעל  $\mathbb{Q}$ , נשים לב כי

$$f(x+1) = (x+1)^4 + 1 = x^4 + 4x^3 + 6x^2 + 4x + 2$$

שהוא אי-פריק לפי אייזנשטיין עם  $p = 2$ .

כעת נעבור ל- $\mathbb{F}_p$ . נראה שאפשר למצוא פירוק מהצורה

$$x^4 + 1 = (x^2 + ax + b)(x^2 + cx + d)$$

נשווה מקדמים:

$$a + c = 0$$

$$b + ac + d = 0$$

$$ad + bc = 0$$

$$bd = 1$$

אם נציב את המשוואה הראשונה ואת המשוואה האחרונה בשתי המשוואות האמצעיות, נקבל

$$b - a^2 + \frac{1}{b} = 0$$

$$\frac{a}{b} - ab = 0$$

כלומר

$$b + \frac{1}{b} = a^2$$

$$\frac{a}{b} = ab$$

נחלק לשני מקרים:



- אם  $a = 0$ , נרצה שיתקיים  $b^2 + 1 = 0$  (כלומר  $\sqrt{-1} \in \mathbb{F}_p$ ).
- אם  $a \neq 0$ , נרצה שיתקיים  $b^2 = 1$ , כלומר  $b = \pm 1$ . נציב במשוואה הראשונה ונקבל  $a^2 = \pm 2 \in \mathbb{F}_p$ , כלומר רוצים  $\sqrt{\pm 2} \in \mathbb{F}_p$ .

לכן עלינו להראות שלכל  $p$ , לפחות אחד מבין  $-1, 2, -2$  הוא ריבוע מודולו  $p$ . בתרגיל הבית תוכיחו כי  $\mathbb{F}_p^\times = \langle g \rangle$  היא חבורה ציקלית, כלומר  $\mathbb{F}_p^\times \cong \mathbb{Z}/(p-1)\mathbb{Z}$ ; לכן  $(\mathbb{F}_p^\times)^2 \cong \mathbb{Z}/\frac{p-1}{2}\mathbb{Z}$  ולכן  $[\mathbb{F}_p^\times : (\mathbb{F}_p^\times)^2] = 2$ . נתבונן במחלקות המתאימות ל- $-1, 2, -2$  ב- $\mathbb{F}_p^\times/(\mathbb{F}_p^\times)^2$ ; אם  $-1$  ו- $2$  אינם ריבועים, אז שניהם מתאימים למחלקה הלא טריוויאלית, ולכן מכפלתם ( $-2$ ) תתאים למחלקה הטריוויאלית, כלומר  $-2$  כן יהיה ריבוע מודולו  $p$ .

## 2.1 הרחבת שדות

Subfield  
Field extension  
  
Intermediate  
field

**הגדרה 2.6.** יהי  $F \subseteq K$  תת-שדה של  $K$ . במקרה זה נאמר כי  $K$  הוא הרחבה של  $F$  ונסמן זאת  $K/F$ . כן, זה אותו סימון של חוג מנה, אבל אנחנו לא נתבלבל ביניהם כי שדה הוא חוג פשוט ומכאן שחוגי המנה שלו לא מעניינים.  
אם ישנה שרשרת של שדות  $F \subseteq L \subseteq K$  נאמר כי  $L$  הוא שדה ביניים של ההרחבה  $K/F$ .

**תזכורת 2.7.** ראינו בתרגול הקודם דרך לבנות הרחבת שדות מתוך השדה  $F$ : אם  $f \in F[x]$  פולינום אי-פריק, אז  $F[x]/\langle f \rangle$  הוא שדה שמכיל את  $f$ . אם  $\deg f = n$ , הוכחתם בתרגיל הבית כי  $\{1, x, \dots, x^{n-1}\}$  הוא בסיס של  $F[x]/\langle f \rangle$  כמרחב וקטורי מעל  $F$ .

**תרגיל 2.8.** בשדה  $\mathbb{Q}[x]/\langle x^3 - x^2 + 1 \rangle$ , חשבו את ההופכי של  $x^2 - 1$  כצירוף לינארי של  $1, x, x^2$ .

פתרון. נסמן  $f(x) = x^3 - x^2 + 1$  ו- $g(x) = x^2 - 1$ . כדי לחשב את ההופכי, ניעזר באלגוריתם אוקלידס המורחב למצוא  $a(x), b(x) \in \mathbb{Q}[x]$  שעבורם

$$a(x) \cdot f(x) + b(x) \cdot g(x) = 1$$

נחלק עם שארית:

$$x^3 - x^2 + 1 = (x - 1)(x^2 - 1) + x$$

ולכן

$$x = 1 \cdot (x^3 - x^2 + 1) - (x - 1) \cdot (x^2 - 1) = f(x) - (x - 1)g(x)$$

לשלב הבא,

$$x^2 - 1 = x \cdot x - 1$$

ולכן

$$1 = x \cdot x - 1 \cdot (x^2 - 1) = x \cdot (f(x) - (x - 1)g(x)) - g(x) = x \cdot f(x) + (-x^2 + x - 1)g(x)$$

בסך הכל  $a(x) = x$  ו- $b(x) = -x^2 + x - 1$ . לכן ההופכי של  $x^2 - 1$  בשדה  $\mathbb{Q}[x]/\langle x^3 - x^2 + 1 \rangle$  הוא  $-x^2 + x - 1$ .

**תזכורת 2.9.** תהי  $K/F$  הרחבת שדות ויהי  $a \in K$ .

• מגדירים  $F[a] = \{f(a) \mid f \in F[x]\} = \{\sum_{i=0}^n \alpha_i a^i \mid \alpha_i \in F\}$ . זהו תת-חוג של  $F$ .

• הסיפוח של  $a$  ל- $F$  הוא תת-השדה (של  $K$ ) הקטן ביותר שמכיל את  $F$  ואת  $a$ . נסמן אותו  $F(a)$ . הרחבה כזו, באיבר אחד, נקראת גם **הרחבה פשוטה**. בדרך אחרת, השדה  $F(a)$  הוא החיתוך של כל תת-השדות שמכילים גם את  $F$  וגם את  $a$ . חשוב להדגיש את התכונה הפשוטה (אך חשובה) הבאה: אם  $L$  שדה ביניים המכיל את  $a$  אז  $F(a) \subseteq L$ . נדגיש כי  $F(a) = F$  אם ורק אם  $a \in F$ .

Simple extension

Algebraic

Transcendental

אם  $a$  הוא **אלגברי** מעל  $F$ , כלומר שורש של איזשהו פולינום לא אפסי עם מקדמים ב- $F$ , אז  $F[a]$  הוא שדה ומתקיים  $F[a] = F(a)$ ; אחרת, אומרים ש- $a$  הוא **טרנסצנדנטי** מעל  $F$ , ואז  $F[a] \cong F[x]$  ו- $F(a) \cong F(x)$ .

**דוגמה 2.10.**  $\mathbb{Q}[\sqrt{2}] = \{a + b\sqrt{2} \mid a, b \in \mathbb{Q}\}$ . הסבר: צריך רק לוודא שהוא סגור לכפל לחיבור ולהופכי ואז זה תת-שדה של  $\mathbb{R}$ . מצד שני, ברור שכל שדה שמכיל את  $\mathbb{Q}$  ו- $\sqrt{2}$  מכיל גם את השדה מסגירות לחיבור ולכפל. שימו לב כי  $\mathbb{Q}[\sqrt{2}] = \mathbb{Q}(\sqrt{2})$  מפני ש- $(\sqrt{2})^{-1} = \frac{1}{2}\sqrt{2}$ .

**תרגיל 2.11.** הוכיחו כי  $\sqrt{6} \notin \mathbb{Q}[\sqrt{2}]$ .

פתרון. נניח בשלילה ש- $\sqrt{6} \in \mathbb{Q}[\sqrt{2}]$ . אז קיימים  $a, b \in \mathbb{Q}$  עבורם

$$\sqrt{6} = a + b\sqrt{2}$$

לא ייתכן ש- $b = 0$  כי  $\sqrt{6}$  לא רציונלי, ולא ייתכן ש- $a = 0$  כי  $\sqrt{3}$  לא רציונלי. נעלה משוואה זו בריבוע ונקבל

$$6 = a^2 + 2\sqrt{2}ab + 2b^2$$

כלומר

$$\sqrt{2} = \frac{6 - a^2 - 2b^2}{2ab}$$

מותר לחלק כי כבר הוכחנו  $ab \neq 0$ . קיבלנו ש- $\sqrt{2}$  רציונלי, וזו סתירה.

הערה 2.12. כמו שאפשר לספח איבר אחד, אפשר לספח קבוצת איברים, והעיקרון דומה.

**תרגיל 2.13.** האם  $\sqrt{2}i \in \mathbb{Q}[\sqrt{2} + i]$ ?

פתרון. על פניו אפשר לחשוד שלא, כמו בתרגיל הקודם. אבל בעצם

$$(\sqrt{2} + i)^2 = 2 + 2\sqrt{2}i - 1 = 1 + 2\sqrt{2}i$$

נחסר 1 ונחלק ב-2 (פעולות שמשאירות אותנו בתוך השדה) ונקבל כי

$$\sqrt{2}i \in \mathbb{Q}[\sqrt{2} + i]$$

### 3 תרגול שלישי

Dimension

**3.1 הגדרה** תהי  $K/F$  הרחבת שדות. בפרט  $K$  הוא מרחב וקטורי מעל  $F$ . **הממד** של  $K/F$  הוא הממד של  $K$  מעל  $F$  ומסמנים אותו  $[K : F] = \dim_F K$ . לא להתבלבל עם הסימון הזה של אינדקס שראינו בתורת החבורות.

**3.2 דוגמה** לכל שדה  $F$  מתקיים  $[K : F] = 1$  אם ורק אם  $K = F$ .

**3.3 דוגמה**  $[C : R] = 2, [R : Q] = \infty, [Q[\sqrt{2}] : Q] = 2$ .

**3.4 משפט** יהי פולינום אי פריק  $f$  מעל  $F$  עם שורש  $a$ , אז  $\deg f = [F(a) : F]$ .

במילים אחרות, אם  $K/F$  הרחבת שדות ו- $a \in K$  אלגברי מעל  $F$ , אז

$$F[x]/\langle f(x) \rangle \cong F[a] \cong F(a)$$

כאשר  $f(x)$  הוא פולינום מינימלי של  $a$ . שימו לב שאם  $b \in K$  שורש אחר של  $f(x)$ , אז  $f(x)$  הוא פולינום מינימלי גם של  $b$  ומתקיים  $F[a] \cong F[b]$ . גם הכיוון ההפוך נכון:

**3.5 טענה** אם  $K/F$  הרחבת שדות כך ש- $K \cong F[a]$ , אז  $K = F[b]$  עבור איזשהו  $b \in K$  שהוא שורש של פולינום מינימלי של  $a$ . זה כמובן לא אומר ש- $b \in F[a]$ .

**3.6 שאלה** תהי  $F(a)$  הרחבה של  $F$  ונניח ש- $f$  הוא הפולינום המינימלי של  $a$  (מעל  $F$ ). האם כל השורשים של  $f$  נמצאים ב- $F(a)$ ?

פתרון. לפעמים כן (למשל  $Q(\sqrt{2})$ ) אבל זה לא תמיד קורה. למשל ניקח את  $Q(\sqrt[3]{2})$ . ברור כי  $Q(\sqrt[3]{2}) \subseteq R$  ושהפולינום המינימלי של  $\sqrt[3]{2}$  הוא  $x^3 - 2$ , אבל שאר השורשים שלו הם מרוכבים ולכן לא נמצאים ב- $Q(\sqrt[3]{2})$ .

**3.7 הערה** המצבים שבהם כן כל השורשים נמצאים בהרחבה הם חשובים ונדבר עליהם בהרחבה בהמשך הקורס.

### 3.1 חישוב פולינום מינימלי

**3.8 תרגיל** מהו הפולינום המינימלי של  $\sqrt{2} + \sqrt{3}$  מעל  $Q$ ? מעל  $Q(\sqrt{2})$ ?

פתרון. נסמן  $a = \sqrt{2} + \sqrt{3}$ . מעל  $Q(\sqrt{2})$ ,

$$a - \sqrt{2} = \sqrt{3} \implies a^2 - 2\sqrt{2}a + 2 = 3 \implies a^2 - 2\sqrt{2}a - 1 = 0$$

נטען כי  $f(x) = x^2 - 2\sqrt{2}x - 1$  הוא הפולינום המינימלי של  $a$  מעל  $Q(\sqrt{2})$ . אכן,  $\sqrt{2} + \sqrt{3} \notin Q(\sqrt{2})$ , ולכן הפולינום המינימלי לא יכול להיות לינארי. לכן הוא מדרגה 2, אבל  $f(x)$  מדרגה 2 ולכן הוא המינימלי. מעל  $Q$ , נשים לב כי

$$a^2 = 2 + 2\sqrt{6} + 3 = 5 + 2\sqrt{6}$$

ולכן  $a^2 - 5 = 2\sqrt{6}$  נעלה בריבוע ונקבל

$$a^4 - 10a^2 + 25 = 24 \implies a^4 - 10a^2 + 1 = 0$$

נטען כי  $g(x) = x^4 - 10x^2 + 1$  הוא הפולינום המינימלי של  $\sqrt{2} + \sqrt{3}$ . אכן, הוא מאפס אותו; כדי להראות אי-פריקות, ניזכר שמתרגיל הבית מתקיים  $\mathbb{Q}(\sqrt{2} + \sqrt{3}) = \mathbb{Q}(\sqrt{2}, \sqrt{3})$ , וניתן לוודא כי  $[\mathbb{Q}(\sqrt{2} + \sqrt{3}) : \mathbb{Q}] = 4$ . לכן הדרגה של הפולינום המינימלי של  $\sqrt{2} + \sqrt{3}$  מעל  $\mathbb{Q}$  צריכה להיות 4, ולכן זהו  $g(x)$ .

**תרגיל 3.9.** נתון כי הפולינום המינימלי של  $a$  (מעל  $\mathbb{Q}$ ) הוא  $x^3 - 6x^2 + 9x + 11$  מצאו את הפולינום המינימלי של  $\frac{1}{a}$ .

פתרון. נציב  $a$  בפולינום ונשים לב כי

$$a^3 - 6a^2 + 9a + 11 = 0$$

ולכן

$$1 - \frac{6}{a} + \frac{9}{a^2} + \frac{11}{a^3} = 0$$

כלומר הפולינום  $11x^3 + 9x - 6x + 1$  מאפס את  $\frac{1}{a}$ . אין לפולינום שורשים ב- $\mathbb{Q}$  (אם  $b$  היה שורש אז  $\frac{1}{b}$  שורש של הפולינום המקורי בסתירה לאי פריקות). לכן הוא הפולינום המינימלי (צריך לחלק ב-11 כדי להפוך אותו למתוקן).

## 3.2 כפליות הממד

**תזכורת 3.10** (כפליות הממד). אם  $F \subseteq L \subseteq K$ , אז

$$[K : L][L : F] = [K : F]$$

**תרגיל 3.11.** תהי  $F \subseteq K$  הרחבת שדות ויהיו  $a, b \in K \setminus F$ . נניח כי

$$[F(a) : F] = n, \quad [F(b) : F] = m$$

הוכיחו כי  $[F(a, b) : F] \leq nm$ .

פתרון. הנתון  $[F(a) : F] = n$  אומר לנו שהפולינום המינימלי  $m_a \in F[x]$  של  $a$  מעל  $F$  הוא ממעלה  $n$ . אבל  $m_a$  הוא גם פולינום מעל  $F(b)$  שמאפס את  $a$ . לכן הפולינום המינימלי של  $a$  מעל  $F(b)$  מחלק את  $m_a$  ולכן הוא ממעלה קטנה (או שווה) ממנו. לכן

$$[F(a, b) : F(b)] \leq n$$

ומכאן נקבל בעזרת כפליות הממד:

$$[F(a, b) : F] = [F(a, b) : F(b)] [F(b) : F] \leq nm$$

**תרגיל 3.12.** בהמשך לתרגיל הקודם, הראו שאם  $(n, m) = 1$  אז  $[F(a, b) : F] = nm$ .

פתרון. נשים לב כי

$$[F(a, b) : F] = [F(a, b) : F(a)][F(a) : F] = n[F(a, b) : F(a)]$$

$$[F(a, b) : F] = [F(a, b) : F(b)][F(b) : F] = m[F(a, b) : F(b)]$$

כלומר  $n, m \mid [F(a, b) : F]$ .

$$nm = [n, m] \mid [F(a, b) : F]$$

כי  $n, m$  זרים, ולכן  $[F(a, b) : F] = nm$ .

**דוגמה 3.13.**  $[\mathbb{Q}(\sqrt{2}, \sqrt[3]{11}) : \mathbb{Q}] = 6$  כי  $(2, 3) = 1$ .

**תרגיל 3.14.** תהי  $K/F$  הרחבה סופית, ויהי  $p \in F[x]$  פולינום אי-פריק (מעל  $F$ ) כך ש- $\deg p \nmid [K : F]$ . הוכיחו כי ל- $p$  אין שורש ב- $K$ .

הוכחה. נניח בשלילה שיש שורש  $\alpha \in K$  של  $p$ . לכן  $F \subseteq F(\alpha) \subseteq K$ . ממשפט 3.4,  $\deg p = [F(\alpha) : F] \mid [K : F]$ . אבל מכפלויות המימד נקבל  $[K : F] \nmid [F(\alpha) : F]$ . בסתירה לנתון.  $\square$

**הערה 3.15.** ייתכן שמעל  $F$  הפולינום  $p$  יהפוך להיות פריק, גם אם אין לו שורש. למשל, אם ניקח  $F = \mathbb{Q}$ ,  $K = \mathbb{Q}(\sqrt{2})$  ו- $p(x) = x^4 - 2$ .  $p(x) = (x^2 + \sqrt{2})(x^2 - \sqrt{2})$  כי מעל  $K$  אבל פריק מעל  $\mathbb{Q}$  לפי איזנשטיין עם  $p = 2$ .

## 4 תרגול רביעי

### 4.1 שורשי יחידה

Primitive root of unity

**הגדרה 4.1.** יהי  $F$  שדה. איבר  $\rho \in F$  נקרא **שורש יחידה פרימיטיבי** (או קדום) ממעלה  $n$  אם הסדר שלו ב- $F^*$  הוא  $n$ . כלומר  $\rho^n = 1$  וגם  $\rho^i \neq 1$  לכל  $1 \leq i < n$ .

**דוגמה 4.2.** ב- $\mathbb{C}$  לכל  $n \in \mathbb{N}$  יש שורש יחידה פרימיטיבי, למשל  $\rho_n = e^{2\pi i/n}$ .

**הערה 4.3.** אם  $\rho$  שורש יחידה פרימיטיבי מדרגה  $n$ , אז  $\rho^k$  הוא שורש יחידה פרימיטיבי מדרגה  $n$  אם ורק אם  $(n, k) = 1$ .

**תרגיל 4.4.** יהי  $\rho \in F$  שורש יחידה פרימיטיבי מדרגה  $n$ . הוכיחו כי  $1, \rho, \dots, \rho^{n-1}$  כולם שונים זה מזה, והראו כי

$$x^n - 1 = \prod_{i=1}^n (x - \rho^i)$$

פתרון. נניח כי  $\rho^i = \rho^j$  כאשר  $i \leq j$ . אז  $\rho^{j-i} = 1$ . אבל  $0 \leq j - i < n$ , ולכן בהכרח  $j = i$ , כי  $\rho$  הוא שורש יחידה פרמיטיבי מדרגה  $n$ . נשים לב ש- $\rho^i$  הוא שורש של  $x^n - 1$  לכל  $i$ . מכיוון שהם שונים, אלו הם כל השורשים של  $x^n - 1$ , כי זה פולינום מעל שדה ממעלה  $n$ . לכן  $x^n - 1 = \prod_{i=1}^n (x - \rho^i)$ .

**דוגמה 4.5.** יהי שורש יחידה פרמיטיבי מדרגה  $n$ . אז

$$\mathbb{Q}(\rho) = \{a_0 + a_1\rho + \dots + a_{n-1}\rho^{n-1} \mid a_i \in \mathbb{Q}\}$$

**דוגמה 4.6.** יהי  $p$  ראשוני ויהי  $\rho_p$  שורש יחידה פרמיטיבי מדרגה  $p$ . אז הוא בוודאי מאפס את  $x^p - 1$ . נחפש גורם אי פריק של פולינום זה:

$$\frac{x^p - 1}{x - 1} = x^{p-1} + \dots + x + 1$$

שהוא הפולינום המינימלי של  $\rho_p$  כי למזלנו פתרנו את תרגילי הבית בתורת החוגים שבהם הוכחנו שהוא אי פריק. לכן  $[\mathbb{Q}(\rho_p) : \mathbb{Q}] = p - 1$ .

**תרגיל 4.7.** נסמן  $\rho = e^{\frac{\pi i}{6}}$ , שהוא שורש יחידה פרמיטיבי מדרגה 12. הוכיחו כי

$$\mathbb{Q}(\rho) = \mathbb{Q}(\sqrt{3}, i)$$

פתרון. נשים לב ש- $\rho = \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2}i$ . אז ברור ש- $\mathbb{Q}(\rho) \subseteq \mathbb{Q}(\sqrt{3}, i)$ . מצד שני  $\rho^3 = i$  ולכן  $i \in \mathbb{Q}(\rho)$  וגם

$$\sqrt{3} = 2(\rho - \frac{i}{2}) \in \mathbb{Q}(\rho)$$

ולכן יש שוויון.

**תרגיל 4.8.** בהמשך לתרגיל הקודם, חשבו את  $[\mathbb{Q}(\rho) : \mathbb{Q}]$ .

פתרון. קל לראות ש- $[\mathbb{Q}(\sqrt{3}) : \mathbb{Q}] = 2$  וש- $[\mathbb{Q}(i, \sqrt{3}) : \mathbb{Q}(\sqrt{3})] = 2$  ולכן

$$[\mathbb{Q}(\rho) : \mathbb{Q}] = 4$$

**תרגיל 4.9.** בהמשך לתרגיל הקודם, מצאו פולינום מינימלי של  $\rho$ .

פתרון. אנחנו יודעים כי  $\rho^{12} = 1$ . כלומר מדובר בשורש של  $x^{12} - 1$ . אבל זה כמובן פריק. נתחיל לפרק

$$x^{12} - 1 = (x^6 - 1)(x^6 + 1)$$

ונשים לב כי שורש של  $x^6 + 1$  לפי הנוסחה  $a^3 + b^3 = (a + b)(a^2 - ab + b^2)$  נקבל

$$x^6 + 1 = (x^2 + 1)(x^4 - x^2 + 1)$$

מפני ש- $\rho$  אינו שורש של  $x^2 + 1$ , אז הוא צריך להיות שורש של  $x^4 - x^2 + 1$ . זה פולינום אי פריק כי אנחנו כבר יודעים ש- $[\mathbb{Q}(\rho) : \mathbb{Q}] = 4$ . למעשה יש לנו דרך חדשה להוכיח שפולינום הוא אי פריק.

הערה 4.10. בהמשך הקורס נלמד על הפירוק המלא של  $x^n - 1$ .

## 4.2 שדות פיצול

**4.11 הגדרה** יהי  $f \in F[x]$ . הפולינום  $f$  מתפצל ב- $F$  אם אפשר לפרק אותו למכפלה של גורמים לינאריים. אם  $f$  מתפצל בהרחבת שדות  $E/F$ , נאמר ש- $E$  הוא שדה מפצל של  $f$ .

Split  
 $E$  Splits  $f$

**4.12 דוגמה**  $\mathbb{Q}[\sqrt{2}]$  מפצל את  $x^2 - 2$  מעל  $\mathbb{Q}$ . באופן דומה  $\mathbb{Q}[\sqrt{\Delta}]$  מפצל את  $ax^2 + bx + c$  כאשר  $\Delta$  היא הדיסקרימיננטה. אפשר לפצל כמה פולינומים בבת אחת, למשל  $\mathbb{C}$  הוא שדה מפצל של כל פולינום מעל  $\mathbb{Q}$ .

**4.13 הגדרה** יהי  $f \in F[x]$ . נאמר ש- $E/F$  הוא שדה פיצול של  $f$  אם הוא שדה מפצל מינימלי. כלומר אין שדה ביניים (לא טריוויאלי) שהוא שדה מפצל.

Splitting field

**4.14 משפט** יהי  $f \in F[x]$ . כל שדות הפיצול של  $f$  מעל  $F$  איזומורפיים.

**4.15 תרגיל** מצאו את שדה הפיצול של  $x^5 - 2$  מעל  $\mathbb{Q}$  ואת הממד שלו.

פתרון. נסמן  $\rho = e^{2\pi i/5}$ . אז השורשים של הפולינום הם

$$\sqrt[5]{2}, \sqrt[5]{2}\rho, \dots, \sqrt[5]{2}\rho^4$$

ולכן שדה הפיצול הוא  $E = \mathbb{Q}(\sqrt[5]{2}, \sqrt[5]{2}\rho, \dots, \sqrt[5]{2}\rho^4)$ . קל לבדוק כי

$$\mathbb{Q}(\sqrt[5]{2}, \sqrt[5]{2}\rho, \dots, \sqrt[5]{2}\rho^4) = \mathbb{Q}(\sqrt[5]{2}, \rho)$$

וקל לחשב  $[\mathbb{Q}(\sqrt[5]{2}) : \mathbb{Q}] = 5$ . כמו כן, נשים לב כי  $x^5 - 1$  מאפס את  $\rho$ . אבל הפולינום הזה אינו הפולינום המינימלי כי הוא פריק. אנחנו כבר יודעים כי

$$x^5 - 1 = (x - 1)(x^4 + x^3 + x^2 + x + 1)$$

ושהגורם  $x^4 + x^3 + x^2 + x + 1$  הוא אי פריק. לכן  $[\mathbb{Q}(\rho) : \mathbb{Q}] = 4$ . מפני ש- $\gcd(4, 5) = 1$ , אז לפי תרגיל 3.12 (או מתרגיל הבית), נקבל  $[E : \mathbb{Q}] = 20$ .

## 5 תרגול חמישי

### 5.1 המשך שדות פיצול

**5.1 תרגיל** מצאו את שדה הפיצול של  $x^4 - 4x^2 - 1$  מעל  $\mathbb{Q}$ .

פתרון. צריך בסך הכל למצוא את השורשים. מציבים  $t = x^2$  ופותרים. מגלים שהשורשים הם

$$\pm\sqrt{2 + \sqrt{5}}, \pm\sqrt{2 - \sqrt{5}}$$

ולכן שדה הפיצול הוא  $\mathbb{Q}(\sqrt{2 + \sqrt{5}}, \sqrt{2 - \sqrt{5}})$ .

**תרגיל 5.2.** הוכיחו כי  $f(x) = x^4 - 4x^2 - 1$  הוא אי פריק מעל  $\mathbb{Q}$ .

פתרון. דרך א': ברור של- $f(x)$  אין שורשים ב- $\mathbb{Q}$  (כי מצאנו את השורשים). אז נשאר לוודא שהוא לא מתפרק למכפלת פולינומים ממעלה 2. אבל אנחנו כבר יודעים

$$x^4 - 4x^2 - 1 = (x - \sqrt{2 + \sqrt{5}})(x + \sqrt{2 + \sqrt{5}})(x - \sqrt{2 - \sqrt{5}})(x + \sqrt{2 - \sqrt{5}})$$

וקל לבדוק שכל מכפלה של שני גורמים מכאן אינה פולינום מעל  $\mathbb{Q}$ .  
דרך ב': כמו בתרגיל הבית מוכיחים ש- $[\mathbb{Q}(\sqrt{2 + \sqrt{5}}) : \mathbb{Q}] = 4$ . לכן הפולינום המינימלי של  $\sqrt{2 + \sqrt{5}}$  הוא ממעלה 4, לכן  $x^4 - 4x^2 - 1$  מינימלי ולכן אי פריק.

**תרגיל 5.3.** כמה תת-שדות יש ל- $\mathbb{C}$  שאיזומורפיים ל- $\mathbb{Q}(\sqrt{2 + \sqrt{5}})$ ?

פתרון. אם  $K \subseteq \mathbb{C}$  הוא שדה ויש  $\varphi: \mathbb{Q}(\sqrt{2 + \sqrt{5}}) \rightarrow K$  איזומורפיזם, אז  $\varphi$  מקבע את  $\mathbb{Q}$ . כמו כן  $\varphi(\sqrt{2 + \sqrt{5}})$  בהכרח נשלח לשורש של  $x^4 - 4x^2 - 1$  שזה פולינום עם 4 שורשים (שונים) בסך הכל. מכאן מסיקים שכל אחד מבין

$$\mathbb{Q}(\sqrt{2 + \sqrt{5}}), \mathbb{Q}(-\sqrt{2 + \sqrt{5}}), \mathbb{Q}(\sqrt{2 - \sqrt{5}}), \mathbb{Q}(-\sqrt{2 - \sqrt{5}})$$

מוכל ב- $K$ . לכן הוא צריך להיות שווה ל- $K$  משיקולי ממד. כעת נשים לב שהשניים הימניים והשמאליים למעשה שווים. אז יש רק שני תת-שדות והם  $\mathbb{Q}(\sqrt{2 - \sqrt{5}})$  ו- $\mathbb{Q}(\sqrt{2 + \sqrt{5}})$ . אלו שדות איזומורפיים אבל שונים, כי אחד מרוכב והשני ממשי.

**תרגיל 5.4.** נסמן  $E = \mathbb{Q}(\sqrt{2 + \sqrt{5}}, \sqrt{2 - \sqrt{5}})$ . חשבו את הממד שלו מעל  $\mathbb{Q}$ .

פתרון. כבר ראינו  $[\mathbb{Q}(\sqrt{2 + \sqrt{5}}) : \mathbb{Q}] = 4$ , ונשאר לבדוק מהו  $[E : \mathbb{Q}(\sqrt{2 + \sqrt{5}})]$ . ברור שזה לא 1 כי

$$\sqrt{2 - \sqrt{5}} \notin \mathbb{Q}(\sqrt{2 + \sqrt{5}})$$

שהוא מספר מרוכב ואילו  $\mathbb{Q}(\sqrt{2 + \sqrt{5}})$  ממשי. מצד שני, נשים לב ש- $\sqrt{5} \in \mathbb{Q}(\sqrt{2 + \sqrt{5}})$  ולכן

$$x^2 - 2 + \sqrt{5}$$

פולינום מאפס של  $\sqrt{2 - \sqrt{5}}$  מעל  $\mathbb{Q}(\sqrt{2 + \sqrt{5}})$ . לכן  $[E : \mathbb{Q}(\sqrt{2 + \sqrt{5}})] = 2$  וקיבלנו ש- $[E : \mathbb{Q}] = 8$ .

**תרגיל 5.5.** יהי  $F$  שדה ממאפיין  $p$ . נתבונן בפולינום  $f(x) = x^p - x - a$ . יהי  $\alpha$  שורש של  $f(x)$ . מצאו את שדה הפיצול של  $\alpha$  מעל  $F$ .

פתרון. נשים לב כי לכל  $k \in \{0, 1, \dots, p-1\}$  מתקיים

$$f(\alpha + k) = (\alpha + k)^p - (\alpha + k) - a = \alpha^p + k^p - \alpha - k - a = 0$$

מפני ש- $(\alpha + k)^p = \alpha^p + k^p$ . כלומר  $\{\alpha + k\}_{k=0}^{p-1}$  הם כל השורשים של  $f$ , כי הוא ממעלה  $p$ . לכן שדה הפיצול הוא

$$F[\alpha] = F[\alpha, \alpha + 1, \dots, \alpha + p - 1]$$



טענה 5.6. לכל פולינום  $f \in F[x]$  יש שדה מפצל שממדו אינו עולה על  $(\deg f)!$ .  
**דוגמה 5.7.** בתרגיל 5.5, אם  $f(x)$  אי פריק, אז  $[F[\alpha] : F] = p$  וזה יכול להיות ממש קטן מ- $p!$ .

## 5.2 המשכה

**תרגיל 5.8.** יהיו  $f, g: F(a_1, \dots, a_n) \rightarrow K$  שני הומומורפיזמים שמקיימים

$$\begin{aligned} f(x) &= g(x) \quad \forall x \in F \\ f(a_i) &= g(a_i) \quad 1 \leq i \leq n \end{aligned}$$

הוכיחו כי  $f = g$ .

פתרון. הקבוצה  $\{r \in F(a_1, \dots, a_n) \mid f(r) = g(r)\}$  היא תת-שדה של  $F(a_1, \dots, a_n)$  (קל לבדוק) והיא מכילה את  $F, a_1, \dots, a_n$ . לכן היא כל  $F(a_1, \dots, a_n)$ , ונסיק  $f = g$ .

**הגדרה 5.9.** תהי  $K/F$  הרחבת שדות, ויהי  $\varphi: F \rightarrow E$  שיכון (למה כל הומומורפיזם של שדות הוא שיכון?). שיכון  $\bar{\varphi}: K \rightarrow E$  נקרא **המשכה** של  $\varphi$  אם הצמצום של  $\bar{\varphi}$  ל- $F$  שווה ל- $\varphi$ .

Extension of an  
embedding

**תרגיל 5.10.** תהי  $K/F$  הרחבת שדות. יהי  $g(x) \in F[x]$  אי פריק ויהיו  $a, b$  שני שורשים של  $g$ . הוכיחו כי יש איזומורפיזם

$$f: F(a) \rightarrow F(b)$$

המקיים כי  $f(a) = b$  וכן  $f(\alpha) = \alpha$  לכל  $\alpha \in F$ .

פתרון. נסתכל על העתקת ההכלה  $i: F \hookrightarrow F(b)$ . אפשר להרחיב אותה להעתקה

$$\hat{i}: F[x] \rightarrow F(b)$$

כך ש- $f(x) = b$  לפי הגדרת פולינומים. כמובן שכעת זו העתקה על. נשים לב שהגרעין הוא  $\langle g(x) \rangle$  (כי  $g(x)$  פולינום מינימלי של  $a$ ). לפי משפט האיזומורפיזם הראשון

$$f: F[x]/\langle g(x) \rangle \rightarrow F(b)$$

הוא איזומורפיזם ובאופן דומה ניתן לבנות איזומורפיזם  $g: F[x]/\langle g(x) \rangle \rightarrow F(a)$  האיזומורפיזם שאנחנו מחפשים הוא  $gf^{-1}$ .

**תזכורת 5.11.** תהי  $K/F$  הרחבת שדות ויהיו  $a, b \in K$  איברים עם פולינומים מינימליים  $m_a, m_b$  מעל  $F$ , בהתאמה. נסמן ב- $E_a, E_b$  את שדות הפיצול של  $m_a, m_b$ . אז כל איזומורפיזם

$$f: F(a) \rightarrow F(b)$$

שמקבע את איברי  $F$  (כלומר  $f(\alpha) = \alpha$  לכל  $\alpha \in F$ ) ניתן להרחיב לאיזומורפיזם  $f: E_a \rightarrow E_b$ .

**תרגיל 5.12.** יהי  $g(x) \in F[x]$  פולינום אי פריק עם שדה פיצול  $E$ . ויהיו  $a, b$  שני שורשים של  $g(x)$ . הוכיחו כי יש איזומורפיזם  $f: E \rightarrow E$  שמקבע את איברי  $F$  ומקיים  $f(a) = b$ .

פתרון. לפי תרגיל קודם יש איזומורפיזם  $f: F(a) \rightarrow F(b)$  שמקבע את איברי  $F$  ושולח  $f(a) = b$  לפי התזכורת אפשר להרחיב אותו לכל  $E$ .

## 6 תרגול שישי

### 6.1 קומפוזיטום

Compositum

**הגדרה 6.1.** אם  $F, L \subseteq K$ , אז **הקומפוזיטום** של  $F$  ו- $L$  הוא תת-השדה המינימלי שמכיל את  $F, L$  ומסומן בדרך כלל  $FL$  או  $F \vee L$ .

**תרגיל 6.2.** יהיו  $F \subseteq K \subseteq E$  שדות כך ש- $E$  שדה פיצול של פולינום  $f(x) \in F[x]$  כלשהו ו- $K$  מכיל שורש  $a$  של  $f(x)$ . הוכיחו כי ניתן למצוא  $K_1, \dots, K_r$  תת-שדות של  $E$  שכולם איזומורפיים ל- $K$  כך שמתקיים

$$E = K_1 K_2 \cdots K_r$$

פתרון. נסמן ב- $b_1, \dots, b_r$  את שורשי  $f$ . ראינו כבר שיש איזומורפיזמים

$$f_i: F(a) \rightarrow F(b_i)$$

ואפשר להרחיב אותם  $f_i: E \rightarrow E$ . נסמן  $K_i = f_i(K)$  לכל  $i$ . אז כמובן  $K_i \cong K$ , ולכל  $i$  מתקיים  $K_i \subseteq E$  ולכן

$$K_1 K_2 \cdots K_r \subseteq E$$

מצד שני כל השורשים של  $f$  שייכים ל- $K_1 K_2 \cdots K_r$  ולכן  $E \subseteq K_1 K_2 \cdots K_r$ , כדרוש.

### 6.2 פולינומים ספרביליים

Separable

**הגדרה 6.3.** פולינום  $f(x)$  המתפצל בשדה  $E$  נקרא **ספרבילי** (פריד) אם בפירוק שלו אין גורם כפול מן הצורה  $(x - \alpha)^2$ . בצורה פחות מדוייקת, אפשר לומר שכל השורשים של  $f(x)$  שונים זה מזה בשדה הפיצול שלו, ולמעשה אין תלות ב- $E$ .

**דוגמה 6.4.** נתבונן ב- $F = \mathbb{F}_2(t)$  שהוא שדה השברים של החוג  $\mathbb{F}_2[t]$ . הפולינום  $f(x) = x^2 - t$  הוא אי פריק ואי ספרבילי. רואים זאת לפי החישוב

$$x^2 - t = (x - \sqrt{t})(x + \sqrt{t}) = (x + \sqrt{t})^2$$

כי השדה הוא ממאפיין 2, והוא אי פריק כי  $\sqrt{t} \notin F$ .

הערה 6.5. דרך אפקטיבית לזהות פולינום ספרבילי היא לפי הקריטריון:  $f(x)$  ספרבילי אם ורק אם  $\gcd(f(x), f'(x)) = 1$ .  
 בפרט, אם  $f(x)$  אי פריק, אז הוא ספרבילי אם ורק אם  $f' \neq 0$ .  
 בפרט, במאפיין 0, כל פולינום אי פריק הוא ספרבילי.

**תרגיל 6.6.** האם הפולינום  $x^4 - 8x + 16 \in \mathbb{Q}[x]$  ספרבילי?

פתרון. הנגזרת היא  $4x^3 - 8$ . צריך לבדוק האם הם זרים. נשתמש באלגוריתם אוקלידס כאשר קודם נחלק ב-4 (שהוא הפיך) ונמשיך עם  $x^3 - 2$ :

$$x^4 - 8x + 16 = x(x^3 - 2) - 6x + 16$$

נחלק ב-6 ונמשיך עם  $x - \frac{8}{3}$ :

$$(x^3 - 2) = (x^2 + \frac{8}{3}x + \frac{64}{9})(x - \frac{8}{3}) + \frac{512}{27}$$

ולכן הפולינום זרים. כלומר הפולינום  $x^4 - 8x + 16$  ספרבילי.

**תרגיל 6.7.** האם הפולינום  $x^4 - 8x^2 + 16$  ספרבילי?

פתרון. קל לפתור על ידי חישוב השורשים ישירות, אבל נשתמש בנגזרת במקום. הנגזרת היא  $4x^3 - 16x$  ונשתמש באלגוריתם אוקלידס עם  $x^3 - 4x$ . נחשב

$$x^4 - 8x^2 + 16 = x(x^3 - 4x) - 4x^2 + 16$$

ומפני ש- $x^3 - 4x = x(x^2 - 4)$ , כלומר לפולינום ולנגזרתו יש גורם משותף  $x^2 - 4$ , נקבל כי  $x^4 - 8x^2 + 16$  לא ספרבילי.

### 6.3 הרחבות ספרביליות

**הגדרה 6.8.** הרחבת שדות  $K/F$  תקרא **ספרבילית** (פְּרִיָּדָה) אם הפולינום המינימלי של כל  $a \in K$  מעל  $F$  הוא ספרבילי. (כל איבר כזה נקרא **איבר ספרבילי**).

**דוגמה 6.9.** אם  $F$  שדה ממאפיין  $p > 0$ , אז  $F(\sqrt[p]{t})/F(t)$  אינה ספרבילית כי  $x^p - t$  לא ספרבילי.

**תרגיל 6.10.** תהי  $K/F$  הרחבת שדות ספרבילית, ויהי  $L$  שדה ביניים. הוכיחו כי גם  $L/F$  וגם  $K/L$  ספרביליות.

פתרון. ברור ש- $L/F$  ספרבילית, כי כל איבר ב- $L$  הוא איבר של  $K$ . עבור  $K/L$ , יהי  $a \in K$  ויהי  $f_{a,F}$  הפולינום המינימלי של  $a$  מעל  $F$ . אז  $f_{a,L} | f_{a,F}$  ולכן ל- $f_{a,L}$  אין שורשים כפולים. לכן  $K/L$  ספרבילית.

Separable  
extension  
Separable  
element

קעת מטרתנו תהיה להוכיח את הכיוון ההפוך. כלומר: אם  $L/F$  ו- $K/L$  הרחבות ספרביליות, אז  $K/F$  הרחבה ספרבילית. שימו לב שבמקרה של מאפיין 0, הטענה טריוויאלית; שהרי במאפיין 0 כל פולינום אי פריק הוא ספרבילי. אנחנו נוכיח את זה במקרה של הרחבות סופיות, כלומר  $[L : F] < \infty$ .

**6.11 הגדרה.** זרגת הספרביליות של ההרחבה  $K/F$ , המסומנת  $[K : F]_s$ , היא מספר השיכונים של  $K$  בסגור האלגברי  $\bar{F}$  של  $F$  שמקבעים את  $F$ . באופן שקול: זו כמות ההמשכות של  $\text{id} : F \hookrightarrow \bar{F}$  לשיכון  $K \hookrightarrow \bar{F}$ .

**תזכורת 6.12** (מההרצאה). יהי  $a$  איבר אלגברי מעל  $F$  עם פולינום מינימלי  $f$ . אז מספר ההרחבות של שיכון  $\varphi : F \hookrightarrow E$  לשיכון  $\psi : F(a) \hookrightarrow E$  שווה למספר השורשים השונים של  $\varphi(f)$  ב- $E$ .

**תרגיל 6.13** (לבית). אם  $\varphi : F \hookrightarrow K$  שיכון ו- $f \in F[x]$ , אז  $f$  ספרבילי מעל  $F$  אם ורק אם  $\varphi(f)$  ספרבילי מעל  $K$ .

**מסקנה 6.14.** יהי  $\alpha$  אלגברי מעל  $F$ . אז:

1. לכל שיכון  $\varphi : F \hookrightarrow \bar{F}$  יש לכל היותר  $[F(\alpha) : F]$  המשכות לשיכון  $F(\alpha) \hookrightarrow \bar{F}$ .  
בפרט,  $[F(\alpha) : F]_s \leq [F(\alpha) : F]$ .

2. ספרבילי מעל  $F$  אם ורק אם יש בדיוק  $[F(\alpha) : F]$  המשכות כאלו (ובאופן שקול):  
 $([F(\alpha) : F]_s = [F(\alpha) : F])$ .

הוכחה. כמות השורשים השונים שיש ל- $\varphi(f)$  היא לכל היותר  $\deg \varphi(f) = \deg f$ . כמות השורשים שיש ל- $\varphi(f)$  שוויון אם ורק אם יש  $\deg f$  שורשים שונים, כלומר  $\alpha$  ספרבילי מעל  $F$ .  
 $\square$

**מסקנה 6.15.** אם  $K/F$  הרחבה סופית ו- $\varphi : F \hookrightarrow \bar{F}$  שיכון, אז:

1. יש לכל היותר  $[K : F]$  דרכים להמשיך את  $\varphi$  לשיכון  $K \hookrightarrow \bar{F}$ . בפרט,  
 $[K : F]_s \leq [K : F]$ .

2. אם  $K$  נוצר על ידי איברים ספרביליים מעל  $F$ , אז יש שוויון בסעיף הקודם.

הוכחה. נבחר  $\alpha_1, \dots, \alpha_n \in K$  כך ש- $K = F(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$ . נוכיח את הטענה באינדוקציה על  $n$ . את המקרה  $n = 1$  הראינו במסקנה הקודמת.

נניח שהטענה נכונה עבור כל הרחבה עם  $n$  יוצרים. תהי  $K = F(\alpha_1, \dots, \alpha_{n+1})$  הרחבה עם  $n + 1$  יוצרים, ונסמן  $K_0 = F(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$ . כל המשכה  $K \hookrightarrow \bar{F}$  של  $\varphi$  נקבעת על ידי התמונה של  $K_0$ , שהיא המשכה של  $\varphi$  ל- $\bar{F}$ , ומהתמונה של  $\alpha_{n+1}$  ב- $\bar{F}$ . מהנחת האינדוקציה, יש לכל היותר  $[K_0 : F]$  דרכים להמשיך את  $\varphi$  לשיכון  $K_0 \hookrightarrow \bar{F}$ , ולכל המשכה כזו יש לכל היותר  $[K : K_0]$  דרכים להמשיך אותה לשיכון  $K \hookrightarrow \bar{F}$ . בסך הכל נקבל שיש לכל היותר  $[K : F] \cdot [K : K_0] = [K : F]$  שיכונים  $K \hookrightarrow \bar{F}$  שממשיכים את  $\varphi$ .

בנוסף, אם  $\alpha_1, \dots, \alpha_{n+1}$  ספרביליים מעל  $F$ , אז מהנחת האינדוקציה יש בדיוק  $[K_0 : F]$  דרכים להמשיך את  $\varphi$  לשיכון  $\overline{F}$  של  $K_0$ . מתרגיל 6.10 נקבל ש- $\alpha_{n+1}$  ספרבילי מעל  $K_0$ , ולכן יש בדיוק  $[K : K_0]$  דרכים להמשיך כל המשכה כזו לשיכון  $\overline{F}$  של  $K$ . מכפלות המימד נקבל שיש  $[K : F]$  דרכים להמשיך את  $\varphi$  לשיכון  $\overline{F}$  של  $K$ . כנדרש.  $\square$

טענה 6.16. תהי  $K = F(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$  הרחבה סופית של  $F$ . אז הבאים שקולים:

1. ההרחבה  $K/F$  ספרבילית.

2. האיברים  $\alpha_1, \dots, \alpha_n$  ספרביליים מעל  $F$ .

3.  $[K : F]_s = [K : F]$ .

הוכחה.  $2 \Leftarrow 1$  טריוויאלי.

$3 \Leftarrow 2$  מהמסקנה הקודמת.

$1 \Leftarrow 3$  נניח בשלילה שקיים איבר  $\beta \in K$  לא ספרבילי. נתבונן במגדל השדות  $F \subseteq F(\beta) \subseteq K$ . את שיכון הזהות  $\text{id} : F \hookrightarrow \overline{F}$  אפשר להמשיך ל- $F(\beta)$  ב- $[F(\beta) : F]_s < [F(\beta) : F]$  דרכים, וכל המשכה כזו ניתן להמשיך ל- $K$  בכלל היותר  $[K : F(\beta)]_s < [K : F(\beta)]$  דרכים. אלו כל ההמשכות של  $\text{id} : F \hookrightarrow \overline{F}$  לשיכון  $\overline{F}$  של  $K$ , מטיעון דומה להוכחת המסקנה הקודמת. לכן כמות ההמשכות היא לכל היותר

$$[K : F]_s \leq [K : F(\beta)]_s \cdot [F(\beta) : F]_s < [K : F(\beta)] \cdot [F(\beta) : F] = [K : F]$$

$\square$

בסתירה.

מסקנה 6.17. אם  $K/F$  ו- $L/K$  הרחבות סופיות וספרביליות, אז גם  $L/F$  ספרבילית.

## 7 תרגול שביעי

### 7.1 חבורת גלואה

7.1 הגדרה. אוטומורפיזם של הרחבת שדות  $K/F$  הוא אוטומורפיזם  $\varphi : K \rightarrow K$  המקבע את איברי  $F$ . כלומר  $\varphi(a) = a$  לכל  $a \in F$ . באופן שקול, זו העתקה לינארית של מרחבים וקטוריים מעל  $F$ .

7.2 דוגמה. כל אנדומורפיזם  $\varphi \in \text{End}(K)$  הוא אוטומורפיזם של הרחבה  $K$  מעל תת-השדה הראשוני של  $K$ .

7.3 הגדרה. תהי  $K/F$  הרחבת שדות. חבורת גלואה  $\text{Gal}(K/F)$  היא החבורה של כל האוטומורפיזמים של  $K/F$  עם פעולת ההרכבה. זו תת-חבורה של  $\text{Aut}(K)$ . סימונים נוספים עבור  $\text{Gal}(K/F)$  הם  $G_{K/F}$  ו- $\text{Aut}(K/F)$ .

הדבר המרכזי שנעשה בקורס הזה הוא (לנסות) ללמוד הרחבות שדות באמצעות חבורות גלואה.

**דוגמה 7.4.** תהי  $F/\mathbb{Q}$  הרחבת שדות. אז  $\text{Gal}(F/\mathbb{Q})$  היא למעשה  $\text{Aut}(F)$ , לפי דוגמה 7.2. למשל ראינו (כנראה בתורת החוגים) כי  $\text{Aut}(\mathbb{Q}(\sqrt{2})) \cong \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$  ולכן זו חבורת גלואה של ההרחבה  $\mathbb{Q}(\sqrt{2})/\mathbb{Q}$ .

באופן דומה  $\text{Gal}(\mathbb{R}/\mathbb{Q}) = \{\text{id}\}$  כי כל אוטומורפיזם של  $\mathbb{R}$  מעביר מספר חיובי למספר חיובי (כי  $\varphi(a^2) = \varphi(a)^2$ ), ומכאן שהוא שומר על יחס הסדר ב- $\mathbb{R}$ . לכן כל אוטומורפיזם של  $\mathbb{R}$  הוא העתקת הזהות.

**תרגיל 7.5** (בהרצאה). יהי  $\sigma \in \text{Gal}(K/F)$  ויהי  $f(x) \in F[x]$ . הוכיחו שלכל שורש  $a \in K$  של  $f$ , גם  $\sigma(a)$  הוא שורש.

## 7.2 מבוא לחישוב חבורות גלואה

**תרגיל 7.6.** חשבו את  $\text{Gal}(\mathbb{Q}(\sqrt{2}, \sqrt{3})/\mathbb{Q})$ .

**תרגיל 7.7.** חשבו את  $\text{Gal}(\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})/\mathbb{Q})$ .

**תרגיל 7.8.** חשבו את  $\text{Gal}(\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}\rho)/\mathbb{Q})$  כאשר  $\rho$  הוא שורש יחידה פרימיטיבי מסדר 3.

**תרגיל 7.9.** חשבו את  $\text{Gal}(\mathbb{Q}(\sqrt[4]{2})/\mathbb{Q}(\sqrt{2}))$ .

כמו שניתן לראות, אפילו בדוגמאות פשוטות לא ממש קל לראות מה היא חבורת גלואה. אנחנו צריכים כלים יותר מתוחכמים. נתחיל ממה ששכר הוכחנו: לפי תרגיל 5.12 אם  $g(x) \in F[x]$  פולינום אי פריק עם שדה פיצול  $E$  ו- $a, b$  הם שני שורשים של  $g(x)$ , אז יש איזומורפיזם  $f: E \rightarrow E$  שמקבע את איברי  $F$  ומקיים  $f(a) = b$ . בשפה עדכנית קיים  $\varphi \in \text{Gal}(E/F)$  כך ש- $\varphi(a) = b$ .

עם הטענה הזאת אפשר לפשט את הפתרון של השאלה הקודמת, מפני ש- $\mathbb{Q}(\sqrt[4]{2})$  הוא שדה הפיצול של  $x^2 - \sqrt{2}$ . היינו יכולים לדעת מייד שקיים  $\varphi$  כך ש- $\varphi(\sqrt[4]{2}) = -\sqrt[4]{2}$  ולא היה צריך להתאמץ בשביל זה.

אזהרה! שימו לב שמשפט זה (ועוד אחרים שנראה) עובדים רק עבור חבורת גלואה של שדה פיצול. בדוגמה בחישוב  $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})/\mathbb{Q}$  אין  $\varphi$  כך ש- $\varphi(\sqrt[3]{2}) = \sqrt[3]{2}\rho$ , ובאמת  $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})$  אינו שדה הפיצול של  $x^3 - 2$  (בהמשך הקורס נוכיח שהוא לא שדה פיצול של שום פולינום). כלי מועיל נוסף הוא המשפט הבא:

**תרגיל 7.10.** יהי  $f(x) \in F[x]$  פולינום עם שדה פיצול  $E$ . נניח שהשורשים של  $f$  ב- $E$  הם  $a_1, \dots, a_n$ . הוכיחו כי  $\text{Gal}(E/F)$  משוכנת בתוך  $S_n$ .

הערה 7.11. את הטענה האחרונה אפשר לנסח גם בצורה הבאה: חבורת גלואה פועלת על קבוצת השורשים של  $f(x)$ . כל פעולה של חבורה על קבוצה מגדירה הומומורפיזם לחבורה סימטרית. הפעולה נאמנה ולכן מדובר בשיכון.

אם ל- $f(x)$  יש פירוק  $f = f_1 f_2 \dots f_r$  ונסמן  $K = F[\alpha_1, \dots, \alpha_n]$  כאשר  $\alpha_i$  הם כל השורשים של  $f(x)$ . כל אוטומורפיזם  $\sigma \in \text{Gal}(K/F)$  משרה תמורה על השורשים ויש שיכון

$$\text{Gal}(K/F) \hookrightarrow S_{\deg f_1} \times S_{\deg f_2} \times \dots \times S_{\deg f_r}$$

עכשיו נתחיל להשתמש בכלים שראינו ונפתור מקרה יותר מסובך.

**תרגיל 7.12.** חשבו את  $\text{Gal}(E/\mathbb{Q})$  כאשר  $E$  הוא שדה הפיצול של הפולינום  $x^3 - 2$ .