

# Algebra 2R

a voyage into the unknown

koteczek

~

# Spis treści

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Teoria równań algebraicznych</b>  | <b>4</b>  |
| 1.1 Rozwiązywanie układów równań . . . . .                                     | 4         |
| 1.2 Rozszerzanie ciał . . . . .  | 6         |
| <b>Ciała skończone i pierwiastki z jednościami</b>                             | <b>9</b>  |
| 2.1 Algebraiczne domknięcie ciała . . . . .                                    | 10        |
| <b>Ciała proste, pierwiastki z jednościami</b>                                 | <b>12</b> |
| 3.1 Ciała proste . . . . .   | 12        |
| 3.2 Pierwiastki z jednościami . . . . .  | 12        |
| 3.3 Ciała skończone . . . . .  | 14        |
| <b>Rozszerzenia ciał</b>   | <b>15</b> |
| 4.1 Wymiar przestrzeni liniowej . . . . .                                      | 15        |
| <b>Wielomiany koła, domknięcia algebraiczne</b>                                | <b>20</b> |
| 5.1 Wielomian rozkładu koła [cyclotomic polynomials] . . . . .                 | 20        |
| 5.2 Domknięcia algebraiczne . . . . .  | 23        |
| <b>Wstęp do teorii Galois</b>  | <b>26</b> |
| 6.1 Grupy Galois . . . . .   | 26        |
| 6.2 Rozszerzenia algebraiczne normalne . . . . .                               | 26        |
| 6.3 Rozszerzenia rozdzielcze . . . . .   | 28        |
| <b>Rozszerzenia radykalne (czysty Bangladesz)</b>                              | <b>31</b> |
| 7.1 Stopień rozdzielczy, radykalny ciała . . . . .                             | 33        |
| <b>Przekształcenia liniowe</b>   | <b>35</b> |
| 8.1 Norma, ślad . . . . .  | 35        |
| 8.2 Rozszerzenia Galois . . . . .  | 36        |
| <b>Rozszerzenia abelowe</b>  | <b>39</b> |
| 9.1 Rozszerzenia abelowe . . . . .   | 39        |
| 9.2 Rozwiązywalne rozszerzenia ciał i rozszerzenia przez pierwiastki . . . . . | 40        |
| <b>Rozszerzenia przestępne ciał</b>  | <b>45</b> |
| 10.1 Własności . . . . .   | 45        |
| <b>Moduły</b>  | <b>47</b> |
| 10.1 Moduły wprowadzenie . . . . .   | 47        |
| 10.2 Cel: zrozumieć moduły . . . . .   | 49        |
| 11.3 Suma prosta modułów . . . . .   | 50        |
| 11.4 Baza modułu . . . . .   | 50        |
| 11.5 Moduły projektywne, cykliczne, torsyjne . . . . .                         | 54        |
| 11.6 Moduły skończenie generowane . . . . .                                    | 55        |
| <b>Iloczyn tensorowy modułów</b>   | <b>57</b> |
| 11.1 Funkcja dwuliniowa . . . . .  | 57        |
| 12.2 Konstrukcja produktu tensorowego . . . . .                                | 57        |
| <b>Własności produktu tensorowego</b>  | <b>60</b> |



# Wykład 1: Teoria równań algebraicznych

Przez  $R, S$  będziemy oznaczać pierścienie przemienne z  $1 \neq 0$ , natomiast  $K, L$  będziemy rezerwować dla oznaczeń ciał.

## 1.1 Rozwiązanie układów równań

Rozważmy funkcje  $f_1, \dots, f_m \in R[X_1, \dots, X_n]$ . Dla wygody będziemy oznaczać krotki przez  $\bar{X}$ , czyli  $R[X_1, \dots, X_n] = R[\bar{X}]$ . Pojawia się problem: czy istnieje rozszerzenie pierścienia z jednością  $R \subseteq S$  takie, że układ  $U : f_1(\bar{X}) = \dots = f_m(\bar{X}) = 0$  ma rozwiązanie w pierścieniu  $S$ ?

**Fakt 1.1.**  $\bar{a} = (a_1, \dots, a_n) \subseteq S$ , gdzie  $S$  jest rozszerzeniem pierścienia  $R$ , jest rozwiązaniem układu równań  $U \iff g(\bar{a}) = 0$  dla każdego wielomianu  $g \in (f_1, \dots, f_m) \triangleleft R[\bar{X}]$ .

**Dowód.**  $\Leftarrow$  Implikacja jest dość trywialna, jeśli każdy wielomian z  $(f_1, \dots, f_m)$ , czyli wytworzony za pomocą sumy i produktu wielomianów  $f_1, \dots, f_m$  zeruje się na  $\bar{a}$ , to musi zerować się też na każdym z tych wielomianów.

$\Rightarrow$  Rozważamy dwa przypadki:

1.  $(f_1, \dots, f_m) \ni b \neq 0$  i  $b \in R$ .

To znaczy w  $(f_1, \dots, f_m)$  mamy pewien niezerowy wyraz wolny. Wtedy mamy wielomian  $g \in (f_1, \dots, f_m)$  taki, że  $g(\bar{a}) \neq 0$ . Ale przecież  $g$  jest kombinacją wielomianów  $f_1, \dots, f_m$ , która na  $\bar{a}$  przyjmuje wartość 0. W takim razie dostajemy układ sprzeczny i przypadek jest do odrzucenia.

2.  $(f_1, \dots, f_m) \cap R = \{0\}$ . (nie ma wyrazów wolnych różnych od 0)

Teraz wiemy, że układ  $U$  jest niesprzeczny, a więc możemy skonstruować pierścień z 1  $S$  będący rozszerzeniem  $R$  [ $S \supseteq R$ ] oraz rozwiązanie  $\bar{a} \subseteq S$  spełniające nasz układ równań.

Niech  $S = R[\bar{X}]/(f_1, \dots, f_m)$  i rozważmy

$$j : R[\bar{X}] \rightarrow S = R[\bar{X}]/(f_1, \dots, f_m)$$

nazywane przekształceniem ilorazowym. Po pierwsze, zauważmy, że  $j \upharpoonright R$  jest 1-1, bo

$$\ker(j \upharpoonright R) = \ker(j) \cap R = (f_1, \dots, f_m) \cap R = \{0\}$$

i dlatego

$$j \upharpoonright R : R \xrightarrow{\cong} j[R] \subseteq S.$$

Z uwagi na ten izomorfizm, będziemy utożsamiać  $R, j[R]$ . W takim razie,  $S$  jest rozszerzeniem pierścienia  $R$ . Czyli mamy rozszerzenie pierścienia  $R$ .

Niech

$$\bar{a} = (a_1, \dots, a_n) = (j(X_1), \dots, j(X_n)) \subseteq S,$$

czyli jako potencjalne rozwiązanie rozważamy zbiór obrazów wielomianów stopnia 1 przez wcześniej zdefiniowaną funkcję  $j : R[\bar{X}] \rightarrow S$ . Tak zdefiniowane  $\bar{a}$  jest rozwiązaniem układu  $U$  w pierścieniu  $S$ , bo dla funkcji wielomianowej (czyli zapisywalnej jako wielomian)  $\hat{f}_i \in (f_1, \dots, f_m)$  mamy

$$\hat{f}_i(\bar{a}) = \hat{f}_i(j(X_1), \dots, j(X_n)) = j(\hat{f}_i(X_1, \dots, X_n)) = j(f_i) = 0.$$

**TUTAJ TRZEBA POUZASADNIAĆ KILKA RÓWNOŚCI, ALE MOŻE NIE BĘDĘ TEGO ROBIŁA NA AISD** ☕

**Uwaga 1.2.** Skonstruowane powyżej rozwiązanie  $\bar{a}$  układu  $U$  ma następującą własność uniwersalności:

(☞) Jeżeli  $S' \supseteq R$  jest rozszerzeniem pierścienia z 1 i  $\bar{a}' = (a'_1, \dots, a'_n) \subseteq S'$  jest rozwiązaniem  $U$  w  $S'$ , to istnieje jedyny homomorfizm

$$h : R[\bar{a}] \rightarrow R[\bar{a}']$$

taki, że  $h \upharpoonright R$  jest identycznością na  $R$  i  $h(\bar{a}) = \bar{a}'$ . Wszystkie rozwiązania układów są homomorficzne.

$$\begin{array}{ccc}
 R & \xrightarrow{\subseteq} & R[\bar{a}] \subseteq S \\
 \downarrow \subseteq & \nearrow h & \\
 R[\bar{a}'] \subseteq S' & & 
 \end{array}$$

Tutaj  $R[\bar{a}] \subseteq S$  jest **podpierścieniem generowanym przez  $R \cup \{\bar{a}\}$** , czyli zbiór:

$$R[\bar{a}] = \{f(\bar{a}) : f(\bar{X}) \in R[\bar{X}]\} \subseteq S$$

**Dowód.** Niech  $I = \{g \in R[\bar{X}] : g(\bar{a}') = 0\} \subseteq S'$ . Oczywiście mamy, że  $I \triangleleft R[\bar{X}]$ , a więc

$$(f_1, \dots, f_m) \subseteq I.$$

Z twierdzenia o faktoryzacji wie

$$\begin{array}{ccc}
 R[\bar{X}] & \xrightarrow{j} & S = R[\bar{X}]/(f_1, \dots, f_m) \\
 \downarrow \phi & \nearrow (\exists ! h) h(\bar{a}) = \bar{a}' & \\
 S' \supseteq R[\bar{a}'] & & 
 \end{array}$$

Homomorfizm  $\phi : R[\bar{X}] \rightarrow R[\bar{a}']$  określamy wzorem

$$\phi(w) = w(\bar{a}),$$

a homomorfizm  $j$  jest jak wyżej odwzorowaniem ilorazowym. Widzimy, że

$$I = \ker(\phi)$$

$$\ker(j) = (f_1, \dots, f_m).$$

Z twierdzenia o homomorfizmie pierścieni dostajemy jedyny homomorfizm

$$h : R[\bar{X}]/(f_1, \dots, f_m) \rightarrow R[\bar{a}]$$

taki, że  $h(\bar{a}) = \bar{a}'$ .



**Uwaga 1.3.** Jeśli  $I = (f_1, \dots, f_m)$ , to  $h : R[\bar{a}] \xrightarrow{\cong} R[\bar{a}']$ .

Wtedy mamy  $\ker \phi = \ker j$ , czyli  $\ker(h \circ j) = \ker \phi = \ker j$ , no a z tego wynika, że  $\ker h$  jest trywialne, czyli  $h$  jest apimorfizmem (1-1). Z drugiej strony,  $\text{Im } \phi = \text{Im}(h \circ j)$ , a  $\phi$  jest epimorfizmem ("na"), więc również  $h$  musi być "na".

Założmy, że  $S \supseteq R$  jest rozszerzeniem pierścienia oraz  $\bar{a} \in S^n$ . Wtedy:

1. ideał  $\bar{a}$  nad  $R$  definiujemy jako

$$I(\bar{a}/R) = \{g \in R[\bar{X}] : g(\bar{a}) = 0\}$$



2.  $\bar{a}$  nazywamy **rozwiązaniem ogólnym** układu  $U$ , jeśli ideał

$$I(\bar{a}/R) = (f_1, \dots, f_m).$$

**Uwaga 1.4.** W sytuacji jak z definicji wyżej, gdy  $U$  jest układem niesprzecznym, wtedy  $\bar{a}$  jest rozwiązaniem ogólnym układu  $U \iff$  zachodzi warunek (☺) .

**Dowód.** Ćwiczenia. ☕

## 1.2 Rozszerzanie ciał

Dla  $K \subseteq L$  ciał i  $\bar{a} \subseteq L$  definiujemy **ideał  $\bar{a}$  nad  $K$**  jako:

$$I(\bar{a}/L) := \{f(X_1, \dots, X_n) \in K[\bar{X}] : f(\bar{a}) = 0\},$$

to znaczy generujemy ideał w wielomianach nad  $K$  zawierający wszystkie wielomiany (niekoniecznie tylko jednej zmiennej) zerujące się w  $\bar{a}$ .

**Przykład:**

Dla  $K = \mathbb{Q}, L = \mathbb{R}, n = 1, a_1 = \sqrt{2}$  mamy

$$I(\sqrt{2}/\mathbb{Q}) = \{f(x^2 - 2) : f \in \mathbb{Q}[X]\} = (x^2 - 2) \triangleleft \mathbb{Q}[X]$$

Dalej, definiujemy

$$K[\bar{a}] := \{f(\bar{a}) : f \in K[\bar{X}]\}$$

czyli **podpierścień  $L$  generowany przez  $K \cup \{\bar{a}\}$**  oraz  **$K(\bar{a})$ , czyli podciało  $L$  generowane przez  $K \cup \{\bar{a}\}$ :**

$$K(\bar{a}) := \{f(\bar{a}) : f \in K(X_1, \dots, X_n) \text{ i } f(\bar{a}) \text{ dobrze określone}\}.$$

Tutaj  $K(X_1, \dots, X_n)$  to **ciało ułamków pierścienia**  $K[\bar{a}]$  w ciele  $L$  (czyli najmniejsze ciało, że pierścień może być w nim zanurzony). Czasami oznaczamy to przez  $K[\bar{a}]_0$ .

**Uwaga 1.5.** Niech  $K \subseteq L_1, K \subseteq L_2$  będą ciałami. Wybieramy  $\bar{a}_1 \in L_1$  i  $\bar{a}_2 \in L_2$ ,  $|\bar{a}_1| = |\bar{a}_2| = n$ . Wtedy następujące warunki są równoważne:

1. istnieje izomorfizm  $\phi : K[\bar{a}_1] \rightarrow K[\bar{a}_2]$  taki, że  $\phi \upharpoonright K = \text{id}_K$  oraz  $\phi(\bar{a}_1) = \bar{a}_2$ .
2.  $I(\bar{a}_1/K) = I(\bar{a}_2/K)$ .

**Dowód.**

1  $\implies$  2

Implikacja jest jasna, bo dla  $g(\bar{X}) \in K[\bar{X}]$  mamy  $g(\bar{a}_1) = 0$  w  $K[\bar{a}_1] \iff g(\phi(\bar{a}_1)) = 0$ , a  $\phi(\bar{a}_1) = \bar{a}_2$ , czyli  $g(\bar{a}_2) = 0$ . Stąd  $g \in I(\bar{a}_1/K) \iff g \in I(\bar{a}_2/K)$ .

1  $\impliedby$  2

Zwróćmy uwagę na odwzorowanie ewaluacji  $\bar{a}_1$

$$\phi_{\bar{a}_1} : K[\bar{X}] \xrightarrow{\text{"na"}} K[\bar{a}_1]$$

zadane wzorem

$$\phi(w(\bar{X})) = w(\bar{a}_1).$$

Mamy

$$\ker(\phi_{\bar{a}_1}) = I(\bar{a}_1/K).$$

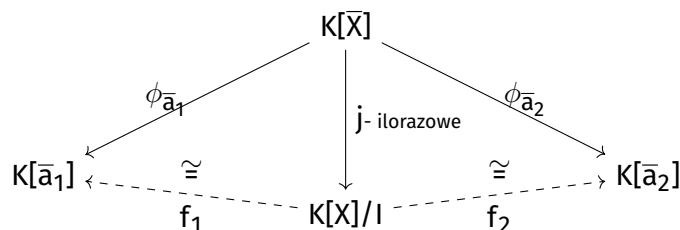
Tak samo dla  $\bar{a}_2$  możemy określić analogicznie odwzorowanie ewaluacyjne  $\phi_{\bar{a}_2} : K[\bar{X}] \rightarrow K[\bar{a}_2]$ . Wtedy

$$I(\bar{a}_2/K) = \ker(\phi_{\bar{a}_2}),$$

ale ponieważ  $I(\bar{a}_1/K) = I(\bar{a}_2/K)$ , to  $\ker(\phi_{\bar{a}_1}) = \ker(\phi_{\bar{a}_2})$ . Oznaczmy  $I = I(\bar{a}_1/K) = I(\bar{a}_2/K)$ . Widzimy, że  $\phi_{\bar{a}_i} \upharpoonright K = \text{id}_K$  (wielomiany mające tylko wyraz stały nie zmieniają wartości po podstawieniu  $x$ ).

Z twierdzenia o izomorfizmie wiemy, że istnieją izomorfizmy

$$f_i : K[\bar{X}]/\ker(\phi_{\bar{a}_i}) = K[\bar{X}]/I(\bar{a}_i/K) = K[\bar{X}]/I \xrightarrow{\cong} \text{Im}(\phi_{\bar{a}_i}) = K[\bar{a}_i]$$



Niech  $f = f_2 f_1^{-1} : K[\bar{a}_1] \rightarrow K[\bar{a}_2]$ . Jako złożenie dwóch izomorfizmów  $f$  również jest izomorfizmem. Pozostaje sprawdzić, czy  $f(\bar{a}_1) = \bar{a}_2$ .

$f(\bar{a}_1) = f_2(f_1^{-1}(\bar{a}_1))$  i zauważmy, że  $f_1^{-1}(\bar{a}_1) = w(\bar{X}) \in K[\bar{X}]/I$ , gdzie  $w(\bar{X}) = \bar{X}$ . Idąc po kolei wynika to z tego, że  $f_1 \circ j = \phi_{\bar{a}_1}$ .

Gdy włożymy w lewą stronę  $w(\bar{X}) = \bar{X}$  dostajemy  $f_1 \circ j(w) = f_1(\bar{X})$  (gdy oczywiście  $\bar{a}_1 \neq 0$ ), a z kolei po włożeniu tego do prawej strony wychodzi  $\phi_{\bar{a}_1}(w) = w(\bar{a}_1) = \bar{a}_1$  i mamy, że  $f_1(w) = \bar{a}_1 \implies f_1^{-1}(\bar{a}_1) = w$ .

$$f(\bar{a}_1) = f_2(f_1^{-1}(\bar{a}_1)) = f_2(w) = w(\bar{a}_2) = \bar{a}_2$$



**Uwaga.** Niech  $I \triangleleft K[\bar{X}]$  *noetherowskiego* pierścienia  $K[\bar{X}]$ . Niech  $I = (f_1, \dots, f_m)$  dla pewnych  $f_i \in K[\bar{X}]$ . Wtedy istnieje rozszerzenie pierścienia  $S \supseteq K$  oraz  $\bar{a} \subseteq S$  - rozwiązanie ogólne układu  $f_1(\bar{X}) = \dots = f_m(\bar{X}) = 0$  takie, że  $I(\bar{a}/K) = I$ .

**Dowód.** Uwaga 1.4.



**Twierdzenie 1.6.** Niech  $I \triangleleft K[\bar{X}]$ . Wtedy istnieje ciało  $L \supseteq K$  oraz  $\bar{a} = (a_1, \dots, a_n) \subseteq L$  takie, że  $f(\bar{a}) = 0$  dla każdego  $f \in I$ .

**Dowód.** Niech  $I \subseteq M \triangleleft K[\bar{X}]$  będzie ideałem maksymalnym. Niech  $L = K[\bar{X}]/M$  i określmy przekształcenie ilorazowe

$$j : K[\bar{X}]/M \rightarrow L = K[\bar{X}]/M.$$

Ponieważ  $M \cap K = \{0\}$  (bo inaczej w ideale byłby wielomian odwracalny), to  $j \upharpoonright K : K \rightarrow L$  jest funkcją 1-1, czyli

$$j \upharpoonright K : K \xrightarrow{1-1} j[K] \subseteq L.$$

Możemy utożsamić  $K$  z  $j[K]$ , czyli  $K \subseteq L$ . Niech  $\bar{a} = (a_1, \dots, a_n)$  takie, że dla każdego  $i \in [n]$

$$a_i = j(x_i) \in L.$$

Wtedy  $g(\bar{a}) = 0$  dla każdego  $g(\bar{X}) \in M \supseteq I$  (bo inaczej mielibyśmy wyrazy wolne).



**Wniosek 1.7.** Niech  $f \in K[X]$  stopnia  $> 0$ . Wtedy istnieje ciało  $L \supseteq K$  rozszerzające ciało  $K$  takie, że  $f$  ma pierwiastek w ciele  $L$ .

**Przykłady:**

1. Rozpatrzmy ciało  $K = \mathbb{Q}$  i  $f(X) = X - 2$ . Wtedy  $I = (f) \triangleleft \mathbb{Q}[X]$  jest ideałem maksymalnym, bo jest on pierwszy (w tym wypadku nierozkładalny). Równanie  $f = 0$  ma rozwiązanie ogólne w pierścieniu ilorazowym

$$\mathbb{Q}[X]/I \cong \mathbb{Q}.$$

Czyli nie zawsze musimy rozszerzać ciało do czegoś nowego.

2.  $\mathbb{C} = \mathbb{R}[i] = \mathbb{R}(i) = \mathbb{R}[z]$  dla każdego  $z \in \mathbb{C} \setminus \mathbb{R}$ , co jest na liście zadań.

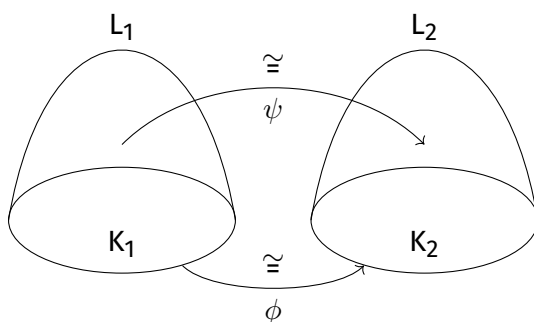
Założmy, że  $K \subseteq L_1, K \subseteq L_2$  są rozszerzeniami ciała. Wtedy mówimy, że  $L_1$  **jest izomorficzne z  $L_2$  nad  $K$**  [ $L_1 \cong_K L_2$ ]  $\iff$  istnieje izomorfizm  $f : L_1 \rightarrow L_2$  taki, że  $f|_K = \text{id}_K$ .

### Fakt 1.8.

1. Załóżmy, że  $f(X) \in K[X]$  jest nierozkładalny. Niech  $L_1 = K(a_1), L_2 = K(a_2)$  i  $f(a_i) = 0$  w  $L_i$ . Wtedy  $L_1 \cong_K L_2$ .
2. Ogólniej: założmy, że  $\phi : K_1 \rightarrow K_2$  jest izomorfizmem i  $f_1 \in K_1[X], f_2 \in K_2[X], \phi(f_1) = f_2, f_i$  jest nierozkładalne. Dodatkowo założmy, że  $L_1 = K_1(a_1)$  i  $L_2 = K_2(a_2)$ , gdzie  $f_i(a_i) = 0$  w  $L_i$ . Wtedy istnieje izomorfizm  $\psi \in \psi : L_1 \rightarrow L_2$  taki, że  $\psi(a_1) = a_2$ .

### Dowód.

1.  $I(a_1/K) = (f) = I(a_2/K)$ , stąd na mocy 1.5 mamy  $K(a_1) \cong_K K(a_2)$ . Po dowodzie przypadku 2. możemy uzasadnić, że jest to szczególny przypadek tego ogólniejszego stwierdzenia właśnie.
2. Zaczniemy od rozrysowania tej sytuacji:



Izomorfizm  $\phi : K_1[X] \xrightarrow{\cong} K_2[X]$  indukuje nam przekształcenie

$$K_1[X]/(f_1) \xrightarrow[\phi]{\cong} K_2[X]/(f_2),$$

bo  $\phi(f_1) = f_2$ . Wiemy, że  $f_i$  jest nierozkładalne, czyli

$$I(a_i/K_i) = (f_i) \triangleleft K_i[X]$$

jest ideałem maksymalnym. Mamy

$$L_i = K_i(a_i) = K_i[a_i] \cong K[X]/I(a_i/K_i).$$

$$\begin{array}{ccc}
 K_1[X] & \xrightarrow[\phi]{\cong} & K_2[X] \\
 \downarrow & & \downarrow \\
 K_1[X]/(f_1) & \xrightarrow[\phi]{\cong} & K_2[X]/(f_2) \\
 \cong \downarrow h_1 & & \cong \downarrow h_2 \\
 L_1 = K_1(a_1) & \xrightarrow[\psi]{\cong} & L_2 = K_2(a_2) \\
 \cup & & \cup \\
 K_1 & \xrightarrow{\phi} & K_2
 \end{array}$$





## Wykład 2: Ciała skończone i pierwiastki z jedności

Ciało  $L \supseteq K$  nazywamy **ciałem rozkładu nad  $K$**  wielomianu  $f \in K[X]$ , gdy spełnione są warunki:

1.  $f$  rozkłada się w pierścieniu  $L[X]$  na czynniki liniowe (stopnia 1)
2. Ciało  $L$  jest rozszerzeniem ciała  $K$  o elementy  $a_1, \dots, a_n$ , gdzie  $a_1, \dots, a_n$  to wszystkie pierwiastki  $f$  w  $L$ .

**Przykład:** Jeżeli  $\deg(f) = 0$ , to nie istnieje ciało rozkładu  $f$ .

**Wniosek 2.1.** Załóżmy, że  $f \in K[X]$  jest wielomianem stopnia  $> 0$ . Wtedy

1. istnieje  $L$ : ciało rozkładu  $f$  nad  $K$ ,
2. to ciało jest jedyne z dokładnością do izomorfizmu nad  $K$ .

**Dowód.**

1. Dowód przez indukcję względem stopnia  $f$

Jako przypadek bazowy rozważmy  $f$  takie, że  $\deg(f) = 1$ . Wtedy  $L = K$  i wszystko wniosek jest spełniony.

Założmy teraz, że stopień wielomianu  $f$  jest  $> 1$  i też zachodzi dla wszystkich wielomianów stopnia  $< \deg(f)$  i wszystkich ciał  $K'$ . Teraz z 1.7 wiemy, że istnieje rozszerzenie ciała  $L \supseteq K$  takie, że  $f$  ma pierwiastek w  $L$ . Nazwijmy ten pierwiastek  $a_0$  i niech

$$K' = K(a_0).$$

Ponieważ  $K'[X]$  wielomian  $f$  ma pierwiastek  $a_0$ , to możemy zapisać

$$f = (x - a_0)f_1$$

dla pewnego  $f_1 \in K'[X]$  i  $\deg(f_1) < \deg(f)$ . Z założenia indukcyjnego dla  $f_1$  istnieje  $L' = K'(a_1, \dots, a_r)$  - ciało rozkładu wielomianu  $f_1$  nad  $K'$ . Wtedy

$$L = K(a_0, \dots, a_r)$$

jest ciałem rozkładu  $f$  nad  $K$ .

2. Udowodnimy wersję ogólniejszą:

(\*) Jeśli  $\phi : K_1 \xrightarrow{\cong} K_2$  jest izomorfizmem nad ciałem i  $f_i \in K_i[X]$  jest wielomianem stopnia  $> 0$ ,  $\phi(f_1) = f_2$ , to wtedy istnieje  $\psi : L_1 \xrightarrow{\cong} L_2$  izomorfizm nad ciałami rozkładu  $f_i$  w  $K_i$  rozszerzający izomorfizm  $\phi$  (to znaczy  $\phi \subseteq \psi$ ).

Wykorzystamy indukcję po  $\deg(f)$ . W przypadku bazowym mamy  $\deg(f) = 1$ , czyli  $L_1 = K_1, L_2 = K_2$  i  $\phi = \psi$ .

Teraz niech  $\deg(f) > 1$  i założmy, że dla wszystkich ciał  $K'$  oraz wielomianów stopnia  $< \deg(f)$  jest to prawdą. Niech

$$f_i = f'_i \cdot g_i,$$

gdzie  $f'_i, g_i \in K_i[X]$  i  $g_i$  jest wielomianem nierozkładalnym w  $K$ . Wiemy już, że istnieje  $a_i \in L_i$  będące pierwiastkiem wielomianu  $g_i$ .

Z faktu 1.8:(2), wiemy, że istnieje wtedy izomorfizm

$$\psi_0 : K_1(a_1) \xrightarrow{\cong} K_2(a_2)$$

taki, że  $\psi_0(a_1) = a_2$  i  $\phi \subseteq \psi_0$ .

$$\begin{array}{ccc}
 K_1(a_1) & \xrightarrow[\exists \psi_0]{\cong} & K_2(a_2) \\
 \parallel & & \parallel \\
 K'_1 & & K'_2 \\
 \cap & & \cap \\
 L_1 & \xrightarrow[\exists \psi_1]{\cong} & L_2
 \end{array}$$

Z założenia wiemy, że  $L_1$  to ciało rozkładu  $f'_1$  nad  $K_1$ . W takim razie z założenia indukcyjnego istnieje izomorfizm

$$\psi_1 : L_1 \xrightarrow{\cong} L_2$$

taki, że  $\psi \subseteq \psi_0$  i to już jest koniec. ☕

**Wniosek 2.2.** Jeśli  $f_1 \in K_1[X]$  i  $f_2 \in K_2[X]$  są nierozkładalnymi wielomianami,  $\phi : K_1 \xrightarrow{\cong} K_2$  izomorfizmem i  $\phi(f_1) = f_2$ , a  $L_1, L_2$  to ciała rozkładu  $f_1, f_2$  odpowiednio nad  $K_1$  i  $K_2$ ,  $a_i \in L_i$  to pierwiastek  $f_i$ , to wtedy istnieje  $\psi : L_1 \xrightarrow{\cong} L_2$  takie, że  $\psi(a_1) = a_2$ .

**Dowód.** Wynika z dowodu stwierdzenia (☛). ☕

## 2.1 Algebraiczne domknięcie ciała

Ciało  $L$  jest **algebraicznie domknięte**  $\iff$  dla każdego  $f \in L[X]$  o stopniu  $> 0$  istnieje pierwiastek  $f$  w  $L$ . To znaczy każdy wielomian rozkłada się na czynniki liniowe nad  $L$ .

**Przykład:**

- $\mathbb{C}$  jest algebraicznie domknięte.
- $\mathbb{R}$  nie jest algebraicznie domknięte, gdyż  $x^2 + 1$  nie ma pierwiastka rzeczywistego.
- $\mathbb{Q}[i]$  nie jest algebraicznie domknięte, bo  $x^2 - 2$  nie ma pierwiastka.

**Twierdzenie 2.3.** Każde ciało  $K$  zawiera się w pewnym ciele algebraicznie domkniętym.

**Dowód.** Jak mamy wielomian nad ciałem, to istnieje rozszerzenie ciała do tego wielomianu. I dalej leci kombinatoryka.

**Lemat:** Dla każdego ciała  $K$  istnieje  $L \supseteq K$  takie, że  $(\forall f \in K[X])$  stopnia  $> 0$ ,  $f$  ma pierwiastek w  $L$ .

Rozważmy dobry porządek na zbiorze wielomianów z  $K[X]$  stopnia  $> 0$

$$\{f \in K[X] : \deg(f) > 0\} = \{f_\alpha : \alpha < \kappa\}.$$

Tutaj  $\alpha, \kappa$  to liczby porządkowe, niekoniecznie skończone. Skonstruujemy rosnący ciąg rozszerzeń ciał  $\{K_\alpha : \alpha < \kappa\}$  taki, że

- $K \subseteq K_\alpha \subseteq K_\beta$  dla  $\alpha < \beta < \kappa$
- $f_\alpha$  ma pierwiastek w  $K_{\alpha+1}$ .

Dowód przez indukcję pozaskończoną. Dla  $K_0 = K$ .

Założmy, że  $\alpha < \kappa$  i mamy  $\{K_\beta : \beta < \alpha\}$  spełniając warunki powyżej. Niech  $K' = \bigcup_{\beta < \alpha} K_\beta$ . Musimy pokazać, że  $K'$  jest ciałem.

1.  $\alpha$  to liczba graniczna. Definiujemy  $K' = \bigcup_{\beta < \alpha} K_\beta$  jako zbiór.

Musimy określić działania w  $K'$ . Niech  $x, y \in K'$ , wtedy istnieje  $\beta < \alpha$  takie, że  $x, y \in K_\beta$ . Czyli  $x + y \in K_\beta \subseteq K'$  i  $xy \in K_\beta \subseteq K'$ . W takim razie  $K'$  jest rozszerzeniem ciała  $K_\beta$ .

Teraz definiujemy  $K_\alpha = K'$  i otrzymujemy pożądane rozszerzenie ciała.

2.  $\alpha = \beta + 1$  to następnik, wtedy  $K' = K_\beta$ .

Wielomian  $f_\alpha$  jest wielomianem nad  $K \subseteq K'$ . Z wniosku 1.7 wiemy, że istnieje rozszerzenie  $K_\alpha \supseteq K$  takie, że  $f_\alpha$  ma pierwiastek w  $K_\alpha$ .

$L$  definiujemy jako sumę po wyżej udowodnionej konstrukcji:

$$L = \bigcup_{\alpha < \kappa} K_\alpha$$

i to ciało spełnia nasz lemat.

Wracamy teraz do dowodu twierdzenia 2.3 i niech  $(L_n, n < \omega)$  będzie rosnącym ciągiem ciał takim, że

- $L_0 = K$
- $L_{n+1} \supseteq L_n$ , gdzie  $L_{n+1}$  dane jest przez lemat, to znaczy  $(\forall f \in L_n[X])$   $f$  ma pierwiastek w  $L_{n+1}$ .

Niech

$$L_\infty = \bigcup_{n < \omega} L_n \supseteq K.$$

Jest to ciało, ponieważ suma rosnącego ciągu ciał jest ciałem. Dalej mamy, że jest to ciało algebraicznie domknięte, gdy dowolny  $f \in L_\infty[X]$  ma stopień skończony  $> 0$ , czyli istnieje  $n$  takie, że  $f \in L_n[X]$ . A więc  $f$  ma wszystkie pierwiastki w  $L_{n+1} \subseteq L_\infty$ . ☕

## Wykład 3: Ciała proste, pierwiastki z jedności

### 3.1 Ciała proste

**Uwaga 3.0.** Załóżmy, że mamy ciała  $K \subseteq L$ . Wtedy

- $\text{char}(K) = \text{char}(L)$
- $0_K = 0_L$  oraz  $1_K = 1_L$
- $K^* = K \setminus \{0\} \subseteq L^* = L \setminus \{0\}$  oraz dla  $x \in K$   $-x$  w  $K$  jest równe  $-x$  w  $L$ .

$K$  jest **ciałem prostym** wtedy i tylko wtedy, gdy  $K$  nie zawiera żadnego właściwego podciała.

**Przykład:**

- $\mathbb{Q}$ , gdzie  $\text{char}(\mathbb{Q}) = 0$  to ciało proste nieskończone.
- Ciałem prostym skończonym jest na przykład  $\mathbb{Z}_p$  dla liczby pierwszej  $p$ , wtedy  $\text{char}(\mathbb{Z}_p) = p$ .

### Uwaga 3.1.

1. Każde ciało zawiera jedyne podciało proste
2. Z dokładnością do  $\cong \mathbb{Q}, \mathbb{Z}_p$  to wszystkie ciała proste.

**Przykład:** Załóżmy, że  $K$  jest skończone. Wtedy  $K^*$  też jest skończone rzędu  $|K^*| = n < \infty$ . Później dowiemy się, że  $|K| = p^k$ , a więc  $|K^*| = p^k - 1$ . Wiemy, że dla każdego  $x \in K^*$  zachodzi  $x^n = 1$ .

### 3.2 Pierwiastki z jedności

Niech  $R$  będzie pierścieniem przemiennym z  $1 \neq 0$ . Mamy następujące definicje:

1.  $a \in R$  jest **pierwiastkiem z 1** stopnia  $n > 0 \iff a^n = 1$
2.  $\mu_n(R) = \{a \in R : a^n = 1\}$  jest **grupą pierwiastków z 1** stopnia  $n$
3.  $\mu(R) = \{a \in R : (\exists n) a^n = 1\} = \bigcup_{n>0} \mu_n(R)$  jest **grupą pierwiastków z 1**
4.  $a$  jest **pierwiastkiem pierwotnym** [primitive root] stopnia  $n$  z 1  $\iff a \in \mu_n(R)$  oraz dla każdego  $k < n$   $a \notin \mu_k(R)$ .

### Uwaga 3.2.

1.  $\mu_n(R) \triangleleft R^*$  jest grupą jednostek pierścienia
2.  $\mu(R) \triangleleft R^*$
3.  $\mu(R)$  jest **torsyjną grupą abelową** (każdy element jest pierwiastkiem z 1).

**Przykłady**

1.  $\mu(\mathbb{C}) = \bigcup_{n>0} \mu_n(\mathbb{C}) \simeq (\{z \in \mathbb{C} : |z| = 1\}, \cdot) \triangleleft \mathbb{C}^* = \mathbb{C} \setminus \{0\}$  jest nieskończona.
2.  $\mu(\mathbb{C}) \cong (\mathbb{Q}, +) / (\mathbb{Z}, +)$ , bo  $f : \mathbb{Q} \xrightarrow[\text{homo}]{\text{"na"}} \mu(\mathbb{C})$  taki, że  $f(w) = \cos(w2\pi) + i \sin(w2\pi)$  ma jądro  $\ker(f) = \mathbb{Z}$ .
3.  $\mu(\mathbb{R}) = \{\pm 1\}$
4.  $\mu_n(K) = \{\text{zera wielomianu } x^n - 1\}$ . Ten wielomian będziemy oznaczali  $w_n(x) = x^n - 1$ .

### Uwaga 3.3.

1. Jeśli  $\text{char}(K) = 0$ , to  $w_n(x) = x^n - 1$  ma tylko pierwiastki jednokrotne w  $K$  [simple roots]
2. Jeśli  $\text{char}(K) = p > 0$  i  $n = p^l n_1$  takie, że  $p \nmid n_1$ , to wszystkie pierwiastki  $w_n(x) = x^n - 1$  mają krotność  $p^l$  w  $K$ .

**Dowód:**

1. Niech  $a \in K$  takie, że  $w_n(a) = 0$ . Z twierdzenia Bezouta mamy, że

$$w_n(x) = x^n - 1 = x^n - a^n = (x - a)(x^{n-1} + ax^{n-2} + \dots + a^{n-2}x + a^{n-1}) = (x - a)v_n(x),$$

gdzie  $v_n(x) = x^{n-1} + ax^{n-2} + \dots + a^{n-2}x + a^{n-1}$ .

Z tego, że  $\text{char}(K) = 0$  wynika, że  $v_n(a) = na^{n-1} \neq 0$ , skąd wynika, że  $a$  jest jednokrotnym pierwiastkiem  $w_n(x)$ .

2. Jesteśmy w ciele  $K$  o  $\text{char}(K) = p$ . Niech  $n = p^l n_1$ . Rozważmy wielomian

$$w_n(x) = x^n - 1 = (x^{n_1})^{p^l} - 1^{p^l} = (x^{n_1} - 1)^{p^l} = w_{n_1}(x)^{p^l}.$$

Czyli  $\mu_n(K) = \mu_{n_1}(K)$ . Załóżmy, że  $a \in K$  to pierwiastek wielomianu  $w_n(x)$ . Wtedy  $a$  jest też pierwiastkiem wielomianu  $w_{n_1}$  w ciele  $K$ . Wtedy

$$w_{n_1}(x) = (x - a)v_{n_1}(x),$$

$v_{n_1}$  jak w przypadku wyżej. Wówczas

$$v_{n_1}(a) = n_1 a^{n_1-1} \neq 0,$$

bo  $p \nmid n_1$ . Jeśli  $a$  jest 1-krotnym pierwiastkiem  $w_{n_1}(x)$ , to jest on  $p^l$ -krotnym pierwiastkiem  $w_n(x)$ .

**Twierdzenie 3.4.** Niech  $G < \mu(K)$  i  $G$  jest podgrupą skończoną o  $|G| = n$ . Wtedy

1.  $G = \mu_n(K)$
2.  $G$  jest cykliczna
3. Jeśli  $\text{char}(K) = p > 0$ , to  $p \nmid n$ .

**Dowód.**

1. Jeśli  $|G| = n$ , to dla każdego  $x \in G$  mamy  $x^n = 1$ . Z tego wynika, że  $G \subseteq \mu_n(K)$ , ale  $|\mu_n(K)| \leq n$ , czyli  $G = \mu_n(K)$ .
2. Chcemy pokazać, że dla wielomianu  $w_n(x)$  mamy  $n$  różnych pierwiastków. Wystarczy pokazać, że istnieje  $x \in G$  taki, że  $\text{ord}(x) = n$ .

Założmy nie wprost, że dla każdego  $x \in G$   $\text{ord}(x) < n$ . Niech

$$k = \max\{\text{ord}(x) : x \in G\}.$$

Niech  $x_0 \in G$  takie, że  $\text{ord}(x_0) = k$ . Wtedy

$$(\forall y \in G) \text{ord}(y) \mid k.$$

Gdyby tak nie było, to istniałby  $y \in G$ ,  $\text{ord}(y) \nmid k$ . Czyli istnieje liczba pierwsza  $p$  taka, że  $l$  jest podzielne przez wyższą potęgę  $p$  niż  $k$ . To oznacza, że  $l = p^\alpha l'$  i  $k = p^\beta k'$ , gdzie  $p \nmid l'$  i  $\alpha > \beta$ .

Rozważmy  $y' = y^{l'}$ . Skoro  $y$  ma rząd  $l$ , to  $\text{ord}(y') = p^\alpha$ , a dla  $x'_0 = x_0^{p^\beta}$  mamy  $\text{ord}(x'_0) = k'$ . Wobec tego  $\text{ord}(x'_0 y') = p^\alpha \cdot k'$ , ale to jest większe od  $k$  i dostajemy sprzeczność.

3. Wiemy, że wszystkie pierwiastki  $w_n = x^n - 1$  są jednokrotne, bo jest ich w tym przypadku dokładnie  $n$  (z poprzedniego punktu). Z uwagi 3.3, że jeśli  $n = p^l n_1$ , to pierwiastki wielomianu  $w_n(x)$  mają krotność  $p^l$ . Ale w tym przypadku pierwiastki mają krotność jeden, czyli  $p^l = 1$  i  $n = 1 \cdot n_1$ , gdzie  $p \nmid n_1$ .



**Wniosek 3.5.** Jeśli  $a \in \mu_n(K)$  jest pierwiastkiem pierwotnym z 1 stopnia  $n > 1$ , to  $a$  generuje  $\mu_n(K)$ .

**Dowód.**  $\mu_n(K) \supseteq \langle a \rangle = \mu_k(K)$  dla pewnego  $k \in \mathbb{N}$ . Ale ponieważ  $a$  było pierwiastkiem pierwotnym z 1, to musimy mieć  $n = k$ .



### 3.3 Ciała skończone

**Twierdzenie 3.6.** Niech  $K$  będzie ciałem skończonym. Wtedy

1.  $\text{char}(K) = p \implies |K| = p^n$  dla pewnego  $n \in \mathbb{N}$
2. Dla każdego  $n > 0$  istnieje dokładnie jedno ciało  $K$  takie, że  $|K| = p^n$  z dokładnością do izomorfizmu. Ciało mocy  $p^n$  będziemy oznaczać  $F(p^n)$ .

**Dowód.** 1. Skoro  $\text{char}(K) = p$ , to  $\mathbb{Z}_p \subseteq K$  jest najmniejszym podciałem prostym ciała  $K$ . W takim razie,  $K$  jest skończoną przestrzenią liniową nad  $\mathbb{Z}_p$ . Jeśli  $n = \dim_{\mathbb{Z}_p}(K)$ , to  $K$  jest izomorficzne z  $\mathbb{Z}_p^n$ , jako przestrzeń liniowa nad  $\mathbb{Z}_p$ . W takim razie  $|K| = p^n$ .

2.

*Istnienie:*

Niech  $n > 0$ . Rozważmy

$$w_{p^n-1}(x) = x^{p^n-1} \in \mathbb{Z}_p[X].$$

Niech  $L \supseteq \mathbb{Z}_p$  będzie ciałem rozkładu wielomianu  $w_{p^n-1}$ , a  $K = \{0\} \cup \{\text{pierwiastki } w_{p^n-1}\}$ . Wtedy

$$|K| = 1 + p^n - 1 = p^n,$$

czyli mamy potencjalne ciało rzędu  $p^n$ . Wystarczy więc pokazać, że  $K$  jest ciałem.

Niech  $f : L \xrightarrow{1-1} L$  będzie funkcją Frobeniusa  $x \mapsto x^p$ . Teraz niech  $f^n = f \circ \dots \circ f$ ,  $f^n(x) = x^{p^n}$ . Jest to monomorfizm, bo składamy ze sobą  $n$  takich samych funkcji  $1 - 1$ . Dla  $a \in L$  mamy

$$(a^{p^n-1} = 1 \vee a = 0) \iff a \in K.$$

Co więcej,  $a^{p^n-1} = 1 \iff a^{p^n} = a \iff f^n(a) = a$ , czyli  $K = \{a \in L : f^n(a) = a\}$  jest zbiorem punktów stałych morfizmu  $f^n$ , czyli jest ciałem, czego dowód jest pozostawiony na ćwiczenia.

*Jedyność K:*

Ciało  $K$  stworzone jak wyżej jest ciałem rozkładu  $w_{p^n-1}(x)$  nad  $\mathbb{Z}_p$ .

Załóżmy nie wprost, że  $K'$  to inne ciało mocy  $p^n$ . Bez straty ogólności  $\mathbb{Z}_p \subseteq K'$ . Niech  $x \in K'$ . wiemy, że  $x = 0$  lub  $x^{p^n-1} = 1$ . W takim razie  $w_{p^n-1}$  rozkłada się nad  $K'$  na czynniki liniowe. Zatem  $K'$  jest również ciałem rozkładu  $w_{p^n-1}$  nad  $\mathbb{Z}_p$ .

Z wniosku 2.1.(2) mamy, że dwa ciała rozkładu nad jednym wielomianem są izomorficzne i  $K \cong K'$  nad  $\mathbb{Z}_p$  i mamy sprzeczność. ☕



## Wykład 4: Rozszerzenia ciał

**Definicja 4.1.** Niech  $K \subseteq L$  będą ciałami i  $a \in L \setminus K$ .

- Jeżeli  $a$  jest algebraiczny nad  $K$ , to istnieje  $f \in K[X]$  stopnia  $> 0$  i  $f(a) = 0$
- $a$  jest przestępny nad  $K$  [transcendental]  $\iff a$  nie jest algebraiczny.
- **Rozszerzenie**  $L \supseteq K$  jest **algebraiczne**  $\iff$  dla każdego  $a \in L$   $a$  jest algebraiczny nad  $K$ .
- **Rozszerzenie jest przestępne**  $\iff$  nie jest algebraiczne.
- Niech  $a \in \mathbb{C}$ . Wtedy  $a$  jest algebraiczna, gdy  $a$  jest algebraiczna nad  $\mathbb{Q}$ .

**Przykłady:**

1. W  $\mathbb{C}$  na  $i$  jest pierwiastkiem algebraicznym wielomianu  $x^2 + 1$ , a  $\sqrt[n]{d}$  jest pierwiastkiem  $x^n - d$ .
2. Ciało  $F(p^n)$  ma charakterystykę  $p$  i  $F(p) \subseteq F(p^n)$  jest rozszerzeniem ciał, które jest algebraiczne. Dla dowolnego  $a \in F(p^n)$  to jest ono pierwiastkiem wielomianu  $X^{p^n} - X$ , czyli  $a$  jest algebraiczne nad  $F(p)$ .
3. Pierwiastki przestępne to na przykład  $e, \pi, e^\pi$ , aczkolwiek nie jesteśmy pewni tego ostatniego [doczytać w S. Lang, Algebra].
4. Rozważamy  $K \subseteq L = K(X)$ , czyli pierścień ułamków. Weźmy  $x \in K(X)$  - przestępny nad  $K$ . Założmy, że istnieje wielomian  $f \in K[X]$  różny od 0. I założmy, że  $0 = \widehat{f}(X)$  to funkcja wielomianowa.

$$0 = \widehat{f}(X) = f \neq 0$$

i jest to sprzeczność.

**Uwaga 4.2.** Niech  $a$  jak wyżej. Wtedy  $a$  jest algebraiczny nad  $K \iff I(a/K) \neq \{0\}$  jako ideał  $K[X]$ .

### 4.1 Wymiar przestrzeni liniowej

Niech  $K \subseteq L$  będzie rozszerzeniem ciała  $K$ . Wtedy  $L$  jest **przestrzenią liniową nad  $K$** . Definiujemy stopień rozszerzenia [coś innego jak indeks przy grupach]

$$[L : K] := \dim_K(L)$$

jako **wymiar przestrzeni liniowej** nad  $K$ .

**Uwaga 4.3.** Niech  $a \in L \setminus K$ . Następujące warunki są równoważne:

1.  $a$  jest algebraiczny nad  $K$
2.  $K[a] = K(a)$ , to znaczy  $K[a]$  jest ciałem (usuwanie niewymierności z mianownika)
3.  $[K(a) : K] = \dim_K(a) < \infty$

**Dowód.**  $1 \implies 2$

Wystarczy pokazać, że  $K[a]$  jest ciałem. Rozważamy  $I(a/K) \triangleleft K[X]$ . Wiemy, że  $K[X]$  jest PID, więc potrzebujemy, aby  $I(a/K)$  było ideałem pierwszym.

$$f \cdot g \in I(a/K) \iff 0 = \widehat{f \cdot g}(a)$$

gdzie daszek oznacza homomorfizm ewaluacji, który jest również homomorfizmem w punkcie. Czyli

$$\widehat{f \cdot g}(a) = \widehat{f}(a)\widehat{g}(a) = 0 \iff \widehat{f}(a) = 0 \vee \widehat{g}(a) = 0.$$

Czyli  $I(a/K)$  jest ideałem pierwszym w pierścieniu PID, więc jest ideałem maksymalnym. Mamy więc, że

$$K[a]/I(a/K)$$

jest ciałem, więc jest izomorficzne z  $K(a)$ , bo  $K[a]$  to najmniejszy pierścień generowany przez  $K \cup \{a\}$  (tutaj pierścień), a  $K(a)$  to najmniejsze ciało generowane przez  $K \cup \{a\}$ .

2  $\implies$  3

Założmy, że  $a \neq 0$ . Wtedy  $a^{-1} \in K[a]$ , czyli istnieje wielomian  $f \in K[X]$

$$f(x) = \sum_{i=1}^n b_i x^i, \quad b_n \neq 0$$

taki, że  $a^{-1} = f(a)$ . Wobec tego mamy

$$1 = f(a) \cdot a$$

$$0 = f(a)a - 1 = b_n a^{n+1} + b_{n-1} a^n + \dots + b_0 a - 1,$$

stąd mamy, że

$$a^{n+1} = -\frac{1}{b_n} (b_{n-1} a^n + \dots + b_0 a - 1) \in \text{Lin}_K(1, a, \dots, a^n)$$

jest w domknięciu liniowym  $(1, a, \dots, a^n)$ . Indukcyjnie pokazujemy, że

$$(\forall m \geq 0) a^m \in \text{Lin}_K(1, a, \dots, a^n).$$

1.  $m = 0, \dots, n+1$  bo one są już w  $\text{Lin}_K(1, a, \dots, a^n)$ .

2. Zakładamy teraz, że dla  $m$  mamy

$$a^m = \sum_{i=0}^n c_i a^i$$

i pokazujemy dla  $m+1$ .

$$a^{m+1} = a \cdot a^m = a \sum_{i=0}^n c_i a^i = \sum_{i=0}^n c_i a^{i+1} \in \text{Lin}_K(1, a, \dots, a^n),$$

bo  $a^{n+1} \in \text{Lin}_K(1, a, \dots, a^n)$ .

Czyli

$$K[a] = K(a) = \text{Lin}_K(1, a, \dots, a^n),$$

co daje, że  $[K(a) : K] \leq n < \infty$ .

3  $\implies$  1

$[K(a) : K] < \infty$ , z czego wynika, że


$$\{1, a, \dots, a^n, \dots\} = \{a^t : t \in \mathbb{N}\} \subseteq K(a)$$

jest zbiorem liniowo zależnym. Z liniowej zależności wiemy, że

$$(\exists n \in \mathbb{N})(\exists b_{n-1}, \dots, b_0) a^n = b_{n-1} a^{n-1} + \dots + b_1 a + b_0.$$

Stąd dla  $f \in K[X]$  zadanego wzorem

$$f(x) = b_{n-1} x^{n-1} + \dots + b_0 - x^n$$

mamy  $f(a) = 0$ , zatem  $a$  jest algebraiczny nad  $K$ . 

**Definicja 4.4.** Niech  $a \in L \supseteq K$  będzie algebraicznym pierwiastkiem nad  $K$ ,  $I(a/K) = \{w \in K[X] : w(a) = 0\} = (f)$ ,  $f \neq 0$ ,  $f \in K[X]$ ,  $f$  unormowany (ang. monic)

- $f$  jest nazywany wielomianem **minimalnym**  $a$  nad  $K$  (wyznaczony jednoznacznie)
- **stopień  $a$**  nad  $K$  jest definiowany jako  $\deg(f)$ .

**Uwaga 4.5.** Załóżmy, że  $I(a/K) = (f)$  i  $f$  jest unormowany. Wówczas:

1.  $f$  jest unormowanym wielomianem minimalnego stopnia takim, że  $f(a) = 0$
2.  $\deg(f) = [K(a) : K]$ , czyli stopień tego wielomianu jest równy stopniu przestrzeni liniowej  $K(a)$  nad  $K$ .

**Dowód.**

1. Oczywiście.  $f$  jest wielomianem nieredukowalnym, stąd jeśli istniałby  $g$  taki, że  $g(a) = 0$  oraz  $\deg(g) < \deg(f)$ , to wtedy  $f$  byłby podzielny przez  $g$ , co daje sprzeczność z nieredukowalnością  $f$ .

2. Niech  $n = \deg(f)$ ,

$$f(x) = x^n + \sum_{k < n} b_k x^k$$

Z tego, że  $f(a) = 0$  mamy, że

$$a^n = - \sum_{k < n} b_k a^k \in \text{Lin}_K(1, a, \dots, a^{n-1}) \subseteq L.$$

Czyli  $K(a) = \text{Lin}_K(1, a, \dots, a^{n-1})$  i wystarczy zobaczyć, że  $\{1, \dots, a^{n-1}\}$  jest liniowo niezależny. W przeciwnym przypadku dla pewnego  $0 < r < n$   $a^r \in \text{Lin}_K(1, a, \dots, a^{r-1})$ , czyli istnieje wielomian taki, że  $a$  jest jego pierwiastkiem, a stopień jest nie większy niż  $r < n$  i to daje sprzeczność.

Czyli  $\text{Lin}_K(1, a, \dots, a^n)$  jest bazą  $K(a)$  nad  $K$  i koniec.



**Przykład:**

1.  $\sqrt{2} \in \mathbb{R} \supseteq \mathbb{Q}$ , wtedy  $f(x) = x^2 - 2$  jest wielomianem minimalnym  $\sqrt{2}$  nad  $\mathbb{Q}$  i stopień  $\sqrt{2}$  nad  $\mathbb{Q}$  jest równy 2.
2.  $\pi \in \mathbb{R}$  nie ma stopnia, bo  $\pi$  nie jest liczbą algebraiczną nad  $\mathbb{Q}$
3.  $\sqrt[7]{7 + \sqrt[3]{3}} - \sqrt[6]{6} \in \mathbb{R}$ , czy jest to algebraiczne nad  $\mathbb{Q}$ ? Tak i ma stopień 126.

Jeśli  $K \subseteq L \ni a$  jest algebraiczny, to  $\deg(a/K) = n$ , to

$$K(a) = K[a] = \left\{ \sum_{i=0}^{n-1} b_i a^i : b_i \in K \right\}$$

**Fakt 4.6.** Niech  $K \subseteq L \subseteq M$  będą rozszerzeniami ciał. Wtedy

$$[M : K] = [M : L] \cdot [L : K]$$

**Dowód.** Niech  $\{e_i : i \in I\}$  będzie bazą  $L$  nad  $K$ , a  $\{f_j : j \in J\}$  będzie bazą  $M$  nad  $L$ . Stąd  $|I| = [L : K]$  i  $|J| = [M : L]$ .

Chcemy za pomocą tych dwóch zbiorów zrobić bazę  $M$  nad  $K$ . Rozważmy zbiór

$$X = \{e_i \cdot f_j : i \in I, j \in J\}.$$

Musimy pokazać, że

1.  $X$  jest liniowo niezależny
2.  $X$  jest bazą  $M$  nad  $K$
3.  $|X| = |I| \cdot |J|$

Czyli  $X$  jest bazą  $M$  nad  $K$  (1.,2.) i ma odpowiednią moc (3.).

1. Załóżmy nie wprost, że  $X$  nie jest l.n.z., czyli istnieją  $k_{ij} \in K$  takie, że

$$\sum_{j \in J} \sum_{i \in I} k_{ij} e_i f_j = 0,$$

ale  $\sum_i k_{ij} e_i = l_j$  są elementami  $L$ , czyli

$$\sum_{j \in J} l_j f_j = 0$$

więc  $f_j$  są liniowo zależne, a przecież były bazowe, w takim razie

$$0 = l_j = \sum_{i \in I} k_{ij} e_i,$$

$e_i \neq 0$ , czyli  $k_{ij} = 0$  i koniec.

2.  $X$  generuje  $M$  nad  $K$ , bo dla  $m \in M$  mam

$$m = \sum l_j f_j = \sum \left( \sum a_{ij} e_i \right) f_j = \sum \sum a_{ij} e_i f_j = \sum \sum k_{ij} e_i f_j$$

3. Załóżmy, nie wprost, że dla  $i \neq i'$  i  $j \neq j'$  i  $e_i f_j = e_{i'} f_{j'}$ . Czyli

$$e_i f_j - e_{i'} f_{j'} = 0,$$

czyli  $f_j, f_{j'}$  są liniowo zależne nad  $L$ , czyli mamy, że  $f_j = f_{j'}$  i

$$0 = e_i f_j - e_{i'} f_j = (e_i - e_{i'}) f_j \implies e_i - e_{i'} = 0 \implies i = i'$$

Z tego wynika, że  $[M : K] = |X| = |I||J| = [L : K][M : L]$ .



**Wniosek 4.7.** Niech  $K \subseteq L$  będzie rozszerzeniem skończonego ciała. Niech

$$K_{\text{alg}}(L) = \{a \in L : a \text{ jest algebraiczny nad } K\}.$$

Okazuje się, że  $K_{\text{alg}}$  jest podciałem.

**Dowód.** Weźmy  $a, b \in K_{\text{alg}}$ . Wiemy, że  $[K(a) : K]$  i  $[K(b) : K]$  są skończone. Mamy, że

$$K \subseteq K(a) \subseteq K(a, b)$$

Z faktu ?? wiemy, że

$$[K(a, b) : K] = [K(a, b) : K(a)] \cdot [K(a) : K]$$

czyli również  $K(a, b)$  jest skończone. Zatem dla  $x \in K(a, b)$  mamy

$$[K(x) : K] \leq [K(a, b) : K]$$

też jest skończone, zatem  $x$  jest algebraiczny nad  $K$ .

Dla  $x \in K(a, b)$  mamy  $[K(x) : K] \leq [K(a) : K]$ , czyli również jest skończone. W takim razie,  $x$  jest algebraiczny nad  $K$  i należy do  $K_{\text{alg}}$ .



**Definicja 4.8.**

1.  $K_{\text{alg}}(L)$  nazywamy **algebraicznym domknięciem**  $K$  w  $L$ .
2.  $K$  jest **relatywnie algebraicznie domknięte** w  $L \iff K_{\text{alg}}(L) = K$ .

### Przykłady:

1.  $\mathbb{Q}_{\text{alg}}(\mathbb{C}) := \hat{\mathbb{Q}} = \mathbb{Q}^{\text{alg}}$  jest to tak zwane **ciało liczb algebraicznych**.  $\hat{\mathbb{Q}}$  jest przeliczalne, bo  $\mathbb{Q}[x]$  jest przeliczalne, więc jest mnóstwo liczb **przestępnych** (zespólonych, które nie są algebraiczne, ale nie potrafimy żadnej wskazać).
2.  $K$  jest algebraicznie domknięte w  $K(X)$
3.  $\frac{1}{\sqrt[3]{2} + \sqrt{3}} \in \mathbb{Q}[\sqrt{3}, \sqrt[3]{2}]$ , bo  $\mathbb{Q}[\sqrt{3}, \sqrt[3]{2}]$  jest ciałem

$$L = \underbrace{\mathbb{Q}[\sqrt[3]{2}, \sqrt{2}]}_{\subseteq \mathbb{C}} = \underbrace{\mathbb{Q}[\sqrt[3]{2}][\sqrt{3}]}_{\substack{\text{ciało} \\ \sqrt[3]{2}\text{alg.w}}} \mathbb{Q} = \{a + b\sqrt[3]{2} + c\sqrt{3} : a, b, c \in \mathbb{Q}(\sqrt{3})\}$$

$$\sqrt[3]{2} + \sqrt{3} \in L \implies \frac{1}{\sqrt[3]{2} + \sqrt{3}} \in L$$

## Wykład 5: Wielomiany koła, domknięcia algebraiczne

**Uwaga 5.1.** Niech  $K \subseteq L \subseteq M$  będą rozszerzeniami ciał.  $K \subseteq M$  jest algebraiczne  $\iff K \subseteq L$  i  $L \subseteq M$  są algebraiczne

**Dowód.**

$\implies$  OK

$\impliedby$

Weźmy dowolny  $m \in M$ .  $L \subseteq M$  jest algebraiczny, co oznacza  $f(m) = 0$ , gdzie  $f \in L[X]$

$$f = \sum_{i=0}^n a_n x^i, \quad a_n \neq 0$$

W takim razie  $m$  jest algebraiczne nad ciałem  $K(a_0, \dots, a_n)$ . Ale teraz

$$[K(m) : K] \leq [K(a_0, \dots, a_n, m) : K] \stackrel{4.6}{=} [K(a_0, \dots, a_n, m) : K(a_0, \dots, a_n)] [K(a_0, \dots, a_n) : K] < \infty$$

bo  $m$  jest algebraiczny  $K(\bar{a})$ . Czyli

$$[K(m) : K] < \infty$$

więc  $m$  jest algebraiczny nad  $K$  (uwaga 4.3). ☕

**Uwaga 5.2.**  $K_{\text{alg}}(L)$  jest relatywnie algebraicznie domknięty w  $L$ . To znaczy  $(K_{\text{alg}}(L))_{\text{alg}}(L) = K_{\text{alg}}(L)$ .

**Dowód.** Ćwiczenia. ☕

### 5.1 Wielomian rozkładu koła [cyclotomic polynomials]

Rozważamy wielomian

$$w_m(x) = x^m - 1$$

dla  $m \in \mathbb{N}$ . Wiemy, że

- pierwiastki  $w_m$  w  $\mathbb{C}$  są jednokrotne
- $\mu_m(\mathbb{C})$  jest grupą cykliczną
- $a \in \mu_m(\mathbb{C})$  jest generatorem  $\mu_m(\mathbb{C}) = \{a^i : 0 \leq i \leq m\} \cong (\mathbb{Z}_m, +)$
- $a^k$  generuje  $\mu_m(\mathbb{C}) \iff \text{NWD}(k, m) = 1$

**Funkcja Eulera:**

$$\phi(m) = |\{k \in \mathbb{N} : 0 \leq k < m, \text{NWD}(k, m) = 1\}|$$

$\mu_m(\mathbb{C})$  ma  $\phi(m)$  generatorów.

Niech

$$\{k \in \mathbb{N} : 0 < k < m, \text{NWD}(k, m) = 1\} = \{m_1, \dots, m_{\phi(m)}\}$$

i zdefiniujmy

$$F_m(x) := (x - a^{m_1}) \dots (x - a^{m_{\phi(m)}}) \in \mathbb{C}[X]$$

$F_m$  to  $m$ -ty wielomian cyklotoniczny.

**Uwaga 5.3.**

1.  $w_m(x) = x^m - 1 = F_m(x) \cdot v_m(x) = F_m(x) \cdot \prod_{\substack{d < m \\ d|m}} F_d(x)$
2.  $F_m(x) \in \mathbb{Z}[X]$



**Dowód:**

1. Wiemy, że wielomian  $w_m$  ma  $m$  pierwiastków na płaszczyźnie Gaussa, więc jest iloczynem dwumianów  $x - b$ ,  $b \in \mu_m(\mathbb{C})$ , czyli

$$\alpha \in \mu_m(\mathbb{C}) \implies \alpha^d - 1 \quad d = \text{ord}(\alpha), d|m$$

Wtedy  $\alpha$  jest pierwiastkiem pierwotnym z 1 stopnia  $d$ . Wobec tego

$$F_d(x) = \prod_{\substack{\alpha \in \mu_m(\mathbb{C}) \\ \text{ord}(\alpha)=d}} (x - \alpha) \implies (\text{teza})$$

2. Dowód przez indukcję względem  $m$ . Dla  $m = 1$  mamy  $F_m(x) = x - 1 \in \mathbb{Z}[X]$ .

Teraz zakładamy, że dla wszystkich  $0 < d < m$  jest  $F_d(x) \in \mathbb{Z}[X]$ . Z punktu (1) wiemy, że

$$x^m - 1 = w_m(x) = F_m(x)v_m(x)$$

z założenia indukcyjnego  $v_m(x) \in \mathbb{Z}[X]$ , bo jest iloczynem  $\prod_{\substack{\alpha \in \mu_m(\mathbb{C}) \\ \text{ord}(\alpha)=d}} (x - \alpha)$

$w_m(x)$  w  $\mathbb{Z}[X]$  jest podzielny przez  $v_m$  i dostajemy:

$$w_m(x) = v_m(x) \cdot L(x)$$

ale w  $\mathbb{C}[X] \supseteq \mathbb{Z}[X]$  było

$$w_m(x) = v_m(x) \cdot F_m(x),$$

czyli  $F_m = L \in \mathbb{Z}[X]$ .

**Uwaga 5.4.** [Lemat Gaussa]  $F_m(x)$  jest wielomianem nierozkładalnym w  $\mathbb{Q}[X]$  (równoważnie w  $\mathbb{Z}[X]$ ).

**Dowód:**

Po pierwsze zauważmy, że  $F_m$  jest nierozkładalny w  $\mathbb{Q}[X] \iff$  nierozkładalny w  $\mathbb{Z}[X]$ .

Założmy nie wprost, że

$$F_m(x) = G_1(x) \cdot G_2(x)$$

dla  $G_1, G_2 \in \mathbb{Z}[X]$ . Możemy założyć, że  $G_1(x)$  jest dalej nierozkładalny w  $\mathbb{Z}[X]$  oraz  $0 < \deg(G_1) < \deg(F_m) = \phi(m)$

**Lemat:** Istnieje  $\varepsilon'$ -pierwiastek  $G_1$  oraz liczba pierwsza  $p$  taka, że  $p \nmid m$  i  $G_1(b) = G_2(b^p) = 0$ .

**Dowód lematu:**

Niech  $\varepsilon$  będzie jakimś pierwiastkiem  $G_1$ , a  $\tau$  będzie jakimś pierwiastkiem  $G_2$ . W takim razie

$$\tau, \varepsilon \in \mu_m(\mathbb{C}) \implies \tau = \varepsilon^l$$

dla pewnego  $l$  takiego, że  $\text{NWD}(l, m) = 1$ .

Niech  $l = p_1 \cdot \dots \cdot p_s$  będzie rozkładem na liczby pierwsze. Wtedy mamy ciąg różnych liczb

$$\text{pierwiastek } G_1 = \varepsilon, \varepsilon^{p_1}, \varepsilon^{p_1 p_2}, \dots, \varepsilon^{p_1 \dots p_s} = \tau \text{ pierwiastek } G_2$$

które są pierwiastkami pierwotnymi stopnia  $m$ . Z tego wynika, że każda z tych liczb jest pierwiastkiem  $G_1$  lub  $G_2$ , czyli istnieje taka pozycja  $i$ , że

$$G_1(\varepsilon^{p_1 \dots p_i}) = 0,$$

$$G_2(\varepsilon^{p_1 \dots p_{i+1}}) = 0$$

wtedy  $\varepsilon' := \varepsilon^{p_1 \cdots p_i}$  oraz  $p = p_{i+1}$  i lemat jest spełniony.

Wimy już, że  $G_1(\varepsilon) = 0$  i  $G_1 \in \mathbb{Z}[X]$  jest wielomianem nierozkładalnym. Niech  $p$  będzie liczbą pierwszą z lematu. Rozważmy

$$G_3(x) = G_2(x^p).$$

Wtedy  $G_2(\varepsilon^p) = G_3(\varepsilon) = 0$ , ale stąd wynika, że  $G_1(x)$  dzieli  $G_3(x)$ . Niech więc

$$G_3(x) = G_1(x)H(x) \in \mathbb{Z}[X].$$

Rozważmy homomorfizm

$$f : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}_p \mathbb{Z} / p\mathbb{Z} =$$

i indukowany przez niego epimorfizm pierścieni

$$\bar{f} : \mathbb{Z}[X] \rightarrow \mathbb{Z}_p[X].$$

Z założenia  $F_m = G_1 G_2$  mamy, że

$$\bar{f}(F_m) = \bar{f}(G_1) \bar{f}(G_2)$$

a z rozumowania powyżej ( $G_3 = G_1 H$ )

$$\bar{f}(G_3) = \bar{f}(G_1) \bar{f}(H)$$

ale

$$\bar{f}(G_3(x)) = \bar{f}(G_2(x^p)) = \bar{f}(G_2(x))^p,$$

bo współczynniki  $\bar{f}(G_2(x^p))$  są w  $\mathbb{Z}_p$ , a  $(\sum c_i x^i)^p = \sum c_i^p x^{ip}$ , bo  $c_i^{kp} = c_i^k$  dla  $c_i \in \mathbb{Z}_p$ .

Stąd wiemy, że

$$f(G_2(x))^p = \bar{f}(G_1) \bar{f}(H).$$

Pierścień  $\mathbb{Z}_p[X]$  jest UFD, więc  $\bar{f}(G_1)$  i  $\bar{f}(G_2)$  mają wspólny dzielnik w  $\mathbb{Z}_p[X]$ , stopnia co najmniej 1. Zatem z

$$\bar{f}(F_m) = \bar{f}(G_1) \bar{f}(G_2)$$

$$\bar{f}(F_m) | \bar{f}(w_m) = x^m - 1.$$

Zatem w pewnym rozszerzeniu  $L \supseteq \mathbb{Z}_p$   $w_m$  ma pierwiastek wielokrotny co daje sprzeczność.

**Uwaga 5.5.** Jeżeli  $\varepsilon \in \mathbb{C}$  jest pierwiastkiem pierwotnym z 1 stopnia  $m$ , to  $[\mathbb{Q}(\varepsilon) : \mathbb{Q}] = \phi(m)$ .

**Dowód:**  $F_m(x) \in \mathbb{Q}[X]$  jest nierozkładalny, a  $\varepsilon$  jest jego pierwiastkiem. To znaczy, że  $F_m(x)$  jest wielomianem minimalnym dla  $\varepsilon$  nad  $\mathbb{Q}$ . Mamy, że  $[\mathbb{Q}(\varepsilon) : \mathbb{Q}] = \deg F_m = \phi(m)$ .

**Lemat 5.6.** [lemat Liouville'a o aproksymacji diofantycznej]: Jeżeli  $a \in \mathbb{R}$  jest liczbą algebraiczną stopnia  $N > 1$ , to istnieje  $c = c(a) \in \mathbb{R}_+$  takie, że dla każdego  $r = \frac{p}{q} \in \mathbb{Q}$  zachodzi

$$\left| a - \frac{p}{q} \right| \geq \frac{c}{q^N}$$

Lemat Liouville'a mówi o cesze. Jeżeli liczba nie spełnia tego lematu, to jest **liczbą przestępną**.

**Dowód.** Niech  $N > 1$  i  $a \in \mathbb{Q}$ . Niech  $f \in \mathbb{Z}[X]$  taki, że  $f(a) = 0$  i  $\deg(f) = \deg(a/\mathbb{Q})$ . Teraz zauważmy, że na  $f$  patrzymy jako na funkcję wielomianową. To znaczy, dla każdego  $x \in \mathbb{R}$  patrząc na

$$\hat{f}(x) = \hat{f}(x) - \underbrace{\hat{f}(a)}_{=0}$$

ale funkcje wielomianowe są różniczkowalne. Dlatego możemy skorzystać z theoremierdzenia o wartości średniej. To znaczy

$$\widehat{f}(x) - \widehat{f}(a) = \widehat{f}'(x-a)$$

My wiemy, że  $a$  jest pierwiastkiem jednokrotnym wielomianu  $f(x)$ . Niech  $\varepsilon > 0$  takie, że  $a \in (a - \varepsilon, a + \varepsilon)$  jest jedynym pierwiastkiem  $f(x)$  w tym przedziale. Oczywiście,

$$\deg(\widehat{f}'(x)) < \deg(\widehat{f}(x)) \implies \widehat{f}'(a) \neq 0.$$

Bez straty ogólności  $\widehat{f}'(a) > 0$ . Niech  $d = \sup_{x \in I} \widehat{f}'(x)$ .

$$c = c(a) = \min(\varepsilon, \frac{1}{d}).$$

Udowodnimy, że  $c$  jest dobrze określona. Niech  $r = \frac{p}{q} \in \mathbb{Q}$  i  $p, q \in \mathbb{Z}, q > 0$ .

$$f(x) = \sum_{k=0}^N a_k x^k, \quad a_k \in \mathbb{Z}, a_N \neq 0$$

Rozważamy przypadki:

1.  $f \notin I$ . Wtedy  $|a - \frac{p}{q}| \geq \varepsilon \geq \frac{\varepsilon}{q^N} \geq \frac{c}{q^N}$
2.  $f \in I$ . Wtedy  $|a - \frac{p}{q}|$  i  $\frac{p}{q}$  może być naszym  $x$ . Czyli

$$\left| a - \frac{p}{q} \right| = \frac{|f(\frac{p}{q})|}{|f'(\frac{p}{q})|} \geq \frac{|f(\frac{p}{q})|}{d} \geq \frac{c}{q^N}$$

bo  $c \leq \frac{1}{d}$

$$0 \neq |f(\frac{p}{q})| = \left| \sum_{k=0}^N a_k \frac{p^k}{q^k} \right| = \frac{\left| \sum_{k=0}^N a_k p^k q^{N-k} \right|}{q^N} \geq \frac{1}{q^N}$$



## 5.2 Domknięcia algebraiczne

**Definicja 5.7.** Ciało  $L \supseteq K$  jest **algebraicznym domknięciem**  $K$  wtedy i tylko wtedy, gdy:

1.  $L$  jest algebraicznie domknięte
2.  $L \supseteq K$  jest rozszerzeniem algebraicznym, to znaczy dla każdego  $a \in L$   $a$  jest pierwiastkiem algebraicznym nad  $K$

Takie  $L$  oznaczamy przez  $\widehat{K}, K^{\text{alg}}$ .

**Uwaga 5.8.** Dla każdego  $K$  istnieje algebraiczne domknięcie  $\widehat{K}$ .

**Dowód.** Rozważmy  $K_{\infty} \supseteq K$  - ciało algebraicznie domknięte (theoremierdzenie z początku wykładu). Pokażemy, że

$$\widehat{K} = K_{\text{alg}}(K_{\infty}) = \{a \in K_{\infty} : a \text{ algebraiczny nad } K\}$$

1.  $\widehat{K}$  jest algebraicznie domknięte:

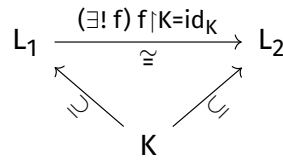
Jeżeli  $f \in \widehat{K}[X]$ , to  $f$  ma pierwiastek w  $K$ , ale  $\widehat{K} \subseteq K_{\infty}$ , to znaczy, że  $a \in \widehat{K}$  jest algebraiczne nad  $K$ .

2.  $K \subseteq \widehat{K}$  jest rozszerzeniem algebraicznym:

$K \subseteq \widehat{K} = K_{\text{alg}}(K_\infty)$  z definicji jest rozszerzeniem algebraicznym.



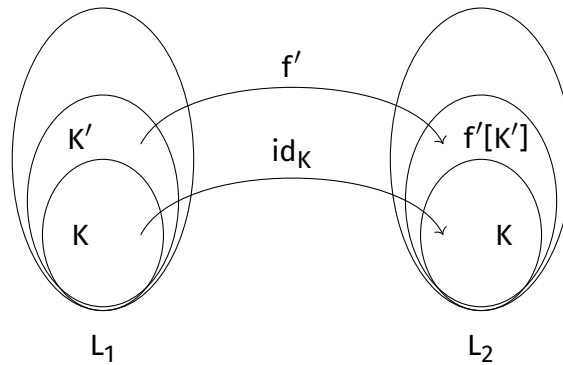
**Twierdzenie 5.9.**  $\widehat{K}$  jest jedyne z dokładnością do izomorfizmu nad  $K$ .



**Dowód.** Można użyć indukcji pozaskończonej, a można też użyć lematu Zorna. My zrobimy to drugie.

Niech

$$\mathfrak{K} = \{(K', f') : K \subseteq K' \subseteq L_1, f' : K' \xrightarrow{1-1} L_2, f' \upharpoonright K = \text{id}_K\}$$



Oczywiście,  $\mathfrak{K} \neq \emptyset$ , bo  $(K, \text{id}_K) \in \mathfrak{K}$ . W  $\mathfrak{K}$  definiujemy relację porządku w naturalny sposób, to znaczy

$$(K', f') \leq (K'', f'') \iff K' \subseteq K'' \wedge f'' \upharpoonright K' = f'.$$

Wtedy  $(\mathfrak{K}, \leq)$  jest zbiorem częściowo uporządkowanym i niepustym (bo jest  $(K, \text{id}_K) \in \mathfrak{K}$ ). Ponadto każdy wstępujący łańcuch  $(\mathfrak{K}, \leq)$  ma ograniczenie górne. Na mocy lematu Kuratowskiego-Zorna w tej rodzinie istnieje element maksymalny, nazwijmy go  $(K_1, f_1)$ . Pokażemy, że  $K_1 = L_1$ .

Założmy nie wprost, że istnieje  $a \in L_1 \setminus K_1$ . Niech  $w(x) \in K_1[X]$  będzie wielomianem minimalnym elementu  $a$  nad  $K_1$ . Niech

$$K_2 = f_1[K_1]$$

$$v(x) = f_1(a_0) + f_1(a_1)x + \dots + f_1(a_n)x^n \in K_2[X].$$

$v(x)$  też jest nierozkładalny nad  $K_2$ , bo  $w(x)$  był nierozkładalny nad  $K_1$ . Niech  $b \in L_2$  będzie pierwiastkiem wielomianu  $v$ .

Zauważmy, że  $K_1(a) = K_1[a]$ , bo  $w(x)$  jest nierozkładalny nad  $K_1$ , ale

$$K_1[a] \simeq K_1[X]/(w) \simeq K_2[X]/(v) \simeq K_2[b] \simeq K_2(b).$$

Czyli  $K_1(a) \simeq K_2(b)$  i  $f_2 : K_1(a) \xrightarrow{\cong} K_2(b)$  jest izomorfizmem rozszerzającym  $f_1$ . Wtedy mamy  $(K_1, f_1) \leq (K_1(a), f_2)$ , co daje sprzeczność z maksymalnością  $(K_1, f_1)$ . Zatem  $L_1 = K_2$ .

Zrobimy sprytnie wprost:  $K_1 = L_1$ ,  $K \subseteq K_2 \subseteq L_2$  i  $K_1 \cong_K K_2$ .  $K_1$  jest algebraicznie domknięte, więc  $K_2$  też takie musi być. Czyli  $K \subseteq K_2 \subseteq L_2$  jest algebraiczne, więc  $K_2 = L_2$ , bo założyliśmy, że  $b \in L_2 \setminus K_2$  i wtedy wielomina minimalny  $f_b(x) \in K_2[X]$  ma pierwiastek  $c \in K_2$ , czyli  $(x - c) | f_b(x)$  a więc  $x - c = f_b(x)$  jest nierozkładalny i  $b = c$ .



**Wniosek 5.10.** Jeśli  $K \cong L$ , to  $\widehat{K} \cong \widehat{L}$ . Dokładniej, jeżeli  $f_0 : LK \rightarrow L$  jest izomorfizmem ciał, to istnieje izomorfizm  $f : \widehat{K} \rightarrow \widehat{L}$  taki, że  $f \upharpoonright K = f_0$ .

**Dowód.** Ćwiczenia



**Uwaga 5.11.** Jeśli  $K \subseteq L$  jest algebraicznym rozszerzeniem ciał, to istnieje monomorfizm  $f : L \rightarrow \hat{K}$  taki, że  $f|_K = \text{id}_K$ .

**Dowód.** Ćwiczenie



## Wykład 6: Wstęp do teorii Galois

### 6.1 Grupy Galois

Niech  $K$  będzie ciałem,  $\hat{K}$  jego algebraicznym domknięciem. Niech  $K \subseteq L$  będzie rozszerzeniem algebraicznym ciał [BSO:  $L \subseteq \hat{K}$ ]. **Grupą Galois** rozszerzenia  $K \subseteq L$  nazywamy

$$G(L/K) = \text{Gal}(L/K) = \{f \in \text{Aut}(L) : f|_K = \text{id}_K\} = \text{Aut}(L/K)$$

ze składaniem jako działaniem. Jest to jednocześnie podgrupa wszystkich automorfizmów.

**Przykład:**

- Niech  $K$  będzie ciałem prostym ( $\cong \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$  lub  $\mathbb{Z}$ ). Wtedy  $\text{Gal}(L/K) = \text{Aut}(L)$ , bo
  - Niech  $\text{char}(K) = \text{char}(L) = p > 0$  i niech  $f \in \text{Aut}(L)$ . Wtedy  $f(1) = 1$ ,  $f(\underbrace{1 + \dots + 1}_k) = \underbrace{1 + \dots + 1}_k$ , a ponieważ  $K = \{\underbrace{1 + \dots + 1}_k : k \in \{1, \dots, p\}\}$ , zatem  $f|_K = \text{id}_K$ , czyli  $f \in \text{Gal}(L/K)$ .
  - Niech  $\text{char}(K) = \text{char}(L) = 0$ , wtedy  $K \cong \mathbb{Q}$ . Niech  $f \in \text{Aut}(L)$ . Wtedy  $f(0) = 0$ ,  $f(1) = 1$ , a dla dowolnego  $k \in \mathbb{N}$   $f(\underbrace{1 + \dots + 1}_k) = \underbrace{1 + \dots + 1}_k$ , stąd dostajemy, że  $f(n) = n$  dla  $n \in \mathbb{Z}$ , a z własności  $\mathbb{Q}$  dostajemy, że  $f(\frac{m}{n}) = \frac{m}{n}$ , zatem  $f|_K = \text{id}_K$ .
- $\text{Gal}(\mathbb{Q}(\sqrt{2})/\mathbb{Q}) = \text{Aut}(\mathbb{Q}(\sqrt{2})) = \{f_0, f_1\} \cong \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ , bo  $\sqrt{2}$  może przejść na siebie albo na  $-\sqrt{2}$ . Wtedy  $f_0 = \text{id}$ , a  $f_1(-\sqrt{2})$

Grupę Galois  $\text{Gal}(\hat{K}/K)$  nazywamy **absolutną grupą Galois** ciała  $K$ .

Czy każda grupa skończona jest izomorficzna z  $\text{Gal}(L/\mathbb{Q})$  dla pewnego  $\mathbb{Q} \subseteq L$ ? Jest to otwarty problem teorii Galois.

**Uwaga 6.1.**  $a, b \in \hat{K}$ , takie, że  $I(a/K) = I(b/K)$ , to wtedy istnieje  $f \in \text{Gal}(\hat{K}/K)$  takie, że  $f(a) = b$ .

**Dowód.**

$$\begin{array}{ccc} K[a] & \xrightarrow[\cong]{f} & K[b] \\ \downarrow \subseteq & & \downarrow \subseteq \\ K[a]^{\text{alg}} = \hat{K} & \xrightarrow[\cong]{\exists f'} & \hat{K} = K[b]^{\text{alg}} \end{array}$$

Co jest wnioskiem z wniosku 5.10.



### 6.2 Rozszerzenia algebraiczne normalne

$\hat{K}$  jest największym algebraicznym rozszerzeniem  $K$  tzn.  $K \subseteq L$  oznacza, że istnieje  $f : L \rightarrow \hat{K}$  monomorfizm ciał taki, że  $f|_K = \text{id}_K$ . (☞)

Mówmy, że rozszerzenie algebraiczne  $K \subseteq L$  jest **normalne**, gdy w (☞)  $f[L] \subseteq \hat{K}$  dla wszystkich  $f : L \rightarrow \hat{K}$ .

**Przykład** Rozszerzenie  $K \subseteq \hat{K}$  jest normalne.

**Uwaga 6.2.** Załóżmy, że  $K \subseteq L \subseteq \hat{K}$ . Wtedy rozszerzenie  $K \subseteq L$  jest normalne  $\iff$  dla każdego  $f \in \text{Gal}(\hat{K}/K)$   $f[L] = L$ .

**Dowód.**  $\implies$  z definicji, bo  $\text{id}_K[L] = L$ .

$\impliedby$  z definicji.





Czyli  $K \subseteq L_1 \subseteq L$  i  $K \subseteq L$  jest normalna, to  $L_1 \subseteq L(\subseteq \widehat{K})$ , więc  $\text{Gal}(\widehat{L}_1/L_1) \leq \text{Gal}(\widehat{K}/K)$ .

**Twierdzenie 6.3.** Dla  $K \subseteq L$  algebraicznego rozszerzenia jest normalne  $\iff$  dla każdego  $b \in L$  wielomian minimalny  $f \in K[X]$  rozkłada się w  $L[X]$  na iloczyn czynników liniowych.

**Dowód.** Bez straty ogólności rozważamy  $L \subseteq \widehat{K}$ .

$\implies$

Dowód nie wprost, to znaczy założymy, że istnieje  $b \in L$  takie, że  $w_b(x)$  ma pierwiastek  $a \in \widehat{K} \setminus L$ . Ale wtedy z Uwagi 6.1. na jednorodność  $\widehat{K}$  istnieje  $f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)$  takie, że  $f(b) = a$ , więc  $f[L] = L$  co jest sprzeczne z 6.2.

$\impliedby$

Założmy nie wprost, że na mocy 6.2. istnieje  $f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)$  takie, że  $f[L] \neq L$ . Ale  $L$  i  $f[L]$  są wzajemnie sprzężone, więc wybierzmy  $a \in L \setminus f[L]$ . Symetrycznie,  $a' \in f[L] \setminus L$ ,  $f' : f[L] \xrightarrow{\cong} L$  spełnia warunek (☝).

Niech  $w_a(x)$  jest wielomianem minimalnym  $a$  nad  $K$ . Wtedy  $w_a(X) = f(w_a(x))$ , bo  $f \upharpoonright K = \text{id}_K$ . Czyli  $w_a$  jest wielomianem minimalnym dla  $b = f(a)/K$ . Czyli  $L \overset{f}{\cong} f[L]$ . Z (☝) wiemy, że  $w_a(x)$  rozkłada się nad  $L$  na czynniki liniowe. Czyli  $w_a(x) \dots f[L] \dots$ , co daje nam sprzeczność, bo  $a$  jest pierwiastkiem  $w_a(X)$ , ale  $a \notin f[L]$ . ☕

Rozszerzenie ciał  $K \subseteq L$  jest **skończone**, jeśli  $[L : K] < \infty$ .

**Twierdzenie 6.4.** Niech  $K \subseteq L$  będą rozszerzeniami ciał. Wtedy następujące warunki są równoważne:

1. rozszerzenie  $K \subseteq L$  jest skończone i normalne
2.  $L$  jest ciałem rozkładu pewnego wielomianu

**Dowód.** Bez straty ogólności założymy, że  $K \subseteq L \subseteq \widehat{K}$ .

(2)  $\implies$  (1)

Założmy, że  $L$  jest ciałem rozkładu pewnego wielomianu. Wtedy  $L = K(a_1, \dots, a_n)$ , gdzie  $a_1, \dots, a_n$  to wszystkie pierwiastki wielomianu  $w(x)$  w  $\widehat{K}$ .

Niech  $f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)$ , wtedy  $f(a_1, \dots, f(a_n))$  to też wszystkie pierwiastki wielomianu  $w(x)$ . Stąd

$$f[L] = K(f(a_1), \dots, f(a_n)) = K(a_1, \dots, a_n) = L,$$

zatem rozszerzenie  $K \subseteq L$  jest normalne i skończone.

(1)  $\implies$  (2)

Niech  $K \subseteq L$  będzie skończone i normalne. Wtedy  $L = K(a_1, \dots, a_n)$  dla pewnych  $a_1, \dots, a_n \in L$  i  $\{a_1, \dots, a_n\}$  będzie bazą  $L$  nad  $K$ . Wtedy istnieje  $w \in K[X] \setminus \{0\}$  takie, że  $w(a_1) = \dots = w(a_n) = 0$ , zatem

$$L \supseteq \{ \text{pierwiastki } w \} \supseteq \{a_1, \dots, a_n\}.$$

**COŚ TUTAJ JEST NIE TAK**



**Przykłady:**

1. Niech  $K \subseteq L$  będą ciałami skończonymi, wtedy  $K \subseteq L$  jest ciałem normalnym, bo  $|L| = p^n$ ,  $w_{p^n-1}(x) = x^{p^n-1} - 1$  i  $L$  jest ciałem rozkładu  $w$  nad  $K$ .
2.  $\mathbb{Q} \subseteq \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})$  to rozszerzenie skończone, ale nie normalne. Jest tak, bo
  - $x^3 - 2$  jest nierozkładalny nad  $\mathbb{Q}$  (kryterium Eisteina)
  - W ciele  $\mathbb{C}$   $x^3 - 2$  ma 3 pierwiastki, z których tylko jeden jest w  $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}) \subseteq \mathbb{R}$

**Uwaga 6.5.** Niech  $K \subseteq L \subseteq \widehat{K}$  i niech  $L_1$  będzie ciałem generowanym przez  $\bigcup \{f[L] : f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)\}$ . Wtedy  $L_1$  to **normalne domknięcie ciała  $L$  w  $\widehat{K}$** . Wtedy

1. Rozszerzenie  $K \subseteq L_1$  jest normalne
2. Jeśli  $K \subseteq L_2$  i  $L \subseteq L_2$  są normalne, to istnieje monomorfizm  $L_1 \rightarrow L_2$  taki, że  $f \upharpoonright K = \text{id}$ .

**Dowód.** (1) Z 6.2

(2)

Bez straty ogólności założymy, że  $K \subseteq L \subseteq L_2 \subseteq \widehat{K}$  i  $K \subseteq L \subseteq L_2 \subseteq \widehat{K}$ . Niech  $f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)$ ,  $f[L] \subseteq L_2$ . W takim razie  $\bigcup \{f[L] : f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)\} \subseteq L_2$ , z czego wynika, że  $L_1 \subseteq L_2$ . ☕

### 6.3 Rozszerzenia rozdzielcze

- Niech  $K$  będzie ciałem i  $a \in \widehat{K}$ . Mówimy, że  $a$  jest **rozdzielczy nad  $K$** , gdy wielomian minimalny  $a$ ,  $w_a(x) \in K[X]$  ma tylko pierwiastki jednokrotne w  $\widehat{K}$ .
- Algebraiczne rozszerzenie  $K \subseteq L$  jest **rozszerzeniem rozdzielczym**, gdy dla każdego  $a \in L$   $a$  jest rozdzielczy nad  $K$ .
- Wielomian  $w(x) \in K[X]$  jest **rozdzielczy**, gdy  $w$  ma tylko pierwiastki jednokrotne w  $\widehat{K}$ .

**Uwaga 6.6.** Założymy, że  $w(x) \in K[X]$  jest wielomianem nierozkładalnym stopnia  $> 0$ . Wtedy

1.  $w(x)$  jest rozdzielczy  $\iff w(x)$  i  $w'(x)$  są względnie pierwsze
2. Jeśli  $\text{char}(K) = 0$ , to  $w$  jest rozdzielczy
3. Jeśli  $\text{char}(K) = p > 0$ , to  $w$  jest nierozdzielczy  $\iff w(x) \in K[X^p]$ , to znaczy  $w(x) = v(x^p)$  dla pewnego  $v(x) \in K[X]$ .

**Dowód.** Dowód zadanie z listy 4 ☕

**Przykłady:**

1. Niech  $K \subseteq L$  będzie rozdzielcze i  $K \subseteq L_1 \subseteq L$ . Wtedy  $L_1 \subseteq L$  też jest rozdzielcze [ćwiczenia]
2. Jeśli  $\text{char}(K) = 0$ , to każde rozszerzenie algebraiczne ciała  $K$  jest rozdzielcze.
3. Niech  $K \subseteq L$  będą ciałami skończonymi. Wtedy  $K \subseteq L$  jest rozdzielcze.

Ciał  $L$  rozkładu wielomianu  $x^{p^n} - x$  o pierwiastkach jednokrotnych.

4. Rozszerzenia nierozdzielnicze: niech  $K = \mathbb{F}_p(X) \subseteq L = K(\sqrt[p]{X})$ . Niech  $w_a(T) = T^p - x \in K[T]$  będzie wielomianem minimalnym  $a = \sqrt[p]{X}$ . Wtedy  $w'_a = 0$ , czyli w ciele  $L$  istnieje  $p$ -krotny pierwiastek  $w_a$ :  $w_a(T) = (t - a)^p \cdot a$

**Lemat 6.7.**

1. Jeśli  $a \in \widehat{K}$ , to  $|\{f(a) : f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)\}| \leq \text{stopień } a \text{ nad } K$
2.  $a$  jest rozdzielczy nad  $K \iff$  w podpunkcie (1) jest równość.

**Dowód.**

$$\{f(a) : f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)\} \stackrel{??}{=} \{\text{pierwiastki wielomianu minimalnego } w_a \in K[X] \text{ nad } K\}$$

czyli  $\deg(a/K) = \deg(w_a)$ . ☕

Element  $a \in L$  nazywamy **elementem pierwotnym** rozszerzenia  $K \subseteq L$ , gdy  $L = K(a)$ .

**Twierdzenie 6.8.** Niech  $K \subseteq L$  będzie rozszerzeniem skończonym,  $L = K(a_1, \dots, a_n)$  i  $a_1, \dots, a_n$  rozdzielcze nad  $K$ . Wtedy istnieje  $a^* \in L$  rozdzielczy nad  $K$  taki, że  $L = K(a^*)$ .

**Dowód.** Bez starty ogólności założmy, że  $K \subseteq L \subseteq \hat{K}$ . Rozważmy dwa przypadki:

1.  $K$  jest skończone. Wtedy  $L$  także jest skończone, a  $L^*$  jest cykliczna. Niech więc  $a^* \in L^*$  będzie generatorem  $L^*$ . Wtedy  $L = K(a^*)$ .
2.  $K$  jest nieskończone.

Dowód przez indukcję względem  $n$ . Dla  $n = 1$  jest oczywiste. Robimy więc krok indukcyjny  $(n - 1) \implies n$ :

$$K(a_1, \dots, a_{n-1}) = K(b)$$

$$K(a_1, \dots, a_{n-1}, a_n) = K(b, a_n)$$

Niech teraz  $k$  będzie stopniem  $b$  nad  $K$ , a  $m$  - stopniem  $a_n$  nad  $K(b)$ . Z lematu 6.7 wiemy, że istnieją  $f_1, \dots, f_k \in \text{Gal}(\hat{K}/K)$  takie, że  $f_1(b), \dots, f_k(b)$  są parami różne. Niech więc  $f_{1,1}, \dots, f_{1,m} \in G(\hat{K}/K(b))$  takie, że  $f_{1,1}(a), \dots, f_{1,m}(a)$  są parami różne.

Dla  $i = 1, \dots, k, j = 1, \dots, m$  niech  $f_{i,j} = f_i \circ f_{1,j} \in \text{Gal}(\hat{K}/K)$ .

$$\begin{array}{ccccc} K(b)(a) & \xrightarrow{f_{i,j}} & K(b, f_{1,j}(a)) & \xrightarrow{f_i} & K(f_i(b), f_i(f_{1,j}(a))) \\ \subseteq \uparrow & \searrow \subseteq & & \searrow \subseteq & \\ K(b) & \longrightarrow & K(f_i(b)) & & \\ \subseteq \uparrow & & \subseteq \uparrow & & \\ K & & K & & \end{array}$$

Zauważmy, że

$$\langle i, j \rangle \neq \langle i', j' \rangle \implies \langle f_{i,j}(a), f_{i,j}(b) \rangle \neq \langle f_{i',j'}(a), f_{i',j'}(b) \rangle,$$

bo są dwie możliwości:

- $i \neq i'$ , wtedy  $f_{i,j} = f_i(b) \neq f_{i'}(b) = f_{i',j'}(b)$
- $i = i' \wedge j \neq j'$ , wtedy  $f_{i,j}(a) = f_i(f_{1,j}(a)) \neq f_i(f_{1,j'}(a)) = f_{i',j'}(a)$ , bo  $f_{1,j}'(a) \neq f_{1,j'}'(a)$ .

Skoro  $K$  było nieskończone, to istnieje  $c \in K$  takie, że dla  $\langle i, j \rangle \neq \langle i', j' \rangle$  mamy

$$f_{i,j}(b) + f_{i,j}(a) \cdot c \neq f_{i',j'}(b) + f_{i',j'}(a) \cdot c,$$

bo

$$F(x) = \prod_{\langle i,j \rangle \neq \langle i',j' \rangle} [f_{i,j}(b) + f_{i,j}(a)x - (f_{i',j'}(b) + f_{i',j'}(a)x)]$$

i  $c$  po prostu nie jest pierwiastkiem  $F$ .

Postulujemy, że  $K(b, a_n) = K(a^*)$ , gdzie  $a^* = b + a_n c$  jest elementem pierwotnym.

$\supseteq$  jest jasne

$\subseteq f_{i,j}(a^*), 1 \leq i \leq k, 1 \leq j \leq m$  parami różne.

Wiemy, że  $\deg(a^*/K) \geq k \cdot m$ , z drugiej strony

$$k \cdot m \leq [K(a^*) : K] \leq [K(a_n, b) : K] = [K(b) : K][K(a_n, b) : K(b)] = km$$

czyli wszędzie wyżej są równości i mamy  $K(a^*) = K(a_n, b)$ .



## Wniosek 6.9.

1. Jeśli  $L = K(a_1, \dots, a_n)$  i  $a_i$  są rozdzielcze nad  $K$ , to  $L \supseteq K$  też jest rozdzielcze.
2.  $K \subseteq L$  jest rozdzielcze i  $L \subseteq M$  jest rozdzielcze, to  $K \subseteq M$  też jest rozdzielcze.

**Dowód.** 1. Niech  $L = K(a)$  i  $a$  jest rozdzielczy nad  $K$ . Załóżmy, że  $b \in L$  nie jest rozdzielczy nad  $K$ . Wtedy  $L = K(b, a)$ .

$$\begin{array}{ccccc} n \cdot m & & n & & m \\ \parallel & & \parallel & & \parallel \\ \deg(a/K) & = & \deg(b/K) \cdot \deg(a/K(b)) \\ \parallel & & \parallel & & \parallel \\ [K(a) : K] & = & [K(b) : K] \cdot [K(a, b) : K(b)] \end{array}$$

Wyberzmy teraz  $g \in K[X]$  takie, że  $g(a) = b$ . Wtedy

$$n \cdot m = |\{f(a) : f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)\}| = (\star),$$

bo  $a$  jest rozdzielczy nad  $K$ . Dalej,

$$(\star) = |\{(f(b), f(a)) : f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)\}| = (\star\star),$$

bo  $f(b)$  ma  $k < n$  możliwości, gdyż  $b$  nie jest rozdzielczy nad  $K$  i korzystamy z 6.7. Przy ustalonym  $f(b)$  skakać po  $f(a)$  możemy na co najwyżej  $m$  sposobów, bo  $\deg(a/K(b)) = m = \deg(f(a)/K(f(b)))$ . Czyli koniec końców

$$(\star\star) \leq k \cdot m < n \cdot m,$$

co daje sprzeczność.

2. Podobny dowód zostawiony studentowi do pokiwania głową, że rozumie a w duszy płacz bo co się dzieje?



## Wykład 7: Rozszerzenia radykalne (czysty Bangladesz)

Niech  $K \subseteq L \subseteq \widehat{K}$  jak zwykle. Wtedy

- ➡  $a \in L$  jest **czysto nierozdzielczy** nad  $K$ , czyli **radykalny**, gdy wielomian minimalny  $a$  nad  $K$ ,  $w_a(x) \in K[X]$ , ma tylko jeden pierwiastek w  $\widehat{K}$ .
- ➡  $K \subseteq L$  jest **rozszerzeniem radykalnym** (czysto nierozdzielczym), gdy dla każdego  $a \in L$   $a$  jest radykalne nad  $K$ .

### Uwaga 7.1.

1. Jeśli  $\text{char}(K) = 0$ , to  $a$  nad  $K$  jest czysto nierozdzielczy  $\iff a \in K$ .
2.  $a$  jest radykalne nad  $K \iff$  dla każdego  $f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)$   $f(a) = a$
3. Jeśli  $\text{char}(K) = p$ , to  $a$  jest radykalne nad  $K \iff$  istnieje  $n \geq 0$   $a^{p^n} \in K$ .

### Dowód.

1.  $w_a(x)$  ma tylko pierwiastki jednokrotne, gdy  $\text{char}(K) = 0$
2. Oczywiście  $\star$
3.  $\Leftarrow$  oczywiście:  $w_a(x) \in K[X]$  dzieli  $x^{p^n} - a^{p^n} = (x - a)^{p^n} \in K[X]$   
 $\Rightarrow$  Dowodzimy indukcją po  $n = \deg(a/K)$ . Niech  $w_a(x) = (x - a)^n \in K[X]$  i  $w'_a(x) = n(x - a)^{n-1} \in K[X]$  i  $w'_a \in I(a/K)$  gdy  $n > 1$ , czyli  $w'_a(x) = 0$ , więc  $p|n$ . Niech więc  $n = p \cdot n_1$  i wtedy  $w_a(x) = (x^p - a^p)^{n_1}$  i  $a^p$  jest radykalny nad  $K$ , bo  $\deg(a^p/K) \leq n_1 < n$ . Z założenia indukcyjnego istnieje  $k \geq 0$  takie, że  $(a^p)^{p^k} = a^{p^{k+1}} \in K$  i to jest to, czego szukaliśmy.



Niech  $K \subseteq L$  będzie rozszerzeniem algebraicznym. Definiujemy

1. **rozdzielcze domknięcie**  $K$  w  $L$ :  $\text{sep}_L(K) = \{a \in L : a \text{ radykalne nad } K\}$
2. **radykalne domknięcie** (czysto nierozdzielcze)  $K$  w  $L$ :  $\text{rad}_L(K) = \{a \in L : a \text{ radykalny nad } K\}$

**Wniosek 7.2.**  $K \subseteq \text{sep}_L(K)$  i  $\text{rad}_L(K) \subseteq L \subseteq \widehat{K}$  to ciała takie, że  $\text{sep}_L(K) \cap \text{rad}_L(K) = K$ .

**Dowód.** Fakt, że  $\text{sep}_L(K)$  jest ciałem wynika z 6.9. Natomiast to, że  $\text{rad}_L(K)$  jest ciałem wynika z tego, że

$$\text{rad}_L(K) = L \cap \bigcap_{f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)} \text{Fix}(f) = \{a \in \widehat{K} : f(a) = a\}$$

Dalej, dla  $a \in \text{sep}_L(K) \cap \text{rad}_L(K)$  mamy  $w_a(x) = x - a$  jest wielomianem minimalnym  $a$  nad  $K$ .



✿  $\widehat{K}^s = \text{sep}_{\widehat{K}}(K)$  jest rozdzielczym domknięciem  $K$

✿  $\widehat{K}^r = \text{rad}_{\widehat{K}}(K)$  jest radykalnym domknięciem  $K$ .

### Uwaga 7.3.

1. Gdy  $K \subseteq L \subseteq \widehat{K}$ , to  $\text{sep}_L(K) = \widehat{K}^s \cap L$ ,  $\text{rad}_L(K) = \widehat{K}^r \cap L$
2. Załóżmy, że  $K \subseteq L \subseteq M \subseteq \widehat{K}$ , wtedy  $K \subseteq L \subseteq M \iff K \subseteq M$   
 $\text{rad} \quad \text{rad} \quad \text{rad}$

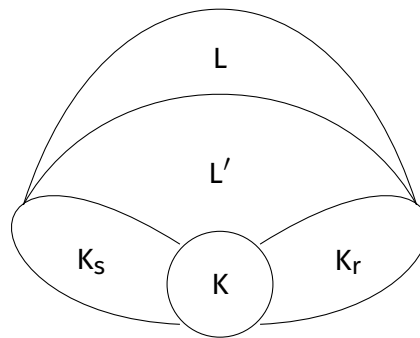
3. Jeśli  $\text{char}(K) = 0$ , to  $\text{sep}_L(K) = K^{\text{alg}}(L)$  i  $\text{rad}_L(K) = K$ , oraz  $\widehat{K}^S = \widehat{K}$ ,  $\widehat{K}^r = K$ .

**Fakt 7.4.** Załóżmy, że  $K \subseteq L \subseteq \widehat{K}$ ,  $K_S = \text{sep}_L(K)$ ,  $K_r = \text{rad}_L(K)$ ,  $L' = K_S \cdot K_r$  i niech  $L' = K_S \cdot K_r$  będzie złożeniem ciał  $K_S$  i  $K_r$  w  $L$  (tzn. ciało generowane w  $L$  przez  $K_S \cup K_r$ :  $L' = K_S(K_r) = K_r(K_S)$ ). Wtedy:

1.  $[L' : K] = [K_S : K] \cdot [K_r : K]$
2. Gdy  $K \subseteq L$  jest rozszerzeniem normalnym, to  $K_S \cdot K_r = L$
3.  $K_S \subseteq L$  jest radykalne, a  $K_r \subseteq L'$  rozdzielcze

**Dowód.** Jeśli  $\text{char}(K) = 0$ , to problem jest trywialny, bo  $K_r = K$ ,  $K_S = L$  i  $L' = L$ .

Założmy więc, że  $\text{char}(K) = p > 0$ .



1.  $L' = K_r(K_S) \supseteq K_r \supseteq K$ , więc:

$$[L' : K] = [K_r(K_S) : K_r][K_r : K]$$

Wystarczy pokazać, że  $[K_S : K] = [K_r(K_S) : K_r]$ .

Zadanie z listy 4: Załóżmy, że  $K \subseteq L, M \subseteq \widehat{K}$  są rozszerzeniami ciała takie, że  $L \cap M = K$ . Jeśli dla wszystkich  $L_0, M_0$  takich, że  $K \subseteq L_0 \subseteq L$  i  $K \subseteq M_0 \subseteq M$  są skończone i  $[L_0(M_0) : L_0] = [M_0 : K]$ , to  $[L(M) : L] = [M : K]$ .

W takim razie wystarczy, że pokażemy

$$[K_r(K_S) : K] = [K_S : K]$$

korzystając z zadania 4 (wyżej). Niech  $K \subseteq K_r^0 \subseteq K_r$  i  $K \subseteq K_S^0 \subseteq K_S$ , pierwsze rozszerzenia są skończone. Na mocy twierdzenia Abela możemy wybrać  $a \in K_S^0$  takie, że  $K_S^0 = K(a)$ . Wtedy również

$$K_r^0(K_S^0) = K_r^0(a)$$

i  $[K_S^0 : K] = \text{stopień } a \text{ nad } K$ ,  $[K_r^0(a) : K_r^0] = \text{stopień } a \text{ nad } K_r^0$ . Wystarczy pokazać, że oba te stopnie się zgadzają.

Niech  $n = [K(a) : K] = \text{stopień } a \text{ nad } K$ . Wtedy

$$1, a, \dots, a^{n-1}$$

to baza liniowa  $K(a)$  nad  $K$ . Przez to, że  $a$  jest rozdzielczy nad  $K$  i  $p = \text{char}(K)$ , to  $K(a) = K(a^p)$  [zad. 7 lista 4], czyli dla każdego  $l > 0$

$$1, a^{p^l}, \dots, a^{(n-1)p^l}$$

też jest bazą  $K(a)$  nad  $K$ .

Pokażemy, że  $1, a, \dots, a^{n-1}$  jest bazą liniową  $K_r^0(a)$  nad  $K_r^0$ :

- liniowa niezależność:

$$\sum k_i a^i = 0, \quad k_i \in K_r^0$$



Niech  $l$  będzie takie, że  $k_i^{p^l} \in K$  dla wszystkich  $i$ , wtedy

$$\sum k_i^{p^l} a_i^{p^l} = 0 \implies (\forall i) k_i = 0$$

Czyli  $[K_r^0(a) : K_r^0] \leq [K(a) : K] = n$  i  $1, a, \dots, a^{n-1}$  jest bazą  $K_r^0(a)/K_r^0$ .

2. Bez straty ogólności założmy, że  $[L : K] < \infty$ , bo

$$L = \bigcup_{\text{skon, norm}} \{L_0 : K \subseteq L_0 \subseteq L\}$$

(a) Niech  $a \in L \supseteq K_r$ , postulujemy, że  $a$  jest rozdzielczy nad  $K_r$ . Niech  $a = a_1, a_2, \dots, a_n$  będą wszystkimi pierwiastkami wielomianu  $w_a(X) \in K[X]$  i niech

$$v(x) = \prod_{i=1}^n (x - a_i).$$

Wtedy dla  $f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)$  mamy  $f[L] = L$ , więc  $f$  permutuje  $\{a_1, \dots, a_n\}$ . Stąd  $f(v(x)) = v(x)$ , czyli  $f$  zachowuje współczynniki  $v(x)$ . To oznacza, że  $v(x) \in K_r[X]$  i mamy, że  $a$  jest rozdzielczy nad  $K_r$ .

(b)  $L \supseteq K_s$  jest radykalne: z uwagi 6.6(3) wiemy, że jeśli  $a \in L$  to dla pewnego  $l$  mamy  $a^{p^l}$  jest rozdzielcze nad  $K$ . Czyli  $a^{p^l} \in K_s$ , więc  $a$  jest radykalny nad  $K_s$ .

Z podpunktów wyżej wiemy, że  $L \subseteq K_r \cdot K_s$  jest rozszerzeniem rozdzielczym i radykalnym, więc  $L = K_r \cdot K_s$ .

3.  $L \supseteq K_s$  jest radykalne w sposób analogiczny do rozumowania wyżej.  $L' \supseteq K_r$  jest rozdzielcze, bo  $L' = K_r[K_s]$ .



## 7.1 Stopień rozdzielczy, radykalny ciała

$$K \subseteq L \subseteq \widehat{K}$$

Definiujemy  $[L : K]_s = [\text{sep}_L(K) : K]$  jako **stopień rozdzielczy** ciała  $L$  nad  $K$  oraz  $[L : K]_r = [L : \text{sep}_L(K)]$  jako **stopień radykalny**  $L$  nad  $K$ .

Z wyników wyżej dostajemy

$$[L : K] = [L : K]_s \cdot [L : K]_r,$$

bo  $K \subseteq \text{sep}_L(K)$  jest rozdzielcze, a  $\text{sep}_L(K) \subseteq L$  jest radykalne.

**Uwaga 7.5.**  $K \subseteq L \subseteq \widehat{K}$

1. Jeśli  $K \subseteq L$  jest rozdzielcze, to  $[L : K] = |\{f \upharpoonright L : f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)\}| = |\{f : L \rightarrow \widehat{K} : f \upharpoonright K = \text{id}\}|$

2. Ogólnie,  $[L : K]_s = |\{f \upharpoonright L : f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)\}|$  (jak wyżej)

**Dowód.** Rozważamy  $[L : K] < \infty$ . Przypadek ogólny  $[L : K]$  można zredukować do przypadku skończonego, co jest ćwiczeniem na liście [wskazówka: rozważyć odpowiednią bazę liniową  $L$  nad  $K$ ]

1. Z twierdzenia Abela  $L = K(a)$  i dla  $f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)$ ,  $f \upharpoonright L$  jest wyznaczone jednoznacznie przez  $f(a)$ . Wiemy, że  $f(a) \in \{\text{pierwiastki } w_a(x)\}$ , których jest  $n = [L : K]$ .

2.  $L \supseteq K_s$  to rozszerzenie radykalne, więc  $f \upharpoonright L$  jest wyznaczone przez  $f \upharpoonright K_s$ . Dlatego:

$$|\{f \upharpoonright L : f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)\}| = |\{f \upharpoonright K_s : f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)\}| = [K_s : K] = [L : K_s] \overset{\text{sep}_L(K)}{=} [L : K]$$



**Uwaga.** Jeśli  $\text{char}(K) = p$  i  $[L : K]_r < \infty$ , to  $[L : K]_r$  jest potęgą  $p$ .

**Dowód.** Indukcja względem  $[L : K]_r = [L : K_s]$ . Bez starty ogólności założmy, że  $K = K_s$ . Niech  $a \in L \setminus K$ , wtedy  $a$  jest radykalne nad  $K$ , czyli istnieje minimalne  $l$  takie, że  $a^{p^l} \in K$ .

Niech  $a' = a^{p^{l-1}}$ , wtedy  $a' \in L \setminus K$  i  $(a')^p \in K$ , dlatego  $w_{a'}(x) = x^p - (a')^p$  i  $K \subseteq K(a') \subseteq L$ , pierwsze rozszerzenie ma stopień  $p$ , a drugie jest radykalne.

Mamy  $[L : K(a')] < [L : K]$ , więc z założenia indukcyjnego  $[L : K(a')] = p^r \implies [L : K] = p^{r+1}$



## Wykład 8: Przekształcenia liniowe


Od teraz  $K \subseteq L$  to będzie skończone rozszerzenie ciała,  $L$  będzie przestrzenią liniową nad  $K$  o wymiarze  $\dim_K L = [L : K]$ . Dla  $a \in L$  będziemy opisywać homomorfizm


$$f_a : L \rightarrow L$$

$$f_a(z) = a \cdot z$$

będący  $K$ -liniowym przekształceniem.

### 8.1 Norma, ślad

  $N_{L/K}(a) = \det(f_a)$  jest normą homomorfizmu  $f_a$

  $\text{Tr}_{L/K}(a) = \text{Tr}(f_a)$  jest śladem  $f_a$ .

**Fakt 8.1.** Niech  $\{f_1, \dots, f_k\} = \{f : L \rightarrow \hat{K} : f|_K = \text{id}\}$ ,  $k = [L : K]_s$  i  $a \in L$ . Wtedy

$$1. N_{L/K}(a) = \left[ \prod_{i=1}^k f_i(a) \right]^{[L:K]_r}$$

$$2. \text{Tr}_{L/K}(a) = [L : K]_r \cdot \sum_{i=1}^k f_i(a).$$

Rozważmy najpierw przypadek, gdy  $L_K(a)$  i  $a$  jest rozdzielczy nad  $K$ . Niech  $w_a(x) = x^k + a_{k-1}x^{k-1} + \dots + a_1x + a_0 \in K[X]$  będzie wielomianem minimalnym dla  $a$  nad  $K$ . Niech  $b_1 = a, \dots, b_n \in \hat{K}$  będą pierwiastkami  $w_a$  i możemy założyć bez straty ogólności, że  $b_i = f_i(a)$ . W takim razie, jeśli popatrzymy na  $w_a$  w  $\hat{K}$ , to mamy

$$w_a = \prod (x - b_i)$$

$$a_{k-1} = - \sum b_i$$

$$a_0 = (-1)^k \prod b_i$$

Na mocy zadania 4 z listy 5 dostajemy więc

$$N_{L/K}(a) = (-a)^k a_0 = \prod f_i(a)$$

$$\text{Tr}_{L/K}(a) = -a_{k-1} = \sum f_i(a)$$

**Dowód.** 1. Niech  $a \in L$ . Wtedy **O JEZU JA NIE MYŚLĘĘ**

2. Jeśli  $[L : K]_r \neq 1$ , to  $[L : K]_r = p^l$  dla  $l \geq 1$  i  $\text{Tr}(a) = 0$

$$(a) \ a \in K_s, \text{ to } \text{tr}_{L/K}(a) = [L : K_s] \cdot \text{Tr}_{K_s/K}(a) \underset{\text{char}(K)=p}{=} 0$$

$$(b) \ a \notin K_s, \text{ wtedy } w_a(x) \in K[X] \text{ nie jest rozdzielczy na mocy 6.6(4). Czyli } K[X^p] \ni w_a(x) = x^{tp} + a_{(t-1)p}x^{(t-1)p} + \dots. \text{ Stąd } a_{tp-1} = 0 = \text{Tr}_{L/K}(a) = [L : K(a)] \underbrace{\text{Tr}_{K(a)/K}(a)}_{=0}$$

3. Jeśli  $[L : K]_r = 1$ , to  $L = K$  i  $K \subseteq L$  jest rozdzielcze. Patrzymy na ciąg

$$K \subseteq K(a) \subseteq L$$

mamy

$$\text{Tr}_{L/K}(a) = [L : K(a)] \cdot \text{Tr}_{K(a)/K}(a)$$

Możemy wziąć  $b$  takie, że  $K(a, b) = L$ . Teraz liczymy homomorfizmy  $L \xrightarrow{\hat{K}} \hat{K}$



## 8.2 Rozszerzenia Galois

$$K \subseteq L \subseteq \widehat{K}$$

🐟 Mówimy, że rozszerzenie algebraiczne jest **Galois**, gdy dla każdego  $a \in L \setminus K$  istnieje  $f \in \text{Gal}(L/K)$  takie, że  $f(a) \neq a$ .

🐟 Niech  $G \leq \text{Aut}(L)$ . Wtedy **ciałem punktów stałych** grupy  $G$  nazywamy

$$L^G = \{a \in L : (\forall f \in G) f(a) = a\} = \bigcap_{f \in G} \text{Fix}(f)$$

**Uwaga:** Jeśli  $K \subseteq L$  jest algebraiczne, to  $K \subseteq L$  jest Galois  $\iff K = L^{G(L/K)}$  [ćwiczenia].

**Przykłady:**

1.  $L = K(a)$  i  $a$  jest algebraiczne nad  $K$ .  $w_a$  jest wielomianem minimalnym dla  $a$  i  $a = a_1, \dots, a_k$  są wszystkie pierwiastki  $w_a$  w  $L$ . Wtedy  $G(L/K) \ni f$  jest wyznaczone przez  $f(a) \in \{a_1, \dots, a_k\}$ . Stąd też  $|\text{Gal}(L/K)| \leq k \leq [L : K]$ .
2.  $L = K(a_1, \dots, a_k) \supseteq K$  jest ciałem rozkładu wielomianu  $w(x) \in K[X]$  ( $a_1, \dots, a_k$  to wszystkie pierwiastki  $w$  w  $L$ ).  $\text{Gal}(L/K) \ni f$  jest wyznaczone przez  $f \upharpoonright \{a_1, \dots, a_n\} \in \text{Sum}(\{a_1, \dots, a_n\})$  i istnieje monomorfizm  $G(L/K) \rightarrow \text{Sum}(\{a_1, \dots, a_n\})$  taki, że  $f \mapsto f \upharpoonright \{a_1, \dots, a_n\}$ .
3.  $\zeta_a \in \mathbb{C}$  jest pierwiastkiem pierwotnym z 1 stopnia  $m$ . Wtedy  $[\mathbb{Q}[\eta_1] : \mathbb{Q}] = \phi(m)$  i  $\eta_1 \in \{\zeta_1, \dots, \zeta_{\phi(m)}\} \subseteq \mathbb{C}$  to wszystkie pierwiastki pierwotne stopnia  $m$  z 1 w  $\mathbb{C}$ . Dowolny  $\text{Gal}(\mathbb{Q}[\zeta_1]/\mathbb{Q}) \ni f$  jest wyznaczony przez  $f(\zeta_1)$  (może być dowolny  $\zeta_i$ ,  $1 \leq i \leq m$ ), bo  $\text{Gal}(\mathbb{Q}[\zeta_1]/\mathbb{Q}) = \text{Gal}(\mathbb{Q}[\zeta_i]/\mathbb{Q})$ . Czyli  $f(\zeta_1) = \zeta_1^{l_f}$  dla pewnego  $0 < l_f < m$  takiego, że  $\gcd(m, l_f) = 1$ . Czyli  $\text{Gal}(\mathbb{Q}[\zeta_1]/\mathbb{Q}) \cong \mathbb{Z}_m^\times$  takie, że  $f \mapsto l_f$ .

**Twierdzenie 8.2.** Niech  $K \subseteq L$  będzie algebraiczne. Wtedy  $K \subseteq L$  jest Galois  $\iff K \subseteq L$  jest rozdzielcze i normalne.

**Dowód.** Bez starty ogólności niech  $L \subseteq \widehat{K}$

$\implies$  Niech  $a \in L \setminus K$  i niech  $a = a_1, \dots, a_n \in L$ , wszystkie parami różne, będą pierwiastkami  $w_a(x) \in K[X]$  w  $L$ .

Niech  $v(x) = (x - a_1)(x - a_2) \dots (x - a_n) \in L[X]$ , wtedy  $v(x) | w_a(x)$  i  $v(x)$  jest niezmienniczy względem  $\text{Gal}(L/K)$  [ $f$  permutuje  $a_1, \dots, a_n$ ]. Czyli  $v(x) \in L^{\text{Gal}(L/K)}[X] = K[X]$ , bo  $K \subseteq L$  jest Galois. Stąd  $w_a | v$ , więc  $v = w$  jest rozdzielczy i rozkłada się nad  $L$  na czynniki liniowe. Stąd wynika, że  $K \subseteq L$  jest rozdzielcze i normalne.

$\longleftarrow$

Weźmy  $a \in L \setminus K$  i niech  $w_a(x)$  będzie wielomianem minimalnym [rozdzielczym]. Istnieje  $a' \neq a \in L$  będące innym pierwiastkiem  $w_a$  w  $L$  (bo  $L$  normalne). Istnieje  $f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)$  takie, że  $f(a) = a'$ . Ponieważ  $K \subseteq L$  było normalne, to  $f[L] = L$  i mamy  $f \upharpoonright L \in \text{Gal}(L/K)$ ,  $f \upharpoonright L(a) \neq a$ , czyli z uwagi wcześniej  $K \subseteq L$  jest Galois. ☕

**Wniosek 8.3.** Załóżmy, że mamy  $K \subseteq L \subseteq M \subseteq \widehat{K}$ .  $K \subseteq M$  jest rozszerzeniem Galois  $\iff L \subseteq M$  jest Galois.

**Twierdzenie 8.4.** Twierdzenie Artina: niech  $G \leq \text{Aut}(L)$ , wtedy  $L^G \subseteq L$  jest rozszerzeniem Galois i  $[L : L^G] = |G|$ .

**Dowód.** Niech  $G \leq \text{Gal}(L/L^G)$ , wtedy:

- dla każdego  $x \in L \setminus L^G$  istnieje  $f \in \text{Gal}(L/L^G)$  takie, że  $f(x) \neq x$
- $L^G \subseteq L$  jest algebraiczne:

Niech  $a \in L \setminus L^G$ ,  $\{a = a_0, \dots, a_l\} = G(a)$  będzie orbitą  $a$  w  $L$ . Niech  $w(x) = (x - a_0)(x - a_1) \dots (x - a_n) \in L[X]$ . Wtedy dla każdego  $g \in G$  mamy  $g(w(x)) = w(x)$  i  $w \in L^G[X] \implies a$  jest algebraiczny nad  $L^G$ .

Ponieważ  $\deg(w) \leq |G|$ , to  $[L^G(a) : L^G] \leq |G|$ .  $L^G$  jest rozdzielczym rozszerzeniem  $L$ , co razem z twierdzeniem Abela daje nam  $[L : L^G] \leq |G|$  i  $L = L^G(a)$  dla pewnego  $a$ . Czyli  $w_a(x) \in L^G[X]$  jest wielomianem minimalnym  $a$  nad  $L^G$ , więc  $\deg(w_a) \leq |G|$ .

$L^G \subseteq L$  jest rozdzielcze i normalne. Czyli  $|\text{Gal}(L^G/L)| = \deg(w_a) = [L : L^G] \leq |G|$ . Ponieważ  $G \leq \text{Gal}(L/L^G)$ , to  $G = \text{Gal}(L/L^G)$  i  $[L : L^G] = |G|$



**Wniosek 8.5.** Niech  $K \subseteq L$  będzie skończonym rozszerzeniem Galois. Wtedy  $[L : K] = |\text{Gal}(L/K)|$

**Dowód.** Niech  $G = \text{Gal}(L/K)$ , wtedy  $K = L^G$  i  $G$  jest skończona i z twierdzenia Artina  $[L : K] = [L : L^G] = |G|$



$K \subseteq L \subseteq \hat{K}$ . Definiujemy

$$\mathcal{L} = \{L' : K \subseteq L' \subseteq L\}$$

$$\mathcal{G} = \{H : H \leq \text{Gal}(L/K)\}$$

Od razu pojawiają nam się naturalne homomorfizmy:

$$\Gamma : \mathcal{L} \rightarrow \mathcal{G}$$

$$L' \mapsto \text{Gal}(L/L') \leq \text{Gal}(L/K)$$

$$\Lambda : \mathcal{G} \rightarrow \mathcal{L}$$

$$G \mapsto [K \subseteq] L^G \subseteq L$$

**Twierdzenie 8.6.** Załóżmy, że  $K \subseteq L$  jest skończonym rozszerzeniem Galois. Wtedy  $\Gamma$  jest bijekcją i  $\Lambda = \Gamma^{-1}$ .

**Dowód.**

$$\mathcal{L} \ni L' \xrightarrow{\Gamma} \text{Gal}(L/L') \xrightarrow{\Lambda} L^{\text{Gal}(L/L')} = L',$$

bo  $L' \subseteq L$  jest Galois i używamy 8.3.

Czyli  $\Lambda \circ \Gamma = \text{id}_{\mathcal{L}}$ . Tak samo w drugą stronę:

$$\mathcal{G} \ni H \xrightarrow{\Lambda} L^H \subseteq K \xrightarrow{\Gamma} \text{Gal}(L/L^H) = H$$



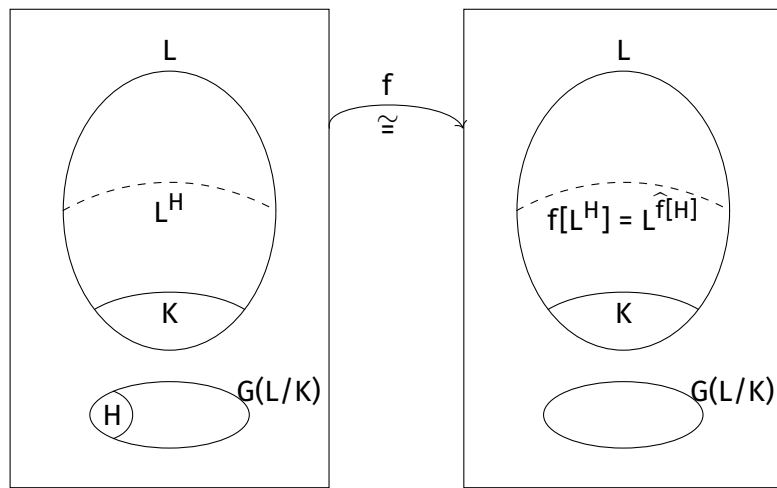
**Wniosek 8.9.** Załóżmy, że  $K \subseteq L$  jest skończone i Galois. Dla  $H \leq \text{Gal}(L/K)$  mamy  $H \triangleleft \text{Gal}(L/K) \iff K \subseteq L^H (= \Lambda(H))$  jest normalne (tzn. tutaj Galois).

Ponadto wtedy  $\text{Gal}(L^H/K) \cong \text{Gal}(L/K)/H$

Przed dowodem ćwiczenie, które pojawi się na liście zadań:

Niech  $K \subseteq L' \subseteq L \subseteq \hat{K}$  takie, że  $K \subseteq L$  jest normalne (może być też skończone). Wtedy  $K \subseteq L'$  jest normalne  $\iff$  dla każdej  $f \in \text{Gal}(L/K)$   $f[L'] = L'$  [ćwiczenia].

**Dowód.** Weźmy sobie  $f \in \text{Gal}(L/K)$  **RYSUNEK**



NIE ROZUMIEM



## Wykład 9: Rozszerzenia abelowe

### 9.1 Rozszerzenia abelowe

Założmy, że  $K \subseteq L$  jest skończonym rozszerzeniem Galois. Wtedy rozszerzenie  $K \subseteq L$  jest abelowe (cykliczne) gdy  $\text{Gal}(L/K)$  jest abelowe (cykliczne).

**Twierdzenie 9.3.** Założmy, że  $K \subseteq L_1 \subseteq L$  to rozszerzenia ciał. Jeśli  $K \subseteq L$  jest abelowe (cykliczne), to  $K \subseteq L_1$  i  $L_1 \subseteq L$  też takie są.

**Dowód.** Z tego, że  $\text{Gal}(L/L_1) \triangleleft \text{Gal}(L/K)$  wynika, że  $K \subseteq L_1$  i  $L_1 \subseteq L$  jest rozszerzeniem Galois i  $\text{Gal}(L_1/K) \cong \text{Gal}(L/K)/\text{Gal}(L/L_1)$ . Dlatego mamy  $\text{Gal}(L/L_1)$  i  $\text{Gal}(L_1/K)$  są abelowe (cykliczne). ☕

**Przykłady:**

- Niech  $K \subseteq \hat{K}$  i  $\zeta \in \hat{K}$  będzie pierwiastkiem pierwotnym stopnia  $n$  z 1.

$$\begin{array}{ccc} \text{Gal}(K(\zeta)/K) & \hookrightarrow & \mathbb{Z}_n^* \\ \psi & & \psi \\ f & \longmapsto & l_f \end{array}$$

$l_f$  wybieramy tak, żeby  $f(\zeta) = \zeta^{l_f}$   $0 < l_f < n$ . Gdy  $\text{char}(K) = 0$ , to homomorfizm wyżej jest izomorfizmem, wpp nie musi być to prawdą. Natomiast mamy pewność, że  $K(\zeta) \supseteq K$  jest rozszerzeniem abelowym.

- Niech  $\text{char}(K) = p$  i  $p \nmid n$ . Wybierzmy  $a \in K$  takie, że  $\sqrt[n]{a} \notin K$ . Założmy, że  $\zeta \in K$  jest pierwiastkiem pierwotnym z 1 stopnia  $n$ .

W takim przypadku,  $L = K(\sqrt[n]{a}) \supseteq K$  jest rozszerzeniem Galois i niech  $w(x) = x^n - a$  (niekoniecznie nierozkładalny). Pierwiastki  $w(a)$  w  $L$  mają postać  $\zeta^i \sqrt[n]{a}$  dla  $i = 0, \dots, n-1$ .

Niech  $f \in \text{Gal}(L/K)$  będzie wyznaczony przez  $f(\sqrt[n]{a}) = \zeta^{l_f} \sqrt[n]{a}$  dla  $0 \leq l_f < n$ . Wtedy funkcja jak wyżej, tzn.

$$\text{Gal}(L/K) \ni f \mapsto l_f \in \mathbb{Z}_n^*$$

jest monomorfizmem, ponieważ

$$\text{Gal}(L/K) \ni f \mapsto l_f$$

$$\text{Gal}(L/K) \ni g \mapsto l_g$$

$$(g \circ f)(\sqrt[n]{a}) = g(\zeta^{l_f} \sqrt[n]{a}) = \zeta^{l_f} g(\sqrt[n]{a}) = \zeta^{l_f} \zeta^{l_g} \sqrt[n]{a} = \zeta^{l_f + l_g} \sqrt[n]{a},$$

więc  $l_{g \circ f} = l_g + l_f$ . Z tego powodu,  $\text{Gal}(L/K)$  jest grupą cykliczną.

**Twierdzenie 9.4.** Założmy, że  $K \subseteq L$  jest rozszerzeniem cyklicznym takim, że  $[L : K] = n$ . Niech  $\zeta \in K$  będzie pierwiastkiem pierwotnym z 1 stopnia  $n$  (czyli  $p \nmid n$  gdy  $\text{char}(K) = p$ ). Wtedy  $(\exists a \in K) L = K(\sqrt[n]{a})$ .

**Dowód.** Niech  $\gamma \in \text{Gal}(L/K)$  będzie generatorem rozszerzenia  $L$  rzędu  $n$ . Dla  $b \in L$  niech

$$c(b) = b + \zeta \gamma(b) + \dots + \zeta^{n-1} \gamma^{n-1}(b)$$

$$\gamma(c(b)) = \gamma(b) + \zeta \gamma^2(b) + \dots + \zeta^{n-1} \underbrace{\gamma^n(b)}_{=b} = \zeta^{-1} c(b)$$

$$\gamma^i(c(b)) = \zeta^{-i} c(b), \quad i = 0, 1, 2, \dots$$

Jeżeli  $c(b) \neq 0$  [założenie ad hoc], to

$$\{\gamma^0(c(b)), \gamma(c(b)), \dots, \gamma^{n-1}(c(b))\}$$

jest  $n$ -elementowym zbiorem pierwiastków wielomianu  $w_{c(b)}(x) \in K[X]$ , czyli

$$[K(c(b) : K] \geq n \implies K(c(b)) = L,$$

bo  $K(c(b)) \subseteq L$ .

Mamy  $c(b)^n \in K$ , bo

$$\gamma^i(c(b)^n) = [\gamma^i(c(b))]^n = [\zeta^{-i}c(b)]^n = \zeta^{-in}c(b)^n = c(b)^n$$

dla wszystkich  $i = 0, 1, \dots, n-1$ . Dlatego  $c(b) = \sqrt[n]{a}$  dla  $a = c(b)^n \in K$  i  $L = K(\sqrt[n]{a})$ .

Wszystko to zachodzi pod warunkiem, że  $c(b) \neq 0$ , ale wiemy, że istnieje  $b \in L$  takie, że  $c(b) \neq 0$ , bo: ☕

**Twierdzenie 9.5.** Załóżmy, że  $\alpha_1, \dots, \alpha_n \in \text{Aut}(L)$ ,  $a_1, \dots, a_n \in L$  i każdy jest  $\neq 0$ . Wtedy

$$(\exists c \in L) \left( \sum a_i \alpha_i \right)(c) \neq 0$$

Innymi słowy:  $\alpha_1, \dots, \alpha_n$  są liniowo niezależne w przestrzeni  $L^L$  nad  $L$ .

**Dowód.** Indukcja względem  $n$ . Dla  $n = 1$  jest to oczywiste.  $c = 1 : a_1 \alpha_1(1) = a_1 \neq 0$ .

Krok indukcyjny:

Założmy nie prosty, że  $(\forall x \in L) \sum_{i=1}^{n+1} a_i \alpha_i(x) = 0$ . Niech  $a \in L$  dowolne różne od zera. Wtedy

$$\begin{aligned} (\forall x \in L) \sum_{i=1}^{n+1} a_i \alpha_i(ax) &= 0 \\ \sum_{i=1}^{n+1} (a_i \alpha_i(a)) \alpha_i(x) &= 0 \\ \sum_{i=1}^{n+1} a_i \alpha_i(a) [\alpha_{n+1}(a)]^{-1} \alpha_i(x) &= 0 \\ \underbrace{\sum_{i=1}^{n+1} a_i \alpha_i(x)}_{=0} - \sum_{i=1}^{n+1} a_i \alpha_i(a) \alpha_{n+1}(a)^{-1} \alpha_i(x) &= 0 \\ \sum_{i=1}^{n+1} \underbrace{[a_i - a_i \alpha_i(a) \alpha_{n+1}(a)^{-1}]}_{=0 \text{ gdy } i=n+1} \alpha_i(x) &= 0 \\ \sum_{i=1}^n [a_i - a_i \alpha_i(a) \alpha_{n+1}(a)^{-1}] \alpha_i(x) &= 0 \\ (1 - \alpha_{n+1}(a)^{-1}) \sum_{i=1}^n a_i \alpha_i(a) &= 0 \end{aligned}$$

Z założenia indukcyjnego wiemy, że cała ta suma nie jest zerem, więc zerem musi być  $1 - \alpha_{n+1}$ , czyli każdy poziom sumy po wymnożeniu jest zerem i:

$$a_i - a_i \alpha_i(a) \alpha_{n+1}(a)^{-1} = 0,$$

czyli  $\alpha_i(a) = \alpha_{n+1}(a)$  gdy  $a_i \neq 0$ . Z tego wynika, że dla każdego  $a \in L$  jest  $\alpha_i(a) = \alpha_{n+1}(a)$  i w takim razie  $\alpha_i = \alpha_n$ , co daje sprzeczność, bo  $\alpha_i$  były parami różne. ☕

## 9.2 Rozwiązywalne rozszerzenia ciał i rozszerzenia przez pierwiastki

Założmy, że  $K \subseteq L$  jest skończonym rozszerzeniem ciał.

1.  $K \subseteq L$  jest **rozszerzeniem rozwiązywalnym**, gdy  $K \subseteq L$  jest Galois i  $\text{Gal}(L/K)$  jest grupą rozwiązywalną.
2.  $K \subseteq L$  jest **rozszerzeniem ciała przez pierwiastki** [radicals], gdy istnieje  $k$  oraz

$$L \subseteq L_0 \supseteq L_1 \supseteq \dots \supseteq L_k = K$$



takie, że dla każdego  $i < k$   $L_i$  jest ciałem rozkładu wielomianu

- $x^{n_i} - b_i$ ,  $b_i \in L_{i+1}$  nad  $L_{i+1}$  ( $p \nmid n_i$  jeśli  $\text{char}(K) = p$ )
- lub  $x^p - x - b_i$  dla  $L_{i+1}$  nad  $L_{i+1}$

**Twierdzenie 9.6.** Załóżmy, że  $K \subseteq L$  jest rozszerzeniem skończonym ciał. Wtedy  $K \subseteq L$  jest rozszerzeniem przez pierwiastki  $\iff$  istnieje  $L' \supseteq L$  takie, że  $K \subseteq L'$  jest rozwiązywalne.

**Dowód.**  $\implies$

Możemy założyć, że  $K \subseteq L_0$  jest rozszerzeniem Galois (przez rozszerzenie ciąg), wtedy mamy ciąg normalny grup [ćwiczenie].

$$\text{Gal}(L_0/L_k) \triangleright \text{Gal}(L_0/L_{k-1}) \triangleright \text{Gal}(L_0/L_{k-2}) \triangleright \dots \triangleright \text{Gal}(L_0/L_1) \triangleright \{e\}$$

faktorami tego ciągu są  $\text{Gal}(L_i/L_{i+1})$ . Wystarczy pokazać, że  $L_i \supseteq L_{i+1}$  jest rozwiązywalna [wtedy można rozdrobić ciąg wyżej tak, by miał faktory abelowe].

Alternatywnie:  $H \triangleleft G$ , jeśli  $H$  jest rozwiązywalna i  $G/H$  jest rozwiązywalna, to  $G$  jest rozwiązywalna [ćwiczenie].

Rozważamy przypadki wielomianów z definicji wyżej:

- $x^{n_i} - b_i$

Niech  $a_i = \sqrt[n_i]{b_i} \in L_i$ . Wtedy  $L_i = L_{i+1}(\zeta_{n_i}, a_i)$ ,  $\zeta_{n_i}$  jest pierwiastkiem pierwotnym z 1 stopnia  $n_i$ .

$$L_i = L_{i+1}(\zeta_{n_i}, a_i) \stackrel{(\clubsuit)}{\supseteq} L_{i+1}(\zeta_{n_i}) \supseteq L_{i+1}$$

Ponieważ  $L_{i+1} \supseteq L_i$  jest rozszerzeniem Galois, to takie jest również rozszerzenie  $(\clubsuit)$  i

$\text{Gal}(L_{i+1}(\zeta_{n_i}, a_i) / L_{i+1}(\zeta_{n_i})) \cong \mathbb{Z}_{n_i}^*$  jest cykliczna i abelowa.

Również rozszerzenie  $L_{i+1} \subseteq L_{i+1}(\zeta_{n_i})$  jest Galois i grupa  $\text{Gal}(L_{i+1}(\zeta_{n_i}) / L_{i+1})$  jest abelowa.

Stąd

$$\text{Gal}(L_i / L_{i+1}) \stackrel{(\heartsuit)}{\triangleright} \text{Gal}(L_i / L_{i+1}(\zeta_{n_i})) \triangleright \{e\}$$

i faktor w  $(\heartsuit)$  jest izomorficzny do abelowej grupy  $\text{Gal}(L_i(\zeta_{n_i}) / L_{i+1})$ . Czy  $\text{Gal}(L_i / L_{i+1})$  jest rozwiązywalna stopnia  $\leq 2$ .

- $x^p - x - b_i$

Niech  $a \in L_i$  będzie pierwiastkiem wielomianu wyżej. Wtedy  $a + 1$  jest również pierwiastkiem, bo

$$(a + 1)^p - (a + 1) - b_i = a^p + 1^p - a - 1 - b_i = a^p - a - b_i = 0$$

Dlatego  $a, a + 1, \dots, a + (p - 1) \in L_i$  i wszystkie są pierwiastkami wielomianu wyżej. Stąd  $L_i = L_{i+1}(a)$ .

Niech  $f \in \text{Gal}(L_i / L_{i+1})$  będzie wielomianem wyznaczanym przez  $f(a) = a + l_f$ . Przekształcanie

$$\text{Gal}(L_i / L_{i+1}) \ni f \mapsto l_f \in \mathbb{Z}_p^*$$

daje  $\text{Gal}(L_i / L_{i+1}) \hookrightarrow \mathbb{Z}_p^*$  (w istocie jest tutaj  $\cong$ ). Więc  $L_i \supseteq L_{i+1}$  jest rozszerzeniem cyklicznym, czyli rozwiązywalny,

$\longleftarrow$

Niech  $K \subseteq L$  będzie rozszerzeniem rozwiązywalnym. Pokażemy, że jest też rozszerzeniem pierwiastkowym.

Niech

$$\text{Gal}(L/K) \triangleright G_{k-1} \triangleright G_{k-2} \triangleright \dots \triangleright G_0 = \{e\}$$

będzie ciągiem normalnym podgrup o faktorach abelowych i bez straty ogólności cyklicznych, prostych, tzn.  $\cong \mathbb{Z}_q$ ,  $q$  - liczba pierwsza. Wtedy

$$\begin{array}{ccccccc} L & = & L^{G_0} & \supseteq & L^{G_1} & \supseteq & \dots \supseteq K \\ & & \parallel & & \parallel & & \parallel \\ & & L_0 & \supseteq & L_1 & \supseteq & \dots \supseteq L_k \end{array}$$

jest ciągiem rozszerzeń cyklicznych, prostych.

**Claim:** Wystarczy teraz pokazać, że jeśli  $K \subseteq L$  jest cykliczne,  $L \subseteq \widehat{K}$  i  $\text{Gal}(L/K)$  jest prosta, to  $K \subseteq L$  jest pierwiastkowe.

**Dowód na boczku:** Niech  $[L : K] = n$ ,  $\text{Gal}(L/K) \cong \mathbb{Z}_n^*$ , a  $n$  jest liczbą pierwszą. Rozważamy przypadki charakterystyk ciał:

- $\text{carh}(K) = p \neq n$  lub  $\text{char}(K) = 0$

Niech  $\zeta \in \widehat{K}$  będzie pierwiastkiem pierwotnym z 1 stopnia  $n$ . Mamy, że  $K \subseteq K(\zeta)$  i  $K(\zeta) \subseteq L(\zeta)$  jest rozszerzeniem Galois. Dalej,  $[L(\zeta) : K(\zeta)] [L : K]$ , bo  $\text{Gal}(L(\zeta)/K(\zeta)) \hookrightarrow \text{Gal}(L/K) \cong \mathbb{Z}_n^*$ . Niech  $m = [L(\zeta) : K(\zeta)]$ , czyli  $m = 1$  lub  $m = n$ . Z twierdzenia 9.4 dostajemy

$$L(\zeta) = K(\zeta)(\sqrt[n]{a}), \quad a \in K(\zeta)$$

gdy  $m = n$ . Gdy  $m = 1$  jest trywialne.

- $\text{char}(K) = p = n$

Niech  $\gamma \in \text{Gal}(L/K)$  będzie generatorem. Z twierdzenia Dedekinda (9.5) wiemy, że istnieje  $b \in L$  takie, że

$$K \in \text{Tr}_{L/K}(b) = \sum_{i=0}^{p-1} \gamma^i(b) \neq 0$$

Dla  $b' = \frac{1}{K}b$  mamy  $\text{Tr}_{L/K}(b') = 1$ .

Niech  $a = \gamma(b') + 2\gamma^2(b') + \dots + (p-1)\gamma^{p-1}(b')$ . Wtedy

$$\gamma(a) = \gamma^2(b') + 2\gamma^3(b') + \dots + \underbrace{(p-1)\gamma^p(b')}_{=b'} = a - \text{Tr}_{L/K}(b') = a - 1,$$

ale

$$\gamma(a^p - a) = \gamma(a)^p - \gamma(a) = (a-1)^p - (a-1) = a^p - a$$

więc  $a^p - a \in \text{Fix}(\gamma) = K$ . Niech  $c = a^p - a$ . Stąd  $a$  jest pierwiastkiem  $x^p - x - c$  oraz  $L$  to ciało rozkładu  $x^p - x - c$  nad  $K$ , więc  $K \subseteq L$  jest pierwiastkowe.



## Przykłady:

1. Niech  $S_n := \text{Sym}(\{x_1, \dots, x_n\})$  będzie grupą funkcji symetrycznych o  $n$  zmiennych,  $L = K(x_1, \dots, x_n)$  i  $M = K(x_1, \dots, x_n)^{S_n}$ . Wiemy, że  $S_n < \text{Aut}(L)$ . Z twierdzenia Artina wiemy, że  $K \subseteq L$  jest rozszerzeniem Galois oraz  $S_n = \text{Gal}(L/M)$ .

W przypadku, gdy  $n \geq 5$   $S_n$  nie jest rozwiązalna, więc  $M \subseteq L$  też takie nie jest.  $L$  jest ciałem rozkładu wielomianu

$$\begin{aligned} M[T] \ni w(T) &= (T - x_1)(T - x_2) \dots (T - x_n) = \\ &= T^n - \sigma_1(\bar{x})T^{n-1} + \sigma_2(\bar{x})T^{n-2} + \dots + (-1)^{n-1}\sigma_{n-1}(\bar{x})T + (-1)^n\sigma_n(\bar{x}) \end{aligned}$$

gdzie  $\sigma_i(\bar{x}) = \sum_{1 \leq j_1 < \dots < j_i \leq n} x_{j_1} x_{j_2} \dots x_{j_i}$  to bazowe funkcje symetryczne (wzory Viete'a). Mamy  $\sigma_i(\bar{x}) \in M = L^{S_n}$ .

2. Gdy  $K \subseteq L$  jest rozszerzeniem ciał oraz  $L$  jest ciałem rozkładu nad  $K$  wielomianu  $w(x)$  stopnia co najwyżej 4, to  $\text{Gal}(L/K)$  wkłada się w  $S_4$ , a  $S_4$  jest grupą rozwiązywalną. Podgrupa grupy rozwiązywalnej jest nadal rozwiązywalna, więc równanie

$$w(x) = 0$$

jest rozwiązywalne przez pierwiastki.

Niech  $M = L^{\text{Gal}(L/K)}$ . Wtedy z twierdzenia Artina wiemy, że  $K \subseteq M$  jest radykalne, a  $M \subseteq L$  jest Galois (fakt 7.4.).  $\text{Gal}(L/M) = \text{Gal}(L/K) \implies M \subseteq L$  jest rozszerzeniem pierwiastkowym, tzn:

$$L \subseteq L_0 \supseteq L_1 \supseteq \dots \supseteq L_k = M,$$

wszystkie rozszerzenia  $L_i \supseteq L_{i+1}$  są rozszerzeniami o pierwiastki, więc wszystkie pierwiastki  $w(x)$  dają się wyrazić nad  $K$  poprzez stosowanie działań ciała (włączając dzielenie, odejmowanie) oraz "pierwiastkowanie" tj. branie rozwiązań wielomianów  $x^n - a$  lub  $x^p - x - a$ .

Gdy z kolei wielomian  $w(x)$  jest stopnia 5 to nie musi być to prawdą [ćwiczenie: czy dla 6, 7 powyższe zachodzi?]

**Fakt**  $K(\sigma_1, \dots, \sigma_n) = K(x_1, \dots, x_n)^{S_n}$

**Dowód.**  $\subseteq$  jasne

$\supseteq$

$$K(\vec{\sigma}) \subseteq K(\vec{x})^{S_n} \subseteq K(\vec{x})$$

$$n! = [K(\vec{x}) : K(\vec{x})^{S_n}] \leq [K(\vec{x}) : K(\vec{\sigma})] \leq n!,$$

z czego ostatnia nierówność zachodzi, bo  $K(\vec{x})$  jest ciałem rozkładu wielomianu

$$w(T) = (T - x_1) \dots (T - x_n)$$

nad  $K(\vec{\sigma})$ . Czyli mamy

$$[K(\vec{x}) : K(\vec{x})^{S_n}] = [K(\vec{x}) : K(\vec{\sigma})]$$

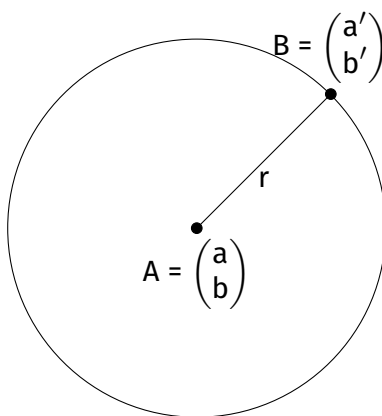
i zawieranie  $K(\vec{\sigma}) \subseteq K(\vec{x})^{S_n}$  jest tak naprawdę równością. ☕

Można też pokazać, że  $K[\sigma_1, \dots, \sigma_n] = K[x_1, \dots, x_n]^{S_n}$ , co jest **podstawowym twierdzeniem o wielomianach symetrycznych**.

**Zastosowania:** czyli konstrukcje przy pomocy cyrkla i linijki. Dane są punkty  $A \neq B \in \mathbb{R}^2$ .

• **cyrkiel**

Mamy okrąg  $\left\{ \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} : (x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2 \right\}$ :

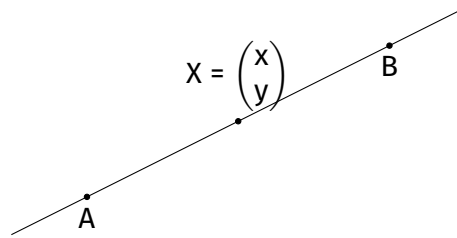


$$\text{czyli } r = \sqrt{(a' - a)^2 + (b' - b)^2}$$

- linijka

Rozważamy prostą  $L$  przechodzącą przez punkty  $A$  i  $B$ , czyli o równaniu

$$\begin{vmatrix} x-a & a'-a \\ y-b & b'-b \end{vmatrix} = 0$$



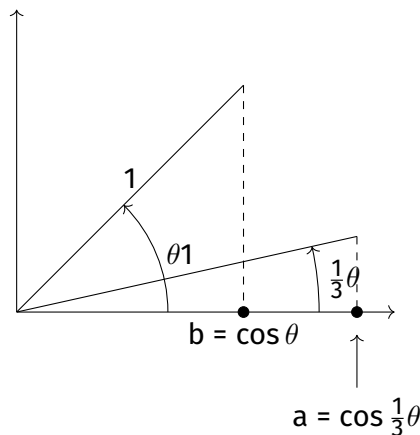
Niech  $(a_1, b_1), \dots, (a_n, b_n) \in \mathbb{R}^2$ . Punkt  $(a, b) \in \mathbb{R}^2$  jest konstruowany przy pomocy cyrkla i linijki na płaszczyźnie  $\mathbb{R}^2$  z punktów  $(a_1, b_1), \dots, (a_n, b_n)$  i punktów  $(0, 1), (1, 0) \iff$  rozszerzenie ciał  $K \subseteq K(a, b)$  jest rozszerzeniem przez pierwiastki stopnia  $\leq 2$ . Tutaj oczywiście  $K = \mathbb{Q}(a_1, b_1, \dots, a_n, b_n)$ .

- Kwadratura koła:

Dane jest koło o promieniu 1 i punkt  $(0, 1)$ . Szukamy kwadratu o polu  $\pi$ . Równoważnie problem można wyrazić jako szukanie punktu  $(0, \sqrt{\pi})$ . Ale  $\pi$  jest liczbą przestępną, więc  $\sqrt{\pi}$  też takie jest i rozwiązanie jest niemożliwe.

- Trysekcja kąta:

Dany jest kąt  $0 < \theta < \pi$  i naszym celem jest skonstruować kąt  $\frac{1}{3}\theta$ .



$a$  jest algebraiczne nad  $b$ , bo

$$4a^3 - 3a - b = 0.$$

Cel jest niemożliwy, gdyż  $[\mathbb{Q}(a, b) : \mathbb{Q}(b)] = 3$ .

- Podwojenie sześcianu o krawędzi jednostkowej, równoważnie skonstruowanie  $(0, a)$ , gdzie  $s^3 = 2$ . Również jest to niemożliwe.

## Wykład 10: Rozszerzenia przestępne ciał

$K \subseteq L$  to rozszerzenie ciał.

- 🐟  $K \subseteq L$  jest **przestępne**, gdy istnieje  $a \in L$  takie, że  $a$  jest przestępne nad  $K$  (tzn.  $I(a/K) = 0$ ).
- 🐟  $K \subseteq L$  jest **czysto przestępne**, gdy każde  $a \in L$  jest przestępne nad  $K$ .

**Uwaga 10.1.**  $a$  jest przestępne nad  $K \iff K(a) \cong K(x)$ .

**Dowód.** Ćwiczenia



Niech  $U = \hat{U}$  będzie (dużym) ciałem oraz  $K \subseteq U$  będzie podciałem. Niech  $F \subseteq K$  będzie podciałem prostym.

- 🐟  $\text{acl}_K : P(U) \rightarrow P(U)$  to operator algebraicznego domknięcia nad  $K$  taki, że dla  $A \subseteq U$   
 $\text{acl}_K(A) = K(A)^{\text{alg}} \subseteq U$ .
- 🐟  $A \subseteq U$  jest algebraicznie domknięte nad  $K$ , gdy  $A = \text{cl}_K(A)$ .

### 10.1 Własności

1.  $\text{acl}_K(\emptyset) = \hat{K}$
2. (a)  $A \subseteq B \implies \text{cl}_K(A) \subseteq (B)$  *monotoniczność*  
(b)  $A \subseteq \text{acl}_K(A)$   
(c)  $\text{acl}_K(\text{acl}_K(A)) = \text{acl}_K(A)$  *idempotentność*, tzn:  $\text{acl}_K$  jest operatorem domknięcia.
3.  $\text{acl}_K(A) = \bigcup_{\substack{A_0 \subseteq A \\ \text{sk.}}} \text{acl}_K(A_0)$  *skończony charakter*
4. *własność wymiany*  
$$a \in \text{acl}_K(A \cup \{b\}) \setminus \text{acl}_K(A) \implies b \in \text{acl}_K(A \cup \{a\})$$

**Dowód.**

$$3. [\text{acl}_K(A) =] K(A)^{\text{alg}} = \bigcup_{\substack{A_0 \subseteq A \\ \text{sk}}} K(A_0)^{\text{alg}}$$

$\subseteq$

Weźmy  $b \in K(A)^{\text{alg}}$ . Wtedy istnieje  $w(x) \in K(A)[X]$  takie, że  $w(b) = 0$  i  $w \neq 0$ .  $w$  ma współczynniki w  $K(A_0)$  dla pewnego skończonego  $A_0 \subseteq A$ , więc  $b \in K(A_0)^{\text{alg}}$ .

4. Jeśli  $a \notin \underbrace{(K(A)^{\text{alg}})}_{=L}$ , to wtedy  $b \notin K(A)^{\text{alg}}$ , tzn.  $b$  jest przestępny nad  $L$  i  $L(b) \cong L[Y]$ . Jest tak, bo

$$b \in K(A)^{\text{alg}} \implies a \in K(A, b)^{\text{alg}} = K(A)^{\text{alg}}$$

Niech teraz  $a \in K(A, b)^{\text{alg}}$  i dla wygody oznaczmy  $L = K(A)^{\text{alg}}$ . Wtedy  $K(A, b)^{\text{alg}} = L(b)^{\text{alg}}$ . Wtedy istnieje  $w(x) \in L[X]$ ,  $w(a) = 0$  i stopień  $w$  jest niezerowy.

Bez straty ogólności:  $w(x) \in L[b][X]$  (bo  $L(b)$  jest ciałem ułamków pierścienia  $L[b]$ ).

$$w(x) = \underset{\neq 0}{c_n} x^n + \dots + c_1 x + c_0$$

$c_i \in L[b]$ , tzn.  $c_i = v_i(b)$  i  $v_i \in L[Y]$ . Niech

$$\underset{\in L[a][y]}{v(y)} = v_n(y) \cdot a^n + \dots + v_1(y) \cdot a + v_0(y).$$

$$\left. \begin{array}{l} v(b) = 0 \\ v \neq 0[\text{ćwiczenia}] \end{array} \right\} \Rightarrow b \in \text{acl}_K(A \cup \{a\}) = L(a)^{\text{alg}}$$



➡  $A \subseteq U$  jest **algebraicznie niezależny** nad  $K$ , gdy dla każdego  $a \in A$   $a \notin \text{acl}_K(A \setminus \{a\})$ .

Równoważnie: dla każdego  $n$  i dla wszystkich  $a_1, \dots, a_n \in A$  parami różnych, dla każdego  $w(x_1, \dots, x_n) \in K[\bar{X}]$   $w(\bar{a}) \neq 0$ .

➡  $A$  jest **bazą przestępną zbioru**  $B \subseteq U$  nad  $K$ , gdy  $A$  jest algebraicznie niezależny nad  $K$  i  $A \subseteq B \subseteq \text{acl}_K(A)$ .

➡ **wymiar przestępny**  $B$  nad  $K$   $\text{trdeg}_K(B)$  to moc jakiejkolwiek bazy przestępnej zbioru  $B$  nad  $K$ .

➡ Gdy  $K = F$  jest ciałem prostym, to pomijamy je w  $\text{acl}_K$ ,  $\text{trdeg}_K$ . Jest to uzasadnione przez następujące twierdzenie.

## Twierdzenie 10.2.

1. Jeśli  $A \subseteq B \subseteq U$  i  $A$  jest algebraicznie niezależny nad  $K$ , to istnieje  $A'$ ,  $A \subseteq A' \subseteq B$ , czyli baza przestępna  $B$  nad  $K$ .
2. Każde dwie bazy przestępne zbioru  $B$  nad  $K$  są równoliczne.

**Dowód.** Ćwiczenia (patrz: dowód dla operatora  $\text{Lin}$  w przestrzeni liniowej)



### Przykład

1. Niech  $K$  będzie ciałem,  $x_i, i \in I$  zmiennymi oraz  $U = K(x_i : i \in I)^{\text{alg}}$ . Wtedy  $\{x_i : i \in I\} \subseteq U$  jest algebraicznie niezależne nad  $K$  i  $\text{trdeg}_K(U) = |I|$ .
2. Jeśli  $K \subseteq L \subseteq U$  oraz  $\{a_i : i \in I\}$  jest bazą przestępną  $L$  nad  $K$ , to

$$K(a_i : i \in I) \cong_K K(x_i : i \in I)$$

$$K \subseteq K(a_i : i \in I) \subseteq L$$

z czego pierwsze rozszerzenie jest czysto przestępne, a drugie - algebraiczne.

# Wykład 11: Moduły

## 10.1 Moduły wprowadzenie

Przestrzenie liniowe nad pierścieniami

**Definicja 10.3.** Niech  $R$  będzie pierścieniem z 1, niekoniecznie przemienny.  $(M, +, r)_r \in R$  jest modułem nad  $R$ , gdy spełnia aksjomaty przestrzeni liniowej nad  $R$ .

Moduł może być:

→ lewostronny, wtedy  $M \ni x \mapsto rx$  dla każdego  $r, x$  jest w  $M$

→ prawostronny (analogicznie,  $xr \in M$ ).

Łączność mnożenia w modułach:

lewostronna  
 $r_1(r_2m) = (r_1r_2)m$

prawostronna  
 $(mr_1)r_2 = m(r_1r_2)$

mieszana  
jeśli jesteśmy w lewostron-  
nym module:  
 $(mr_2)r_1 = m(r_2r_1)$   
i nie to samo co przy pra-  
wostronnym

**Przykłady:**

1.  $R = K$  to ciała,  $K$ -moduł to przestrzeń liniowa nad  $K$
2.  $G$  jest grupą abelową, wtedy  $G$  jest  $\mathbb{Z}$ -modułem
3.  $G$  jest grupą abelową, wtedy  $\text{End}(G)$  są pierścieniem z jednością ( $\text{id}_G$ ) i działaniami zdefiniowanymi dla  $f, g \in \text{End}(G)$ :

$$(f + g)(x) = f(x) + g(x)$$

$$(f \cdot g)(x) = f(g(x)).$$

Grupa  $G$  może być traktowana jako moduł nad  $\text{End}(G)$  z działaniem zadanym przez  $f \cdot x = f(x)$  dla  $f \in \text{End}(G)$  i  $x \in G$ .

4. Załóżmy, że  $j : R \rightarrow \text{End}(G)$  jest homomorfizmem pierścieni z 1. Wtedy  $j$  wyznacza na  $G$  strukturę  $R$ -modułu poprzez działanie:  $r \cdot x = j(r) \cdot x$  dla  $r \in R$  i  $x \in G$ .
5. Gdy  $R_1 \subseteq R$  jest podpierścieniem z 1, to  $R$  jest modułem nad  $R_1$ .
6. Gdy  $j : R_1 \rightarrow R$  jest homomorfizmem pierścieni z jednością i  $M = (M, +, r)_{r \in R}$  jest  $R$ -modułem, to  $M$  jest  $R_1$ -modułem z działaniem indukowanym przez  $j$ . To znaczy, dla  $r_1 \in R_1$  oraz  $x \in M$  mamy  $r_1 \cdot x := j(r_1) \cdot x$ .
7.  $R$  jest pierścieniem z jednością i  $I \subseteq R$  jest ideałem lewostronnym. Wtedy  $I$  jest  $R$ -modułem.

**Definicja 10.4.** Załóżmy, że  $M$  jest  $R$ -modułem oraz  $N \subseteq M$ . Wtedy  $N$  jest  $R$ -podmodułem  $M$ , gdy  $N$  jest modułem względem działań z  $M$ , to znaczy:

→  $(N, +) \leq (M, +)$

→  $N$  jest zamknięty względem mnożenia przez skalary  $r \in R$  w  $M$ .

**Uwaga 10.5.** Niech  $M$  będzie  $R$ -modułem, wtedy

1.  $0 \cdot m = 0 \in M$
2.  $r \cdot 0 = 0$
3.  $(-1)m = -m$

**Dowód.**

1.  $0 \cdot m = (0 + 0) \cdot m = 0m + 0m \implies 0m = 0$

$$2. r \cdot 0 = r(0 + 0) = r0 + r0 \implies r0 = 0$$

$$3. (-1)m + 1m = (-1 + 1)m = 0m = 0 \implies (-1)m = -m$$



**Uwaga 10.6.** Przekrój dowolnej niepustej rodziny podmodułów  $M$  jest podmodułem  $M$ .

**Przykład:**

$\{0\} \subseteq M$  jest podmodułem zerowym.

**Wniosek 10.6.** Niech  $A \subseteq M$ . Wtedy istnieje najmniejszy podmoduł (ze względu na zawieranie)  $N \subseteq M$  taki, że  $A \subseteq N$ . Jest to **podmoduł generowany przez  $A$**

$$N = \left\{ \sum r_i a_i : r_i \in R, a_i \in A \right\} \cup \{0\}$$

1. Jeśli  $N_1, N_2 \subseteq M$  są podmodułami, to  $N_1 + N_2$  też jest podmodułem. To samo, jeśli weźmiemy  $n$  takich podmodułów.
2. Produkt  $R$ -modułów  $M, N$ , czyli  $M \times N$ , też jest  $R$ -modułem
3.  $M = N_1 \oplus \dots \oplus N_k$  jest modułem dla  $N_1, \dots, N_k$  podmodułów  $M$ . Dodatkowo, dla każdego  $m \in M$  istnieją jedyne  $n_1, \dots, n_k$  takie, że  $m = n_1 + \dots + n_k$ .

**Homomorfizm modułów**  $h : M \rightarrow N$  działa tak samo jak zwykle. Nazwy izo-, endo-, auto-, mono- nadal są applicable.

Niech  $h : M \rightarrow N$  będzie homomorfizmem  $R$ -modułów. Dla  $N' \subseteq N$  podmodułu  $h^{-1}[N']$  jest podmodułem  $M$ . Dla  $M' \subseteq M$  podmodułem jest  $h[M'] \subseteq N$ .

O odwzorowaniu  $F : M_1 \times \dots \times M_n \rightarrow M$  mówimy, że jest  $n$ -liniowym odwzorowaniem  $R$ -modułów, gdy jest liniowe na każdej współrzędnej.

Dla  $M' \subseteq M$  podmodułu definiujemy **moduł ilorazowy** jako  $M/M' = \{m + M' : m \in M\}$ . Warstwy działają tutaj tak samo jak w grupach czy pierścieniach ilorazowych.

**Twierdzenie 10.7.** Zasadnicze twierdzenie o homomorfizmie  $R$ -modułów. Niech  $M, N$  będą modułami. Wtedy dla każdego  $f : M \rightarrow N$  istnieje dokładnie jeden  $\bar{f}$  taki, że

$$\begin{array}{ccc} M & \xrightarrow{\forall f} & N \\ \text{iloraz} \downarrow & \nearrow \exists! \bar{f} & \\ M/\ker(F) & & \end{array}$$

**Twierdzenie 10.8.** Niech  $f : M \rightarrow N$  i  $g : M \rightarrow U$  będą homomorfizmami  $R$ -modułów. Wtedy  $h : U \rightarrow N$  istnieje  $\iff \ker(g) \subseteq \ker(f)$ .

$$\begin{array}{ccc} M & \xrightarrow{f} & N \\ \downarrow g & \nearrow \exists h & \\ U & & \end{array} \iff \ker(f) \supseteq \ker(g)$$

Zbiór wszystkich homomorfizmów między modułem  $M$  i  $N$  oznaczamy

$$\text{Hom}_R(M, N) = \{h : M \rightarrow N : h \text{ jest homomorfizmem } R\text{-modułów}\}.$$

Tak jak w przypadku homomorfizmów między grupami czy pierścieniami, mamy  $h : M \rightarrow N$  jest różnowartościowe  $\iff \ker(h) = \{0\}$ .

Dla  $R$  będącego przemiennym pierścieniem  $\text{Hom}_R(M, N)$  można traktować jako  $R$ -moduł definiując działania dla  $m \in M$  przez:

$$\begin{aligned} (h_1 + h_2)(m) &= h_1(m) + h_2(m) & h_1, h_2 &\in \text{Hom}_R(M, N) \\ (rh)(m) &= r \cdot h(m) & r &\in R \end{aligned}$$



## 10.2 Cel: zrozumieć moduły

Dany jest  $R$ -moduł  $M$ . Gdy  $M = \bigoplus_i M_i$ , gdzie  $M_i \subseteq M$  jest małymi podmodułami o zrozumiałej strukturze, to struktura  $M$  też jest zrozumiała.

**Definicja 10.9.** Mówimy, że  $R$ -moduł  $M$  jest **prosty**, gdy  $M \neq 0$  i dla każdego  $N \subseteq M$  podmodułu,  $N = 0$ .

Pierścień endomorfizmów  $R$ -modułu  $M$  definiujemy jako

$$\text{End}_R(M) = \{h : M \rightarrow M : h - \text{homomorfizm modułów}\}.$$

Jest to podpierścień pierścienia  $\text{End}(M, +)$ , który traktuje  $M$  jako grupę względem dodawania.

**Lemat 10.10.** *Lemat Schura: jeśli  $M$  jest  $R$ -modulem prostym, to  $\text{End}_R(M)$  jest pierścieniem z dzieleniem (prawie ciało, poza tym, że nie musi być przemienny).*

**Dowód.** Niech  $0 \neq f \in \text{End}_R(M)$ . Wtedy  $\text{Im}(f) = M$ , bo jest to niezerowy podmoduł  $M$ , a  $M$  przecież było modulem prostym. Stąd właśnie  $\text{Im}$  jest całością.  $\ker(f) = \{0\}$ , czyli  $f$  jest 1-1 i "na". ☕

Założmy, że  $M$  jest  $R$ -modulem oraz  $K = \text{End}_R(M)$  jest pierścieniem z dzieleniem ("ciało nieprzemienne"). Uwaga! nie zakładamy prostości  $M$  (ale możliwe że to wyniknie z  $K$ -pierścienia z dzieleniem). Wtedy o  $M$  możemy myśleć jako o  $K$ -module. Założmy, że  $n = \dim_K(M) < \infty$ . Wtedy  $\text{End}_K(M) \cong M_{n \times n}(K)$ .

Wyberzmy  $r \in R$  i niech  $\phi_r : M \rightarrow M$  takie, że  $\phi_r(m) = r \cdot m$ . Wtedy  $\phi_r \in \text{End}_K(M)$  (? gdy  $R$ -przemienny? - zadanie)

$$\begin{array}{ccc} r & \longmapsto & m(\phi_r) \in M_{n \times n}(K) \\ \cup & & \\ R & \xrightarrow{\text{homomorfizm pierścieni z 1}} & M_{n \times n}(K) \end{array}$$

Powyższe jest rozwinięte jako teoria reprezentacji pierścieni

Niech  $R$  będzie pierścieniem z  $1 \neq 0$  i  $M$  będzie  $R$ -modulem.

🐟 Układ  $\{m_i\} \subseteq M$  jest **liniowo niezależny**, gdy

$$(\forall \{r_i\} \subseteq R) \sum r_i m_i = 0 \implies (\forall i) r_i = 0$$

🐟 Liniowa zależność jest zaprzeczeniem

🐟  $S \subseteq M$  jest liniowo niezależny, gdy układ  $\{m_i\} = S$  (bez powtórzeń)

🐟  $B \subseteq M$  jest bazą, gdy:

- jest liniowo niezależny
- generuje  $M$  jako  $R$ -moduł
- $\text{Lin}_R(B) = M$ .

**Przykład:**

1.  $\{0\} \subseteq M$  jest liniowo niezależny, natomiast układ  $(m_0, m_0)$  jest liniowo zależny, bo  $1 \cdot m_0 + (-1) \cdot m_0 = 0$ .
2.  $\mathbb{Q}$  jako  $\mathbb{Z}$ -moduł  $(a, b)$  jest liniowo zależny dla wszystkich  $a, b \in \mathbb{Q}$ .

Bez straty ogólności  $a, b \neq 0$  i  $a \neq b$ .  $a = \frac{m}{n}$ ,  $b = \frac{p}{q}$ , czyli

$$(np) \cdot a - (qm) \cdot b = pm - mp = 0$$

W takim razie,  $\mathbb{Q}$  nie ma bazy jako  $\mathbb{Z}$ -moduł.

### 11.3 Suma prosta modułów

(Abstrakcyjna) suma prosta rodziny modułów (koprodukt) to

$$\bigsqcup M_i = \bigoplus M_i = \{f \in \prod M_i : \{i \in I : f(i) \neq 0\} \text{ jest skończony}\}$$

Innymi słowy, elementy sumy prostej to krotki  $(m_1, \dots, m_n, \dots)$  takie, że tylko dla skończenie wielu  $i$  mamy  $m_i \neq 0$ . Dla każdego  $j$  istnieje naturalne włożenie  $f_j : M_j \rightarrow \bigsqcup M_i$  zdefiniowane przez  $f_j(m) = (0, \dots, 0, m, 0, \dots)$ , gdzie  $m$  występuje na  $j$ -tej pozycji.

Najprostszy przypadek sumy prostej to suma dwóch modułów:  $M \oplus N$ . Działania w tym module definiujemy przez:

$$\begin{aligned} (m_1 \oplus n_1) + (m_2 \oplus n_2) &= (m_1 + m_2) \oplus (n_1 + n_2) & m_i \in M, n_i \in N \\ r(m \oplus n) &= (rm) \oplus (rn) & r \in R, m \in M, n \in N. \end{aligned}$$

Przyjęto się uznawać za naturalne przekształcenie  $h : \bigoplus M_i \rightarrow M$  zadane przez

$$h(m_1, \dots, m_n, \dots) = \sum m_i \in M.$$

Stąd elementu  $\bigoplus M_i$  czasem oznacza się przez  $\sum m_i$ .

**Uwaga 11.1.** Jeśli dla każdego  $i \in I$  istnieje  $M_i \rightarrow M$  to istnieje dokładnie jeden  $h : \bigsqcup M_i \rightarrow M$  taki, że dla każdego  $i_0$

$$\begin{array}{ccc} M_{i_0} & \xrightarrow{g_{i_0}} & M \\ \downarrow f_{i_0} & \nearrow \exists! h & \\ \bigsqcup M_i & & \end{array}$$

Jest to nazywane własnością uniwersalności.

**Dowód.** Ćwiczenia



**Uwaga 11.2.**  $M = M_1 \oplus M_2$  dla podmodułów  $M_1, M_2 \subseteq M$ . Wtedy dla

$$g_i = \text{id}_{M_i} : M_i \rightarrow M$$

oraz  $h$  jak z uwagi 11.1

$$h : M_1 \sqcup M_2 \rightarrow M$$

jest izomorfizm modułów.

**Dowód.** Ćwiczenie, łatwy.



### 11.4 Baza modułu

**Definicja 11.3.**  $M$  jest **wolnym  $R$ -modułem**, gdy  $M$  ma bazę.

**Przykłady:**

1.  $R$  jest wolnym  $R$ -modułem z bazą  $\{1\}$ .
2.  $\mathbb{Q}$  nie jest wolnym  $\mathbb{Z}$ -modułem
3.  $\{M_i\}$  są rodziną wolnych  $R$ -modułów, wtedy  $\bigsqcup M_i$  jest wolnym  $R$ -modułem.

**Dowód.** Niech  $B_i \subseteq M_i$  będą bazami. Wtedy

$$f_{i_0} : M_{i_0} \xrightarrow{\cong} f_{i_0}[M_{i_0}] \subseteq \bigsqcup M_i$$

$$\bigcup f_i[B_i]$$

jest bazą  $\sqcup M_i$ .



**Uwaga 11.4.** Niech  $R$  będzie pierścieniem z jednością, a  $M$   $R$ -modułem. Niech  $A = \{a_i : i \in I\} \subseteq M$  będzie podzbiorem bez powtórzeń. Następujące warunki są równoważne:

1.  $A$  jest bazą
2. dla każdego  $m \in M$  istnieją jedyne  $r_i \in R$  takie, że  $m = \sum r_i a_i$  i jest ich skończony wielokrotność
3. dla każdego  $N$   $R$ -modułu dla każdej funkcji  $g : A \rightarrow N$  istnieje jedyna funkcja  $g' : M \rightarrow N$  indukowana przez  $g$ .

**Dowód.** (1)  $\iff$  (2) jak w algebrze liniowej.

(2)  $\implies$  (3)

Weźmy dowolny  $m \in M$ , wtedy

$$g'(m) = \sum r_i g(a_i)$$

jest jedyną dobrą definicją.

(3)  $\implies$  (1)

- $A$  generuje  $M$ :

Niech  $M' = \langle A \rangle \subseteq M$ . Rozważmy

$$\begin{array}{ccc} M & \xrightarrow{j} & M/M' \\ & \searrow 0 & \\ M & & \end{array}$$

$g = j \upharpoonright A = 0 \upharpoonright A = 0$ , więc na mocy (3)

$$\begin{array}{ccc} A & \xrightarrow{g=0} & M/M' \\ \downarrow \cap & \nearrow \exists! g' & \\ M & & \end{array}$$

- $A$  jest liniowo niezależne:

Założmy, że istnieje  $\sum r_{i_k} a_{i_k} = 0$ ,  $r_{i_k} \neq 0$ . Niech  $g : A \rightarrow R$  takie, że

$$g(a_i) = \begin{cases} 0 & i \neq i_0 \\ 1 & i = i_0 \end{cases}.$$

Na mocy (3) wiemy, że istnieje dokładnie jedno  $g' : M \rightarrow R$  takie, że

$$0 = g'(0) = g'(\sum r_i a_i) = \sum r_i g(a_i) = r_{i_0} \cdot 1 = r_{i_0} \neq 0$$

co daje sprzeczność.



**Uwaga 11.5.**

1. Jeśli  $A = \{a_i\}_{i \in I}$  jest bazą  $M$  to wtedy

(a)  $Ra_i$  jest podmodułem  $M$

(b)  $M = \bigoplus Ra_i$

2. Jeśli  $A$  jest dowolnym zbiorem, to istnieje  $R$ -moduł  $M$  o bazie  $A$ . Wtedy

$$M = \sqcup_{a \in A} R a$$

i wtedy  $R a \cong R$

**Przykład:**  $\mathbb{Z}$  jest modułem wolnym (wolna grupa abelowa).

**Twierdzenie 11.6.** Załóżmy, że  $R$  jest przemienny. Wtedy każde dwie bazy  $R$ -modułu  $M$  są równoliczne.

**Dowód.** Problem redukujemy do algebry liniowej. Niech  $I \triangleleft R$  będzie maksymalnym ideałem i niech  $M' = IM \subseteq M$  będzie podmodułem generowanym przez

$$\{im : i \in I, m \in M\}.$$

Wtedy, jeśli popatrzymy na  $M/M'$ , to ma on naturalną strukturę modułu nad  $R/I$ . Dla  $(m + M')$  i  $(r + I)$  definiujemy

$$(r + I)(m + M') = (rm + M')$$

oraz dodawanie jak w grupie ilorazowej.

Niech  $B_1, B_2 \subseteq M$  będą bazami  $M$ . Ustalmy ilorazowe homomorfizmy

$$j : M \rightarrow M/M'$$

$$l : R \rightarrow R/I.$$

Chcemy pokazać, że  $j[B_1], j[B_2]$  są bazami  $M/M'$  jako  $R/I$ -modułu.

• generowanie:

$$M \ni m = \sum r_i b_i \implies j(m) = \sum j(r_i b_i) = \sum [r_i b_i + M'] = \sum (r_i + I)(m_i + M') = \sum l(r_i)j(b_i)$$

• liniowa niezależność:

Naszym celem jest pokazać, że jeśli

$$\sum l(r_i)j(b_i) = 0 \implies l(r_i) = 0$$

to wtedy

$$j(\sum r_i b_i) = 0.$$

Wiemy, że  $\sum r_i b_i \in IM = M'$ . Dalej:

$$\sum r_i b_i = \sum r'_j m'_j$$

dla  $r'_j \in I$  oraz  $m'_j \in M$ . Niech więc  $m'_j = \sum s_{ij} b_i$  dla  $s_{ij} \in R$  oraz  $b_i \in B_1$ . Wtedy

$$\sum r'_j m'_j = \sum_{i,j} r'_j s_{ij} b_i = \sum_i \left[ \sum_j r'_j s_{ij} \right] b_i = \sum_i r_i b_i$$

Sokoro dla każdego  $i$  mamy  $r_i = \sum_j r'_j s_{ij} \in I$ , to dla każdego  $i$   $l(r_i) = 0$  w  $R/I$ . Więc  $j[B_1]$  jest liniowo niezależny w  $M/M'$  jako układ. Ponieważ możemy ustalić

$$j : B_1 \xrightarrow{1-1} j[B_1]$$

to  $B_1 \sim j[B_1]$  oraz  $B_2 \sim j[B_2]$ . Ale  $R/I$  jest ciałem, więc  $M/M'$  jest przestrzenią liniową nad  $R/I$ , więc ponieważ  $j[B_i]$  są bazami tej przestrzeni liniowej, to

$$j[B_1] \sim j[B_2]$$

$$B_1 \sim B_2$$



**Uwaga 11.7.** Każdy  $R$ -moduł  $M$  jest homomorficznym obrazem  $R$ -modułu wolnego.

**Dowód.** Taki sam jak dla:

- grupy wolnej
- wolnej grupy abelowej
- algebry wolnej w rozmaitości algebraicznej

Niech  $N = \bigsqcup_{m \in M} Rm$  będzie  $R$ -modułem wolnym o bazie  $M$ . Równie dobrze możemy wziąć  $N = \bigsqcup_{a \in A} Ra$ , gdzie  $A$  generuje  $M$ .

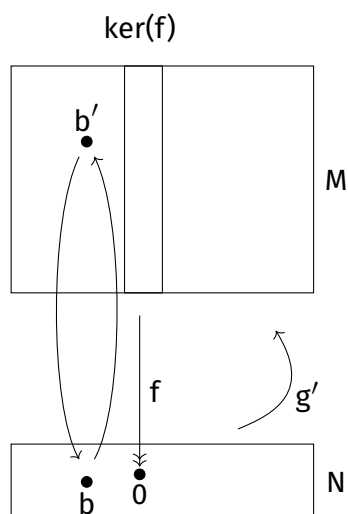
$$\begin{array}{ccc} \text{id} : M & \xrightarrow{\quad na \quad} & M \\ \cap & & \uparrow \\ (\exists! f) : N & \xrightarrow{\quad R\text{-liniowe} \quad} & M \end{array}$$

Z uwagi 11.4(3)  $f$  istnieje i jest epimorfizmem.



**Fakt 11.8.** Załóżmy, że  $M, N$  są  $R$ -modułami,  $N$  jest wolny i  $f : M \rightarrow N$  jest epimorfizmem. Wtedy  $M \cong \ker(f) \oplus N$ . Więcej: istnieje  $N' \cong N$  taki, że  $M = \ker(f) \oplus N'$ .

**Dowód.** Niech  $B \subseteq N$  będzie bazą modułu  $N$ .



Dla  $b \in B$  ustalamy  $b' \in M$  takie, że  $f(b') = b$ . Niech  $g : B \rightarrow M$  takie, że  $g(b) = b'$ . Z uwagi 11.4(3) wiemy, że istnieje jedyne  $g' : N \rightarrow M$   $R$ -liniowe takie, że  $g'$  rozszerza  $g$ .

Wtedy  $f \circ g' : N \rightarrow N$  i  $(f \circ g') \upharpoonright B = \text{id}_B$ , czyli z uwagi 11.4  $f \circ g' = \text{id}_N$ . Stąd  $g'$  jest 1-1. Czyli  $N \cong g'[N] \subseteq M$ .

Pokażemy teraz, że  $M = \ker(f) \oplus g'[N]$ . Weźmy dowolny  $m \in M$ . Wtedy

$$m = \underbrace{(m - (g'f)(m))}_{\ker(f)} + \underbrace{(g'f)(m)}_{g'[N]}$$

bo


$$f(m - (g'f)(m)) = f(m) - (fg')(m) - f(m) = 0.$$

Pozostaje nam pokazać, że  $\ker(f) \cap g'[N] = 0$ . Niech  $m \in \ker(f) \cap g'[N]$ . Wtedy  $m = g'(n)$ . Ale wtedy  $0 = f(m) = (fg')(n) = n$ . Wobec tego  $n = 0$ , więc  $m = g'(n) = g'(0) = 0$ .



## 11.5 Moduły projektywne, cykliczne, torsyjne


### Definicja 11.9.

 R-moduł  $N$  jest **projektywny**, jeśli dla każdego  $M$  i każdego epimorfizmu  $f : M \rightarrow N$  mamy  $M = \ker(f) \oplus M'$  dla pewnych podmodułów  $M' \subseteq M$ .

Jest to równoważne [ćwiczenia] istnieniu  $g : N \rightarrow M$  takiego, że  $f \circ g = \text{id}_N$ .

$$\begin{array}{ccc} & M & \\ \exists g \nearrow & & \downarrow \forall f \\ N & \xrightarrow{\text{id}} & N \end{array}$$

to znaczy, że  $f$  rozszczepia się.

 R-moduł  $M$  jest **iniektywny** wtedy, gdy dla każdego  $N$  i każdego monomorfizmu  $g : M \hookrightarrow N$  istnieje  $N' \subseteq N$  taki, że  $N = \text{Im}(g) \oplus N'$ . To znaczy, obraz  $g$  jest **składnikiem prostym**  $N$ .

#### Przykłady:

1. Moduł wolny jest projektywny
2. W przypadku, gdy  $R$  jest ciałem, to każdy  $R$ -moduł jest projektywny i iniektywny.

**Definicja 11.10.** Załóżmy, że  $R$  jest pierścieniem przemiennym z jednością. Mówimy, że  $M$  jest **R-modułem cyklicznym**, gdy jest generowany przez pojedynczy element. To znaczy, że istnieje  $a \in M$  takie, że

$$M = Ra.$$

#### Przykłady:

1.  $R = R1$  jest modułem cyklicznym
2.  $M$  jest  $R$ -modułem. i  $a \in M$ , to wtedy  $Ra \subseteq M$  jest podmodułem cyklicznym.


**Uwaga 11.11.**  $M$  jest modułem cyklicznym  $\iff M \cong R/I$  jako  $R$ -moduły dla pewnego  $I \triangleright R$ .


**Dowód.**  $\Leftarrow$   $R/I$  jest generowany przez  $1 + I$  i to jest koniec.


$\implies$


$M = aR$ , wtedy  $f : R \rightarrow M, r \mapsto ra$ , jest epimorfizmem  $R$ -modułów. Czyli jeśli  $I = \ker(f)$ , to  $R/I \cong M$ . ☕

### Definicja 11.12.

 Dla  $a \in M$   $I_a = \{r \in R : ra = 0\} \triangleright R$  jest **torsją** elementu  $a$ .

  $a$  jest **torsyjny**, gdy  $I_a \neq 0$ . W przeciwnym przypadku mówimy, że  $a$  jest **beztorsyjny**.

 Mówimy, że  $M$  jest **modułem torsyjnym**, gdy każdy jego element jest torsyjny.  $M$  jest **beztorsyjny**, gdy każdy niezerowy element jest beztorsyjny.

  $M_t = \{a \in M : a \text{ jest torsyjny}\}$  nazywamy **częścią torsyjną** modułu  $M$

### Uwaga 11.13.

1.  $M_t$  jest podmodułem  $M$
2.  $M/M_t$  jest beztorsyjny.

#### Dowód.

1. ćwiczenie
2. Załóżmy, że  $m + M_t$  jest torsyjny. Czyli  $r(m + M_t) = 0 + M_t$  dla pewnego  $r \neq 0$ . Ale to oznacza, że  $rm \in M_t$ . To znaczy, że  $r'(rm) = 0$  dla pewnego  $r' \neq 0$ . Ale wtedy  $(r'r)m = 0$  i  $r'r \neq 0$ , bo  $R$  jest dziedziną. Czyli  $m$  jest torsyjny i  $m \in M_t$ . W takim razie  $m + M_t = 0$



**Przykłady:** grupy abelowe torsyjne/beztorsyjne (jako  $\mathbb{Z}$ -moduły)

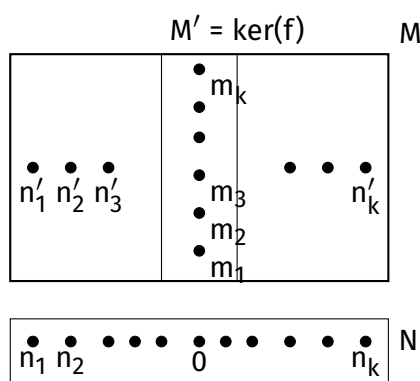
## 11.6 Moduły skończenie generowane

**Twierdzenie 11.14.**  $R$  jest pierścieniem przemiennym z  $1 \neq 0$ . Niech  $M, N$  będą  $R$ -modułami oraz  $f: M \rightarrow N$  jest epimorfizmem. Niech  $M' = \ker(f)$ ,  $N \cong M/M'$ .

1.  $N, M'$  są skończenie generowane, to  $M$  też jest skończenie generowane
2.  $M$  jest skończenie generowany, to wtedy  $N$  też taki jest

**Dowód.**

1. Niech  $\{n_1, \dots, n_k\} \subseteq N$  i  $\{m_1, \dots, m_l\} \subseteq M'$  będą zbiorami generatorów. Weźmy  $n'_1, \dots, n'_k \in M$  takie, że  $f(n'_i) = n_i$ .



W takim razie,  $\{n'_1, \dots, n'_k, m_1, \dots, m_l\}$  generują  $M$ , bo dla dowolnego  $x \in M$  mamy  $f(x) \in N$ , więc  $f(x) = \sum r_i n_i$  dla  $r_i \in R$ . Niech więc  $M \ni x' = \sum r_i n'_i$ . Wtedy  $f(x') = \sum r_i n_i$ , czyli  $f(x - x') = 0$  i mamy  $x - x' \in M' = \ker(f)$ . Więć  $M' \ni x - x'$ , z czego dostajemy  $x - x' = \sum r'_j m_j$  dla  $r'_j \in R$  i  $x = x' + (x - x') = \sum r_i n'_i + \sum r'_j m_j$ .

2. Ćwiczenie, łatwe.  $A \subseteq M \implies f[A]$  generuje  $N$ , gdzie  $A$  jest zbiorem generatorów  $M$ .



**Wniosek 11.15.** Załóżmy, że  $R$  jest pierścieniem przemiennym. Wtedy następujące warunki są równoważne:

1.  $R$  jest pierścieniem noetherowskim
2. Jeśli  $M$  jest skończenie generowanym  $R$ -modułem i  $N \subseteq M$  jest jego podmodułem, to  $N$  też jest skończenie generowany.

**Dowód.**

- (2)  $\implies$  (1) Niech  $I \triangleleft R$ . Zauważmy, że  $R = R \cdot 1$  jest skończenie generowanym  $R$ -modułem cyklicznym. Z tego względu,  $I \subseteq R$  również jest skończenie generowanym  $R$ -modułem. W takim razie, każdy ideał  $I \triangleleft R$  jest skończenie generowany i  $R$  jest pierścieniem noetherowskim.
- (1)  $\implies$  (2) Weźmy  $R$ -moduł  $M$  generowany przez  $\{m_1, \dots, m_l\}$ . Niech  $W = Rm_1 \oplus \dots \oplus Rm_l$  będzie  $R$ -modułem wolnym o bazie  $\{m_1, \dots, m_l\}$ .

Rozważmy epimorfizm  $\phi: W \rightarrow M$  zadany przez  $\phi(m_i) = m_i$  oraz podmoduł  $N \subseteq M$ :

$$\begin{array}{ccc} W & \xrightarrow{\phi} & M \\ \cup & & \cup \\ N' = \phi^{-1}[N] & & N \end{array}$$

Wystarczy pokazać, że  $N'$  jest skończenie generowanym podmodułem  $W$  (bo baza  $N$  będzie  $\leq$  niż baza  $N'$  przez fakt, że  $\phi$  jest surjekcją).

Indukcja względem ilości elementów bazy  $M$ :

- $l = 1$  Wtedy  $W \cong R$ . Niech  $\psi : W \xrightarrow{\cong} R$  oraz  $N'' = \psi[N']$  będzie podmodułem  $R$ . Podmoduły pierścienia to jego ideały. Z noetherowskości  $R$  mamy, że  $N'' = \psi[N']$  jest skończenie generowanym ideałem. W takim razie  $N'$  również jest skończenie generowany, gdyż  $\psi$  było izomorfizmem.
- $l > 1$  Załóżmy, że teza zachodzi dla wszystkich  $l' < l$ . Niech  $\pi : W \rightarrow R$  będzie rzutem na  $l$ -tą współrzędną (czyli ostatnią).

$$\begin{array}{ccc} W & \xrightarrow{\pi} & R \\ \cup & & \cup \\ N' & \xrightarrow{\phi|_{N'}} & \pi[N'] \end{array}$$

$\pi[N']$  jest podmodułem pierścienia  $R$ , więc działa jak ideał. Ideały w pierścieniu noetherowskim są skończenie generowane, czyli  $\pi[N']$  jest skończenie generowany.

Sprawdźmy teraz  $\ker(\phi|_{N'}) \subseteq \underbrace{R \times \dots \times R}_{l-1} \times \{0\} \cong \underbrace{R \times \dots \times R}_{l-1}$  jest podmodułem mod-

ułu o bazie z  $(l - 1)$  elementami, czyli na mocy założenia indukcyjnego  $\ker(\phi|_{N'})$  jest skończenie generowane. Na mocy twierdzenia 11.14(1)  $N'$  jest więc skończenie generowany ( $\pi|_{N'} : N' \rightarrow \pi[N']$  jest homomorfizmem,  $\ker(\pi|_{N'})$  jest skończenie generowany i  $\pi[N'] \cong N' / \ker(\pi|_{N'})$  również jest skończenie generowany).





## Wykład 12: Iloczyn tensorowy modułów

### 11.1 Funkcja dwuliniowa

**Definicja 11.16.** Niech  $R$  będzie pierścieniem przemennym z 1, a  $M_1, M_2, N$  będą  $R$ -modułami. Mówimy wówczas, że  $f : M_1 \times M_2 \rightarrow N$  jest **R-dwuliniowe**, gdy  $f$  jest  $R$ -liniowe na każdej współrzędnej, to znaczy

$$f(m_1 + m'_1, m_2) = f(m_1, m_2) + f(m'_1, m_2)$$

$$f(m_1, m_2 + m'_2) = f(m_1, m_2) + f(m_1, m'_2)$$

$$f(rm_1, m_2) = rf(m_1, m_2) = f(m_1, rm_2)$$

**Uwaga 11.17.** Zazwyczaj  $f$  jak w definicji wyżej nie jest  $R$ -liniowe.

$$\begin{aligned} f(m_1 + m'_1, m_2 + m'_2) &= f(m_1, m_2 + m'_2) + f(m'_1, m_2 + m'_2) = \\ &= f(m_1, m_2) + f(m_1, m'_2) + f(m'_1, m_2) + f(m'_1, m'_2) \neq f(m_1, m_2) + f(m'_1, m'_2) \end{aligned}$$

Zazwyczaj również  $\text{Im}(f) = f[M_1 \times M_2] \subseteq N$  nie jest podmodułem, ale generuje podmoduł  $[\text{Im}(f)] \subseteq N$ .

Chcemy znaleźć funkcję  $f : M_1 \times M_2 \rightarrow$  coś dwuliniową taką, że to "coś" jest  $R$ -modułem generowanym przez  $\text{Im}(f)$  i to "coś" jest tak duże jak to tylko możliwe.

Niech  $X$  będzie  $R$ -modułem wolnym o bazie  $\{\langle m_1, m_2 \rangle : m_1 \in M_1, m_2 \in M_2\}$

$$\begin{array}{ccc} M_1 \times M_2 & \xrightarrow{f_0} & X \\ & \searrow f=j \circ f_0 & \swarrow j \\ & & X/L \end{array}$$

Niech  $f_0 : M_1 \times M_2 \rightarrow X$  będzie funkcją zadaną przez

$$f_0(m_1, m_2) = \langle m_1, m_2 \rangle.$$

Taka funkcja nie jest 2-liniowa, czyli musimy utożsamić w  $X$  pewne elementy tak, aby  $f_0$  stało się 2-liniowe. Innymi słowy, chcemy znaleźć najmniejszy podmoduł  $L \subseteq X$  taki, że

$$f = j \circ f_0$$

jest  $R$ -dwuliniowe, gdzie  $j : X \rightarrow X/L$  jest odwzorowaniem ilorazowym.

### 12.2 Konstrukcja produktu tensorowego

**Fakt 12.1.** Odwzorowanie  $f : M_1 \times M_2 \rightarrow X/L$  jest  $R$ -dwuliniowe  $\iff$  dla wszystkich  $m_1, m'_1 \in M_1$  i  $m_2, m'_2 \in M_2$  oraz  $r \in R$  mamy:

- $\langle m_1 + m'_1, m_2 \rangle - [\langle m_1, m_2 \rangle + \langle m'_1, m_2 \rangle] \in L$
- $r\langle m_1, m_2 \rangle - \langle rm_1, m_2 \rangle \in L$
- $\langle m_1, m_2 + m'_2 \rangle - [\langle m_1, m_2 \rangle + \langle m_1, m'_2 \rangle] \in L$
- $r\langle m_1, m_2 \rangle - \langle m_1, rm_2 \rangle \in L$

**Dowód.** Łatwy [można przeczytać w "Commutative Algebra" ~ M. Atiyah].



## Definicja 12.2. Produkt tensorowy modułów $M_1$ i $M_2$ to funkcja

$$f : M_1 \times M_2 \rightarrow X/L,$$

gdzie  $X/L$  jak wyżej zwykle oznaczamy przez  $M_1 \otimes M_2$ . Element produktu tensorowego, czyli  $f(m_1, m_2)$ , oznaczamy przez  $m_1 \otimes m_2$ .

Analogicznie, dla  $M_1, \dots, M_k$  R-modułów, odwzorowanie R-k-liniowe  $f(m_1, \dots, m_k) := m_1 \otimes \dots \otimes m_k$  też jest produktem tensorowym.

**Tensory proste**  $m_1 \otimes m_2$  ( $m_1 \otimes \dots \otimes m_k$ ) generują  $M_1 \otimes M_2$  ( $M_1 \otimes \dots \otimes M_k$ ). Pozostałe elementy to **tensor złożone** i są to R-liniowe kombinacje tensorów prostych.

**Uwaga 12.3.** Dla każdego  $g : M_1 \times M_2 \rightarrow N$  R-dwuliniowego istnieje dokładnie jedno  $h : M_1 \otimes M_2 \rightarrow N$  R-liniowe takie, że diagram

$$\begin{array}{ccc} M_1 \times M_2 & \xrightarrow{\otimes=f} & M_1 \otimes M_2 \\ & \searrow g & \swarrow h \\ & N & \end{array}$$

komutuje. Warunek wyżej jest nazywany **warunkiem uniwersalności**

**Dowód.** Przyjrzyjmy się diagramowi:

$$\begin{array}{ccccc} & & M_1 \otimes M_2 = X/L & & \\ & \nearrow f & & \nwarrow j: \text{ilorazowe} & \\ M_1 \times M_2 & & & & X \leftarrow \text{R-moduł wolny o bazie } M_1 \times M_2 \\ & \searrow g & \nearrow h & \swarrow l: \text{R-homomorfizm} & \\ & & N & & \end{array}$$

$f_0 = \text{id}$  (na  $X$ ),  $l(\langle m_1, m_2 \rangle) = g(m_1, m_2)$

Warunek na funkcję  $l$  wyznacza ją jednoznacznie, gdyż  $X$  jest modułem wolnym, a my wyznaczyliśmy na co przechodzą elementy jego bazy.

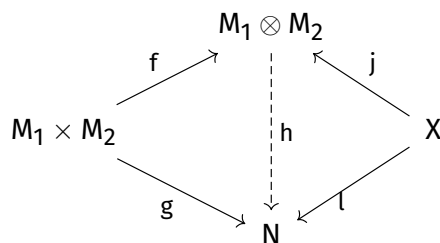
Jeśli funkcja  $g = f \circ f_0$  jest dwuliniowa, to  $\ker(l) \supseteq L$ , bo:

$$\begin{aligned} g(m_1 + m'_1, m_2) &= g(m_1, m_2) + g(m'_1, m_2) \implies \\ l(\langle m_1 + m'_1, m_2 \rangle) &= l(\langle m_1, m_2 \rangle) + l(\langle m'_1, m_2 \rangle) \implies \\ 0 &= l(\langle m_1 + m'_1, m_2 \rangle) - [l(\langle m_1, m_2 \rangle) + l(\langle m'_1, m_2 \rangle)] = \\ &= \underbrace{l(\langle m_1 + m'_1, m_2 \rangle - [\langle m_1, m_2 \rangle + \langle m'_1, m_2 \rangle])}_{\in L} = 0 \end{aligned}$$

Analogicznie dla pozostałych generatorów  $L$ . W takim razie,

$$\{\text{generatory } L\} \subseteq \ker(l) \implies \underbrace{L}_{\ker(j)} \subseteq \ker(l).$$

Z twierdzenia o faktoryzacji R-homomorfizmów istnieje dokładnie jedno  $h : M_1 \otimes M_2 \rightarrow N$  takie, że diagram



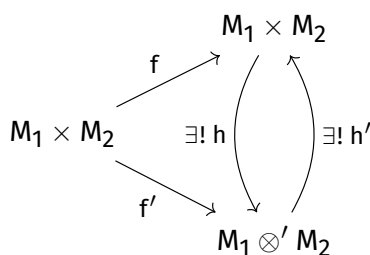
komutuje. Udowodnienie jedyności  $h$  zostawiamy jako ćwiczenie.



**Uwaga 12.4.** Warunek z uwagi 12.3 wyznacza  $M_1 \otimes M_2$  z dokładnością do  $\cong$ .

**Dowód.** Przy użyciu teorii kategorii.

Założmy, że  $M_1 \times M_2 \xrightarrow{f'} M_1 \otimes' M_2$  jest R-dwuliniowe i spełnia warunek



gdzie istnienie  $h$  i  $h'$  wynika z warunku

Zauważmy, że  $h \circ h' = \text{id}_{M_1 \otimes' M_2}$  oraz  $h' \circ h = \text{id}_{M_1 \otimes M_2}$ , czyli  $h$  jest izomorfizmem R-modułów i diagram wyżej komutuje.

**TE NOTATKI SĄ POURYWANE**



## Wykład 13: Własności produktu tensorowego

## Spis twierdzeń

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1  | Fakt . . . . .  | 4  |
| 1.2  | Uwaga . . . . .   | 4  |
| 1.3  | Uwaga . . . . .   | 5  |
| 1.4  | Uwaga . . . . .   | 6  |
| 1.5  | Uwaga . . . . .   | 6  |
| 1.6  | Twierdzenie . . . . .   | 7  |
| 1.7  | Wniosek . . . . .   | 7  |
| 1.8  | Fakt . . . . .  | 8  |
| 2.1  | Wniosek . . . . .   | 9  |
| 2.2  | Wniosek . . . . .   | 10 |
| 2.3  | Twierdzenie . . . . .   | 10 |
| 3.1  | Uwaga . . . . .   | 12 |
| 3.2  | Uwaga . . . . .   | 12 |
| 3.3  | Uwaga . . . . .   | 12 |
| 3.4  | Twierdzenie . . . . .   | 13 |
| 3.5  | Wniosek . . . . .   | 13 |
| 3.6  | Twierdzenie . . . . .   | 14 |
| 4.1  | Definicja . . . . .   | 15 |
| 4.2  | Uwaga . . . . .   | 15 |
| 4.3  | Uwaga . . . . .   | 15 |
| 4.4  | Definicja: <i>wielomian minimalny, stopień pierwiastka</i> . . . . .                            | 16 |
| 4.5  | Uwaga: $l(a/K) = (f) \implies \deg(f) = [K(a) : K]$ . . . . .                                   | 17 |
| 4.6  | Fakt: $\dim_K(M) = \dim_L(M) \cdot \dim_K(L)$ . . . . .   | 17 |
| 4.7  | Wniosek: $K_{\text{alg}}$ - podciałem . . . . .   | 18 |
| 4.8  | Definicja: <i>(relatywne) algebraiczne domknięcie</i> . . . . .                                 | 18 |
| 5.1  | Uwaga: <i>algebraiczne rozszerzenia ciał</i> . . . . .  | 20 |
| 5.2  | Uwaga: $(K_{\text{alg}}(L))_{\text{alg}}(L) = K_{\text{alg}}(L)$ . . . . .                      | 20 |
| 5.3  | Uwaga: $F_m \in \mathbb{Z}[X]$ . . . . .  | 20 |
| 5.4  | Uwaga: <i>lemat Gaussa: <math>F_m</math> nierozkładalny w <math>\mathbb{Q}</math></i> . . . . . | 21 |
| 5.5  | Uwaga: <i>pierwiastek pierwotny a <math>\dim_{\mathbb{Q}}(\mathbb{Q}(b))</math></i> . . . . .   | 22 |
| 5.6  | Lemat: <i>lemat Liouville'a o aproksymacji diofantycznej</i> . . . . .                          | 22 |
| 5.7  | Definicja: <i>algebraiczne domknięcie</i> . . . . .   | 23 |
| 5.8  | Uwaga: <i>istnieje algebraiczne domknięcie</i> . . . . .  | 23 |
| 5.9  | Twierdzenie: <i>jedyność domknięcia algebraicznego</i> . . . . .                                | 24 |
| 5.10 | Wniosek: $K \cong L \implies \hat{K} \cong \hat{L}$ . . . . .                                   | 24 |
| 5.11 | Uwaga: <i>algebraiczne rozszerzenie <math>1-1 \rightarrow \hat{K}</math></i> . . . . .          | 25 |
| 6.1  | Uwaga: <i>jednorodność <math>\hat{K}</math></i> . . . . .                                       | 26 |
| 6.2  | Uwaga . . . . .   | 26 |
| 6.3  | Twierdzenie: <i>rozszerzenie jest normalne</i> . . . . .  | 27 |
| 6.4  | Twierdzenie: <i>skończone i normalne <math>\iff</math> ciało rozkładu wielomianu</i> . . . . .  | 27 |
| 6.5  | Uwaga . . . . .   | 28 |
| 6.6  | Uwaga: <i>nierozkładalny a rozdzielczy</i> . . . . .  | 28 |
| 6.7  | Lemat . . . . .   | 28 |
| 6.8  | Twierdzenie: <i>Abela o elemencie pierwotnym</i> . . . . .                                      | 29 |
| 6.9  | Wniosek . . . . .   | 30 |
| 7.1  | Uwaga . . . . .   | 31 |
| 7.2  | Wniosek: <i>przekrój <math>\text{sep}_L</math> i <math>\text{rad}_L</math></i> . . . . .        | 31 |
| 7.3  | Uwaga . . . . .   | 31 |
| 7.4  | Fakt . . . . .  | 32 |
| 7.5  | Uwaga . . . . .   | 33 |
| 8.1  | Fakt . . . . .  | 35 |
| 8.2  | Twierdzenie . . . . .   | 36 |
| 8.3  | Wniosek . . . . .   | 36 |
| 8.4  | Twierdzenie: <i>Artin</i> . . . . .   | 36 |
| 8.5  | Wniosek . . . . .   | 37 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 8.6   | Twierdzenie: <i>podstawowe twierdzenie teorii Galois</i>                       | 37 |
| 8.9   | Wniosek  | 37 |
| 9.3   | Twierdzenie  | 39 |
| 9.4   | Twierdzenie  | 39 |
| 9.5   | Twierdzenie: <i>twierdzenie Dedekinda o liniowej niezależności charakterów</i> | 40 |
| 9.6   | Twierdzenie  | 41 |
| 10.1  | Uwaga  | 45 |
| 10.2  | Twierdzenie  | 46 |
| 10.3  | Definicja  | 47 |
| 10.4  | Definicja  | 47 |
| 10.5  | Uwaga  | 47 |
| 10.6  | Uwaga  | 48 |
| 10.6  | Wniosek  | 48 |
| 10.7  | Twierdzenie: <i>zasadnicze twierdzenie o homomorfizmie R-modułów</i>           | 48 |
| 10.8  | Twierdzenie: <i>o faktoryzacji</i>   | 48 |
| 10.9  | Definicja  | 49 |
| 10.10 | Lemat: <i>lemat Schura</i>   | 49 |
| 11.1  | Uwaga  | 50 |
| 11.2  | Uwaga  | 50 |
| 11.3  | Definicja  | 50 |
| 11.4  | Uwaga  | 51 |
| 11.5  | Uwaga  | 51 |
| 11.6  | Twierdzenie  | 52 |
| 11.7  | Uwaga  | 53 |
| 11.8  | Fakt   | 53 |
| 11.9  | Definicja  | 54 |
| 11.10 | Definicja: <i>moduł cykliczny</i>  | 54 |
| 11.11 | Uwaga: <i>cykliczny <math>\iff M \cong R/I</math></i>                          | 54 |
| 11.12 | Definicja: <i>torsje, moduł torsyjny</i>                                       | 54 |
| 11.13 | Uwaga  | 54 |
| 11.14 | Twierdzenie  | 55 |
| 11.15 | Wniosek  | 55 |
| 11.16 | Definicja: <i>R-dwuliniowe</i>   | 57 |
| 11.17 | Uwaga  | 57 |
| 12.1  | Fakt   | 57 |
| 12.2  | Definicja  | 58 |
| 12.3  | Uwaga  | 58 |
| 12.4  | Uwaga  | 59 |