

MAKING „WYJĄTKOWOŚĆ” RIGOROUS AGAIN,
CZYLI JUS’ A LI’L BIT O’ ALGEBRAICZNEJ ESCHATOLOGII
(MAWF ’25/26 1.III & 1.IV [RRS])



FIG. 1. Litografia Edvarda Muncha z 1909 r. pt. „*Alfa og Omega*” (Munchmuseet, Oslo, Norwegia).

SPIS TREŚCI

1. Pierwszy i Ostatni, Początek i Koniec	1
2. Uniwersalność jako ścisła miara wyjątkowości	3
3. Elementarne przykłady struktur uniwersalnych	4
3.1. Produkt i koprodukt w kategorii Set	4
3.2. Produkt i suma prosta w kategorii liniowej	7
3.3. Iloczyn tensorowy	13
Literatura	28
Zadania domowe	29

1. PIERWSZY I OSTATNI, POCZĄTEK I KONIEC

Dotychczasowa nasza zabawa z podstawowymi pojęciami teorii kategorii uwypukliła rolę porządkującą idiolektu „abstrakcyjnego nonsensu” w odniesieniu do wiedzy wcześniej przez nas oswojonej. To, rzecz jasna, rola niebłaha, lecz trudno byłoby usprawiedliwić wprowadzenie do gry tak ciężkiej artylerii, gdyby nie gwarantowała innych znaczących przewag na polu walki o ścisły sens, zwłaszcza – w kontekście fizykalnie interesującym. Pierwszą zapowiedzią takiej gwarancji (i zarazem znacznikiem głębszej zawartości „filozoficznej” teorii kategorii) jest Lemat Yonedy, wieńczący poprzedni cykl wykładów, na jego konkretne zastosowanie przyjdzie nam wszakże poczekać do końca następnego semestru, na którym czekają na nas supergeometryczne „smaczki”, pozwalające nadać sens teoriopółowym modelom pól fermionowych. Tymczasem chciałoby się móc

użyć metod teoriokategorialnych już na obecnym etapie, w konstrukcji interesujących nas struktur algebraicznych. Możliwość taką otwiera ścisła konceptualizacja (i formalizacja) „wyjątkowości” w formie definicji „własności uniwersalnej”, której poświęcimy najbliższe wykłady. Jak się wkrótce okaże, własność ta, gdy zastosować ją roztropnie, wyposaża nas w niebagatelną moc wnioskowania (i dowodzenia) w odniesieniu do struktur zadeklarowanych jako „uniwersalne” właśnie. Poniżej przekonamy się o tym na kilku prostych przykładach zakotwiczonych jeszcze w sylabusie elementarnego kursu algebry liniowej i wieloliniowej z 1. roku studiów, co pozwoli nam uwolnić nasze rozważania od trudności pojęciowej i tym sposobem – wyeksponować rolę nowo wprowadzonego narzędzia logicznego, którego pełnoformatową implementację przyniesie dyskusja algebr Clifforda.

Do precyzyjnego sformułowania pojęcia uniwersalności będziemy jeszcze potrzebować

Definicja 1. Przyjmijmy zapis Def. 1.1. Obiekt T kategorii $\mathcal{C}$ nazywamy **końcowym** (albo **terminalnym**), jeżeli dla każdego $X \in \mathcal{C}$ istnieje dokładnie jeden morfizm $\varphi \in \mathcal{C}(X, T)$, co będziemy oznaczać strzałką przerywaną,

$$X \dashrightarrow T ,$$

pozbawioną domyślnej (jedynej) etykiety φ . Analogicznie, obiekt I kategorii $\mathcal{C}$ nazywamy **początkowym** (albo **inicjalnym**), jeżeli dla każdego $X \in \mathcal{C}$ istnieje dokładnie jeden morfizm $\varphi \in \mathcal{C}(I, X)$, co zapiszemy jako

$$I \dashrightarrow X .$$

Obiekt kategorii będący zarazem końcowym i początkowym nosi miano **zerowego**.

Przykłady 1. (Obiekty końcowe i początkowe)

- (1) W kategorii **Set** z Przykł. 1 (1) obiektem końcowym jest (dowolny) singleton, początkowym zaś (jedynym) – zbiór pusty. Nie ma w niej obiektów zerowych.
- (2) W kategoriach **Grp**, **AbGrp** i pochodnych **Mod_R**, **Vect_K** z Przykł. 1 (2) obiektem zerowym jest (dowolna) struktura trywialna.
- (3) W kategorii **AbRing** z Przykł. 1 (2) obiektem końcowym jest pierścień trywialny, początkowym zaś – pierścień $\mathbb{Z}$.
- (4) Kategoria **Field** nie zawiera obiektów końcowych ani początkowych.

O wyjątkowości obiektów terminalnych i inicjalnych przesądza

Twierdzenie 1 (O jednoznaczności obiektów terminalnych i inicjalnych). Przyjmijmy notację Def. 1. Niechaj T_α , $\alpha \in \{1, 2\}$ będą dwoma obiektami terminalnymi w kategorii $\mathcal{C}$ i niech I_β , $\beta \in \{1, 2\}$ będą dwoma obiektami inicjalnymi w tejże kategorii. Istnieją jednoznacznie określone izomorfizmy (w kategorii $\mathcal{C}$)

$$\tau_{1,2} : T_1 \xrightarrow{\cong} T_2 , \quad \iota_{1,2} : I_1 \xrightarrow{\cong} I_2 .$$

Dowód: Rozważmy parę T_α , $\alpha \in \{1, 2\}$ obiektów terminalnych w $\mathcal{C}$. Terminalność T_1 implikuje istnienie dokładnie jednego morfizmu $\tau_{2,1} : T_2 \rightarrow T_1$, a terminalność T_2 – dokładnie jednego morfizmu $\tau_{1,2} : T_1 \rightarrow T_2$. Ich złożenie $\tau_{2,1} \circ \tau_{1,2}$ jest endomorfizmem T_1 , ale endomorfizmem takim jest też id_{T_1} , co wobec terminalności T_1 oznacza, że koniecznie

$$\tau_{2,1} \circ \tau_{1,2} = \text{id}_{T_1} .$$

Podobnie dowodzimy równości

$$\tau_{1,2} \circ \tau_{2,1} = \text{id}_{T_2} ,$$

która w połączeniu z poprzednią przesądza o izomorficznym charakterze $\tau_{1,2}$. W przypadku obiektów inicjalnych I_β , $\beta \in \{1, 2\}$ rozumowanie przebiega w pełni analogicznie. $\square$

2. UNIWERSALNOŚĆ JAKO ŚCISŁA MIARA WYJĄTKOWOŚCI

Pojęcia wprowadzone w poprzednim rozdziale pozwalają poddać stosownej formalizacji koncepcję „wyjątkowości”, co czynimy w poniższej

Definicja 2. Przyjmijmy zapis Def. 1. Niechaj $\mathcal{S}, \mathcal{R}$ i $\mathcal{C}$ będą kategoriami i niech $F_0 : \mathcal{S} \rightarrow \mathcal{C}$ oraz $F : \mathcal{R} \rightarrow \mathcal{C}$ będą funktorami kowariantnymi, X_0 zaś – obiektem kategorii $\mathcal{S}$. Wreszcie też niech $P_{X_0;F_0,F}(Y, \varphi)$ będzie zdaniem logicznym określającym *własność* pary $(Y, \varphi) \in \mathcal{R}_0 \times \mathcal{C}_1$ w odwołaniu do struktury $(X_0; F_0, F)$, przy czym umawiamy się, że posiadanie przez (Y, φ) własności $P_{X_0;F_0,F}$ jest reprezentowane przez wartość 1 zdania $P_{X_0;F_0,F}(Y, \varphi)$. Niechaj $\mathcal{R}_F|_{F_0}X_0$ będzie kategorią¹ o klasie obiektów

$$\text{Ob } \mathcal{R}_F|_{F_0}X_0 := \{ (Y, \varphi) \in \mathcal{R}_0 \times \mathcal{C}_1 \mid \varphi \in \mathcal{C}(F(Y), F_0(X_0)) \wedge P_{X_0;F_0,F}(Y, \varphi) \}$$

i klasach morfizmów

$$\mathcal{R}_F|_{F_0}X_0((Y_1, \varphi_1), (Y_2, \varphi_2)) := \{ \chi \in \mathcal{R}(Y_1, Y_2) \mid \varphi_2 \circ F(\chi) = \varphi_1 \},$$

ze złożeniem dziedziczonym z $\mathcal{R}$, lub kategoria $X_0F_0|_F\mathcal{R}$ o klasie obiektów

$$\text{Ob } X_0F_0|_F\mathcal{R} := \{ (Y, \varphi) \in \mathcal{R}_0 \times \mathcal{C}_1 \mid \varphi \in \mathcal{C}(F_0(X), F(Y)) \wedge P_{X_0;F_0,F}(Y, \varphi) \}$$

i klasach morfizmów

$$X_0F_0|_F\mathcal{R}((Y_1, \varphi_1), (Y_2, \varphi_2)) := \{ \chi \in \mathcal{R}(Y_1, Y_2) \mid F(\chi) \circ \varphi_1 = \varphi_2 \},$$

ze złożeniem dziedziczonym z $\mathcal{R}$.

Struktura końcowa (lub **terminalna**) dla $P_{X_0;F_0,F}$ to obiekt *końcowy* (T, τ) w kategorii $\mathcal{O}_F|_{F_0}X_0$. Definiującą własność tego obiektu, zwaną **własnością końcową** (lub **terminalną**), opisuje diagram przemienny

$$(1) \quad \begin{array}{ccccc} & & F(Y) & \xleftarrow{F \circ \text{pr}_1} & (Y, \varphi) \\ & \searrow \varphi & \downarrow F(\Psi) & & \downarrow \Psi \\ X_0 & \xrightarrow{F_0} & F_0(X_0) & \xleftarrow{\tau} & F(T) & \xleftarrow{F \circ \text{pr}_1} & (T, \tau) \\ \mathcal{S} & & \mathcal{C} & & \mathcal{R}_F|_{F_0}X_0 \end{array},$$

w którym (Y, φ) jest dowolnym obiektem w kategorii $\mathcal{R}_F|_{F_0}X_0$, a przerywana linia strzałki symbolizuje – zgodnie z przyjętą umową – „istnienie i jedyność” odnośnego morfizmu.

Struktura początkowa (lub **inicjalna**) dla $P_{X_0;F_0,F}$ to obiekt początkowy (I, ι) w kategorii $X_0F_0|_F\mathcal{R}$. Definiującą własność tego obiektu, zwaną **własnością początkową** (lub **inicjalną**), opisuje diagram przemienny

$$(2) \quad \begin{array}{ccccc} & & F(Y) & \xleftarrow{F \circ \text{pr}_1} & (Y, \varphi) \\ & \nearrow \varphi & \uparrow F(\Phi) & & \uparrow \Phi \\ X_0 & \xrightarrow{F_0} & F_0(X_0) & \xrightarrow{\iota} & F(I) & \xleftarrow{F \circ \text{pr}_1} & (I, \iota) \\ \mathcal{S} & & \mathcal{C} & & X_0F_0|_F\mathcal{R} \end{array},$$

w którym (Y, φ) jest dowolnym obiektem w kategorii $X_0F_0|_F\mathcal{R}$.

Struktury (wzgl. własności) terminalne i inicjalne noszą wspólne miano **struktur** (wzgl. **własności**) **uniwersalnych**.

¹Wybrany przez nas zapis nie bez kozery przypomina zapis stosowany w odniesieniu do tzw. kategorii *slice* i *coslice* stowarzyszonych z obiektem X_0 , cp. [Lei14, str. 59–60].

Sens uniwersalności łatwo wysłowić w języku potocznym: oto dowolne odwzorowanie transportujące strukturę rodzaju $\mathcal{C}$ z $F_0(X_0)$ (wzgl. do $F_0(X_0)$), a przy tym spełniające warunek $P_{X_0;F_0,F}(Y, \varphi)$, jest przeprowadzane, za pośrednictwem F -obrazu jedyne homomorfizmu indukowanego, przez F -obraz (obiektovej składowej) struktury inicjalnej (wzgl. terminalnej). Na pytanie o istnienie struktur uniwersalnych nie ma uniwersalnej odpowiedzi – tej trzeba każdorazowo poszukiwać w interesującym nas kontekście (np. algebraicznym). Można natomiast bardzo konkretnie skwantyfikować swobodę ich wyboru (będącą miarą ich jednoznaczności, więc wyjątkowości właśnie), co czyni poniższe

Twierdzenie 2 (O jednoznaczności struktur uniwersalnych). Przyjmijmy notację Def. 2. Niechaj (T_α, τ_α) , $\alpha \in \{1, 2\}$ będą dwiema strukturami terminalnymi dla $P_{X_0;F_0,F}$ i niech (I_β, ι_β) , $\beta \in \{1, 2\}$ będą dwiema strukturami inicjalnymi dla $P_{X_0;F_0,F}$. Istnieją jednoznacznie określone izomorfizmy

$$\tau_{1,2} : (T_1, \tau_1) \xrightarrow{\cong} (T_2, \tau_2)$$

w kategorii $\mathcal{R}_F|_{F_0}X_0$ oraz

$$\iota_{1,2} : (I_1, \iota_1) \xrightarrow{\cong} (I_2, \iota_2)$$

w kategorii $X_0|_{F_0}F\mathcal{R}$.

Dowód: Natychmiastowa konsekwencja Def. 2 i Tw. 1. □

Praktyczny sens udowodnionego twierdzenia jest oczywisty: każde dwie struktury uniwersalne możemy utożsamić, i to w jednoznaczny sposób, za pośrednictwem stosownego izomorfizmu $\tau_{1,2}$ (wzgl. $\iota_{1,2}$).

3. ELEMENTARNE PRZYKŁADY STRUKTUR UNIWERSALNYCH

Ażeby oswoić Czytelnika z pozornie dość ezoteryczną konstrukcją z Def. 2, rozważymy obecnie kilka konkretnych jej instancjacji, z którymi miał On najpewniej okazję zetknąć się w dotychczasowych swoich matematycznych i fizykalnych peregrynacjach.

3.1. Produkt i koprodukt w kategorii Set. Zaczniemy od

Definicja 3. Przyjmijmy zapis Def. 1.1 i 2 oraz Przykł. 1 (5) i ustalmy zbiór Λ oraz kategorię $\mathcal{C}$, z którymi stowarzyszymy kategorię $\mathcal{C}^\Lambda$ ciągów uogólnionych w $\mathcal{C}$ indeksowanych przez Λ , zawierającą funktorialny obraz $\mathcal{C}$ w postaci ciągów stałych.

Produkt rodziny $X. \in \mathcal{C}_0^\Lambda$ to struktura terminalna

$$\left(\prod_{\lambda \in \Lambda} X_\lambda, \{\pi_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda} \right)$$

dla warunku tautologicznego $P_{X.;\text{id}_{\mathcal{C}^\Lambda}, \Delta_{\mathcal{C};\Lambda}} \equiv 1$ na $\mathcal{C}_0 \times \mathcal{C}_1^\Lambda$. Morfizm π_λ określamy przy tym mianem **rzutu kanonicznego na (składową) X_λ** . Kategorię, w której istnieją produkty, określamy mianem **kategorii z produktami**. Przy tym ilekroć $|\Lambda| < \infty$, będziemy wymiennie używać symboli $\prod$ i $\times$.

Koprodukt rodziny $X. \in \mathcal{C}_0^\Lambda$ to struktura inicjalna

$$\left(\coprod_{\lambda \in \Lambda} X_\lambda, \{j_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda} \right)$$

dla tautologicznego warunku $P_{X.;\text{id}_{\mathcal{C}^\Lambda}, \Delta_{\mathcal{C};\Lambda}} \equiv 1$ na $\mathcal{C}_0 \times \mathcal{C}_1^\Lambda$. Morfizm j_λ określamy przy tym mianem **włożenia kanonicznego (składowej) X_λ** . Kategorię, w której istnieją koprodukty, określamy mianem **kategorii z koproduktami**.

Koprodukt w kategoriach $\mathcal{C} \in \{\mathbf{AbGrp}, \mathbf{AbRing}, \mathbf{Mod}_R, \mathbf{Vect}_\mathbb{K}\}$ i $\mathbf{Alg}_R$ (dla pierścienia R i ciała $\mathbb{K}$) jest najczęściej określamy mianem **sumy prostej** i oznaczany symbolem $\coprod \equiv \oplus$.

Wprost z definicji wynika naturalne rozszerzenie konstrukcji produktu i koproduktu na klasy morfizmów kategorii $\mathcal{C}$ – obserwację tę precyzujemy poniżej.

Stwierdzenie 1. Przyjmijmy zapis Def. 3 i niechaj

$$\left(\prod_{\lambda \in \Lambda} X_{\lambda}^{\alpha}, \{\pi_{\lambda}^{\alpha}\}_{\lambda \in \Lambda} \right), \quad \alpha \in \{1, 2\}$$

będą dwoma produktami odnośnych rodzin X^{α} . Dla dowolnej rodziny morfizmów $\chi_{\cdot} \in \mathcal{C}^{\tilde{\Lambda}}(X^1, X^2)$ istnieje dokładnie jeden morfizm

$$\prod_{\lambda \in \Lambda} \chi_{\lambda} \in \mathcal{C}\left(\prod_{\mu \in \Lambda} X_{\mu}^1, \prod_{\nu \in \Lambda} X_{\nu}^2\right),$$

który czyni poniższy diagram przemiennym

$$\begin{array}{ccc} \prod_{\mu \in \Lambda} X_{\mu}^1 & \xrightarrow{\pi_{\rho}^1} & X_{\rho}^1 \\ \prod_{\lambda \in \Lambda} \chi_{\lambda} \downarrow & & \downarrow \chi_{\rho} \\ \prod_{\nu \in \Lambda} X_{\nu}^2 & \xrightarrow{\pi_{\rho}^2} & X_{\rho}^2 \end{array}$$

Morfizm ten określamy mianem **produktu rodziny morfizmów** $\chi_{\cdot} \in \mathcal{C}_1^{\tilde{\Lambda}}$.

Jeśli ponadto dany jest trzeci produkt

$$\left(\prod_{\lambda \in \Lambda} X_{\lambda}^3, \{\pi_{\lambda}^3\}_{\lambda \in \Lambda} \right)$$

oraz rodzina morfizmów $\tilde{\chi}_{\cdot} \in \mathcal{C}^{\tilde{\Lambda}}(X^2, X^3)$, to dla zdefiniowanego przez nią produktu morfizmów $\prod_{\lambda \in \Lambda} \tilde{\chi}_{\lambda}$ oraz dla $\prod_{\lambda \in \Lambda} \chi_{\lambda}$ zachodzi tożsamość

$$\left(\prod_{\lambda \in \Lambda} \tilde{\chi}_{\lambda} \right) \circ \left(\prod_{\mu \in \Lambda} \chi_{\mu} \right) = \prod_{\lambda \in \Lambda} (\tilde{\chi}_{\lambda} \circ \chi_{\lambda}).$$

Ostatnie stwierdzenie naturalnie uzupełnia

Stwierdzenie 2. Przyjmijmy zapis Def. 3 i niechaj

$$\left(\coprod_{\lambda \in \Lambda} X_{\lambda}^{\alpha}, \{j_{\lambda}^{\alpha}\}_{\lambda \in \Lambda} \right), \quad \alpha \in \{1, 2\}$$

będą dwoma koproduktami odnośnych rodzin X^{α} . Dla dowolnej rodziny morfizmów $\chi_{\cdot} \in \mathcal{C}^{\tilde{\Lambda}}(X^1, X^2)$ istnieje dokładnie jeden morfizm

$$\coprod_{\lambda \in \Lambda} \chi_{\lambda} \in \mathcal{C}\left(\coprod_{\mu \in \Lambda} X_{\mu}^1, \coprod_{\nu \in \Lambda} X_{\nu}^2\right),$$

który czyni poniższy diagram przemiennym

$$\begin{array}{ccc} \coprod_{\mu \in \Lambda} X_{\mu}^1 & \xleftarrow{j_{\rho}^1} & X_{\rho}^1 \\ \prod_{\lambda \in \Lambda} \chi_{\lambda} \downarrow & & \downarrow \chi_{\rho} \\ \coprod_{\nu \in \Lambda} X_{\nu}^2 & \xleftarrow{j_{\rho}^2} & X_{\rho}^2 \end{array}$$

Morfizm ten określamy mianem **koproduktu rodziny morfizmów** $\chi_{\cdot} \in \mathcal{C}_1^{\tilde{\Lambda}}$.

Jeśli ponadto dany jest trzeci koprodukt

$$\left(\coprod_{\lambda \in \Lambda} X_{\lambda}^3, \{j_{\lambda}^3\}_{\lambda \in \Lambda} \right)$$

oraz rodzina morfizmów $\tilde{\chi} \in \mathcal{C}^{\tilde{\Lambda}}(X^2, X^3)$, to dla zdefiniowanego przez nią koproduktu morfizmów $\coprod_{\lambda \in \Lambda} \tilde{\chi}_\lambda$ oraz dla $\coprod_{\lambda \in \Lambda} \chi_\lambda$ zachodzi tożsamość

$$\left(\coprod_{\lambda \in \Lambda} \tilde{\chi}_\lambda \right) \circ \left(\coprod_{\mu \in \Lambda} \chi_\mu \right) = \coprod_{\lambda \in \Lambda} (\tilde{\chi}_\lambda \circ \chi_\lambda).$$

Ilustracji wprowadzonych dotychczas pojęć i konstrukcji abstrakcyjnych dostarcza poniższy przykład, którego dokładne zrozumienie w części początkowej dotyczącej produktu stanowi podstawę szczegółowych rozważań poświęconych obiektom uniwersalnym w kategorii modułów nad pierścieniem.

Przykłady 2. Rozważmy strukturę algebraiczną rodzaju trywialnego (tj. „pustego”), której nośnikiem są zbiory bez jakichkolwiek wyróżnionych operacji wieloargumentowych i dla której homomorfizmami są dowolne odwzorowania między zbiorami. W tym szczególnym przypadku produktem zbiorów z rodziny indeksowanej $S \in \text{Ob Set}^{\tilde{\Lambda}}$ jest **produkt kartezjański** [KM76, Rozdz. IV § 6]

$$\prod_{\lambda \in \Lambda} S_\lambda := \left\{ f : \Lambda \longrightarrow \bigcup_{\lambda \in \Lambda} S_\lambda \mid \forall \lambda \in \Lambda : f(\lambda) \in S_\lambda \right\}$$

wraz z rodziną $\{\varpi_\lambda := \text{pr}_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}$ rzutów kanonicznych na składowe S_λ ,

$$\text{pr}_\mu : \prod_{\lambda \in \Lambda} S_\lambda \longrightarrow S_\mu : f \longmapsto f(\mu).$$

Należy zwrócić uwagę, że w przypadku skończonego zbioru indeksów $\Lambda \equiv \overline{1, n}$ produkt kartezjański sprowadza się do standardowego iloczynu kartezjańskiego² i zapisuje w postaci

$$\times_{k=1}^n S_k = \left\{ (x_1, x_2, \dots, x_n) \mid \forall_{k \in \overline{1, n}} : x_k \in S_k \right\},$$

przy czym

$$\text{pr}_l : \times_{k=1}^n S_k \longrightarrow S_l : (x_1, x_2, \dots, x_n) \longmapsto x_l.$$

Dla dowolnej rodziny odwzorowań

$$\{f_\lambda : X \longrightarrow S_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}$$

znajdujemy jedyne odwzorowanie

$$(3) \quad \Phi : X \longrightarrow \prod_{\lambda \in \Lambda} S_\lambda$$

o własności (1), a mianowicie

$$x \longmapsto \Phi(x), \quad \Phi(x)(\lambda) := f_\lambda(x).$$

Koproduktem jest tutaj natomiast **suma rozłączna**³

$$\bigsqcup_{\lambda \in \Lambda} S_\lambda := \left\{ (x, \lambda) \mid x \in S_\lambda \wedge \lambda \in \Lambda \right\}$$

wraz z iniekcjami (włączeniami) kanonicznymi

$$j_\mu : S_\mu \longrightarrow \bigsqcup_{\lambda \in \Lambda} S_\lambda : x \longmapsto (x, \mu).$$

Z dowolną rodziną odwzorowań

$$\{g_\lambda : S_\lambda \longrightarrow Y\}_{\lambda \in \Lambda}$$

stowarzyszymy jedyne odwzorowanie

$$\Psi : \bigsqcup_{\lambda \in \Lambda} S_\lambda \longrightarrow Y$$

o własności (2), a mianowicie

$$(x, \lambda) \longmapsto \Psi(x, \lambda) := g_\lambda(x).$$

²Por. uwagi pod definicją w traktacie [KM76] Kuratowskiego i Mostowskiego.

³N.B. Ilekroć $x \in S_\lambda \cap S_\mu$, $\lambda \neq \mu$, wówczas $(x, \lambda) \neq (x, \mu)$.

3.2. Produkt i suma prosta w kategorii liniowej. Zwieńczeniem obecnej dyskusji jest szczególnie *wyprowadzenie* postaci produktu i koproduktu w kategorii modułów nad pierścieniem przemennym R .

Definicja 4. Przyjmijmy zapis Def.3 oraz Przykł.2. Niechaj $G. \in \text{Ob} \mathbf{Mod}_R^{\tilde{\Lambda}}$ będzie rodziną modułów nad pierścieniem R . **Produkt modułów z rodziny G .** to para

$$(\mathcal{M}^{\square}, \{\text{pr}_{\lambda}\}_{\lambda \in \Lambda}), \quad \mathcal{M}^{\square} := \left(\left(\prod_{\lambda \in \Lambda} G_{\lambda}, \phi_2^{\square}, \phi_1^{\square}, \phi_0^{\square} \right), \ell^{\square} \right),$$

w której $\phi_n^{\square}$, $n \in \{0, 1, 2\}$ to *kanonicznie indukowane* operacje grupowe, $\ell^{\square}$ zaś to *kanonicznie indukowane* działanie R na produkcie kartezjańskim $\prod_{\lambda \in \Lambda} G_{\lambda}$, które czynią z $(\mathcal{M}^{\square}, \{\text{pr}_{\lambda}\}_{\lambda \in \Lambda})$ produkt rodziny G w rozumieniu Def.3.

Poświęćmy obecnie trochę czasu na bezpośrednie uzasadnienie i wyjaśnienie powyższej definicji w odwołaniu do wcześniejszej definicji produktu jako morfizmu terminalnego. Oto więc rozważamy zbiór $G^{\square} := \prod_{\lambda \in \Lambda} G_{\lambda}$ z rzutami kanonicznymi $\text{pr}_{\lambda} : G^{\square} \longrightarrow G_{\lambda}$. Dodawania grupowe⁴

$$+_{\lambda} := \phi_2^{(\lambda)} : G_{\lambda} \times G_{\lambda} \longrightarrow G_{\lambda}$$

zadają – dla dowolnego indeksu $\lambda \in \Lambda$ – odwzorowania

$$\phi_2^{(\lambda)} \circ (\text{pr}_{\lambda} \times \text{pr}_{\lambda}) : G^{\square} \times G^{\square} \longrightarrow G_{\lambda},$$

co wobec terminalności pary $(G^{\square}, \{\text{pr}_{\lambda}\}_{\lambda \in \Lambda})$, w której $G^{\square}$ traktowane jest jako struktura trywialna (czyli obiekt **Set**), oznacza istnienie jedyne go odwzorowania (*a priori* bez dodatkowych własności względem operacji grupowych i działań określonych dla poszczególnych składowych rodziny)

$$\phi_2^{\square} : G^{\square} \times G^{\square} \longrightarrow G^{\square}$$

o własności

$$(4) \quad \text{pr}_{\lambda} \circ \phi_2^{\square} = \phi_2^{(\lambda)} \circ (\text{pr}_{\lambda} \times \text{pr}_{\lambda}).$$

Zauważmy, że jeśli tylko $\phi_2^{\square}$ jest poprawnie określonym dodawaniem na $G^{\square}$ a rzuty pr_{λ} są homomorfizmami grup transportującymi owo dodawanie w dodawanie w poszczególnych składowych G_{λ} , czego nie gwarantuje ich wyjściowy status (morfizmów w kategorii **Set**) i czego zatem mozołnie dowodzimy poniżej, to tożsamość (4) identyfikuje operację $\phi_2^{\square}$ jako „dodawanie po współrzędnych”. Łatwo przy tym stwierdzamy, że homomorficzność rzutów, czyli ich promocja do rangi morfizmów w kategorii **AbGrp**, wynika bezpośrednio z założenia, że $\phi_2^{\square} =: +_{\square}$ jest pożądaną operacją grupową, oto bowiem (4) implikuje równość

$$\text{pr}_{\lambda}(g +_{\square} h) = \text{pr}_{\lambda}(g) +_{\lambda} \text{pr}_{\lambda}(h),$$

śluszną dla dowolnych dwóch elementów $g, h \in G^{\square}$ a oznaczającą właśnie, że pr_{λ} są homomorfizmami grup. Wystarczy zatem sprawdzić definiujące własności dodawania grupowego w odniesieniu do odwzorowania $\phi_2^{\square}$. W pierwszej kolejności zbadamy jego łączność. Biorąc dowolne $g, h, k \in G^{\square}$, obliczamy – wykorzystując po drodze (przy przejściu z linii 2. do linii 3.) łączność operacji $\phi_2^{(\lambda)}$ –

$$\begin{aligned} \text{pr}_{\lambda} \circ \phi_2^{\square}(\phi_2^{\square}(g, h), k) &= \phi_2^{(\lambda)} \circ (\text{pr}_{\lambda} \times \text{pr}_{\lambda})(\phi_2^{\square}(g, h), k) \equiv \phi_2^{(\lambda)}(\text{pr}_{\lambda} \circ \phi_2^{\square}(g, h), \text{pr}_{\lambda}(k)) \\ &= \phi_2^{(\lambda)}\left(\phi_2^{(\lambda)} \circ (\text{pr}_{\lambda} \times \text{pr}_{\lambda})(g, h), \text{pr}_{\lambda}(k)\right) \equiv \phi_2^{(\lambda)}\left(\phi_2^{(\lambda)}(\text{pr}_{\lambda}(g), \text{pr}_{\lambda}(h)), \text{pr}_{\lambda}(k)\right) \\ &= \phi_2^{(\lambda)}\left(\text{pr}_{\lambda}(g), \phi_2^{(\lambda)}(\text{pr}_{\lambda}(h), \text{pr}_{\lambda}(k))\right) \equiv \phi_2^{(\lambda)}\left(\text{pr}_{\lambda}(g), \phi_2^{(\lambda)} \circ (\text{pr}_{\lambda} \times \text{pr}_{\lambda})(h, k)\right) \\ &= \phi_2^{(\lambda)}(\text{pr}_{\lambda}(g), \text{pr}_{\lambda} \circ \phi_2^{\square}(h, k)) \equiv \phi_2^{(\lambda)} \circ (\text{pr}_{\lambda} \times \text{pr}_{\lambda})(g, \phi_2^{\square}(h, k)) \\ &= \text{pr}_{\lambda} \circ \phi_2^{\square}(g, \phi_2^{\square}(h, k)). \end{aligned}$$

⁴Opisywana konstrukcja produktu po opuszczeniu działań składowych $\ell^{(\lambda)}$ stosuje się także do grup nieprzemennych.

Tym sposobem otrzymujemy dwa odwzorowania

$$G^\square \times G^\square \times G^\square \xrightarrow[\phi_2^\square \circ (\text{id}_{G^\square} \times \phi_2^\square)]{\phi_2^\square \circ (\phi_2^\square \times \text{id}_{G^\square})} G^\square \xrightarrow{\text{pr}_\lambda} G_\lambda ,$$

których obrazy pokrywają się, dając odwzorowanie $\phi_2^{(\lambda)} \circ (\text{id}_{G_\lambda} \times \phi_2^{(\lambda)}) \circ (\text{pr}_\lambda \times \text{pr}_\lambda \times \text{pr}_\lambda)$. Raz jeszcze przywołując terminalność pary $(G^\square, \{\text{pr}_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda})$, wnioskujemy, że istnieje dokładnie jedno odwzorowanie

$$\alpha^\square : G^\square \times G^\square \times G^\square \longrightarrow G^\square$$

przez nie indukowane, które spełnia tożsamość

$$\text{pr}_\lambda \circ \alpha^\square = \phi_2^{(\lambda)} \circ (\text{id}_{G_\lambda} \times \phi_2^{(\lambda)}) \circ (\text{pr}_\lambda \times \text{pr}_\lambda \times \text{pr}_\lambda) ,$$

a ponieważ zarówno $\phi_2^\square \circ (\phi_2^\square \times \text{id}_{G^\square})$, jak i $\phi_2^\square \circ (\text{id}_{G^\square} \times \phi_2^\square)$ spełniają ten warunek, przeto koniecznie

$$\phi_2^\square \circ (\phi_2^\square \times \text{id}_{G^\square}) = \alpha^\square = \phi_2^\square \circ (\text{id}_{G^\square} \times \phi_2^\square) ,$$

co dowodzi łączności $\phi_2^\square$.

Analogicznie wykazujemy przemienność $\phi_2^\square$, korzystając z przemienności $\phi_2^{(\lambda)}$. Oto bowiem, dla dowolnych $g, h \in G^\square$,

$$\begin{aligned} \text{pr}_\lambda \circ (\phi_2^\square \circ \tau_{G^\square}(g, h)) &= \phi_2^{(\lambda)} \circ (\text{pr}_\lambda \times \text{pr}_\lambda)(h, g) \equiv \phi_2^{(\lambda)}(\text{pr}_\lambda(h), \text{pr}_\lambda(g)) \\ &= \phi_2^{(\lambda)}(\text{pr}_\lambda(g), \text{pr}_\lambda(h)) \equiv \phi_2^{(\lambda)} \circ (\text{pr}_\lambda \times \text{pr}_\lambda)(g, h) \\ &= \text{pr}_\lambda \circ \phi_2^\square(g, h) , \end{aligned}$$

skąd równość odwzorowań

$$G^\square \times G^\square \xrightarrow[\phi_2^\square]{\phi_2^\square \circ \tau_{G^\square}} G^\square \xrightarrow{\text{pr}_\lambda} G_\lambda ,$$

tożsamy z $\phi_2^{(\lambda)} \circ (\text{pr}_\lambda \times \text{pr}_\lambda)$, czyli wobec jednoznaczności określenia indukowanego przezeń odwzorowania

$$\beta^\square : G^\square \times G^\square \longrightarrow G^\square$$

o własności

$$\text{pr}_\lambda \circ \beta^\square = \phi_2^{(\lambda)} \circ (\text{pr}_\lambda \times \text{pr}_\lambda)$$

mamy pożądaną identyczność

$$\phi_2^\square \circ \tau_{G^\square} = \beta^\square = \phi_2^\square .$$

Następnie rozważamy elementy neutralne w każdej z grup składowych,

$$\phi_0^{(\lambda)} : \{\bullet\} \longrightarrow G_\lambda : \bullet \longmapsto e_\lambda ,$$

i zapominając jak uprzednio o strukturze algebraicznej na rozważanych zbiorach, stowarzyszamy z nimi jedyne odwzorowanie

$$\phi_0^\square : \{\bullet\} \longrightarrow G^\square : \bullet \longmapsto e^\square$$

o własności

$$\text{pr}_\lambda \circ \phi_0^\square = \phi_0^{(\lambda)} .$$

W ten sposób wyróżniamy element $e^\square$ zbioru $G^\square$, o sugestywnej postaci uogólnionego ciągu (o indeksach z Λ) elementów neutralnych z grup składowych. Jego własności względem dodawania $\phi_2^\square$ sprawdzamy w bezpośrednim rachunku. Biorąc dowolny element $g \in G^\square$, otrzymujemy

$$\begin{aligned} \text{pr}_\lambda \circ \phi_2^\square(e^\square, g) &= \phi_2^{(\lambda)} \circ (\text{pr}_\lambda \times \text{pr}_\lambda)(e^\square, g) \equiv \phi_2^{(\lambda)}(\text{pr}_\lambda \circ \phi_0^\square(\bullet), \text{pr}_\lambda(g)) \\ &= \phi_2^{(\lambda)}\left(\phi_0^{(\lambda)}(\bullet), \text{pr}_\lambda(g)\right) \equiv \phi_2^{(\lambda)}(e_\lambda, \text{pr}_\lambda(g)) = \text{pr}_\lambda(g) \end{aligned}$$

$$\equiv \text{pr}_\lambda \circ \text{pr}_2(e^\square, g),$$

stąd zaś równość odwzorowań

$$\{\bullet\} \times G^\square \xrightarrow[\text{pr}_2]{\phi_2^\square \circ (\phi_0^\square \times \text{id}_{G^\square})} G^\square \xrightarrow{\text{pr}_\lambda} G_\lambda,$$

pokrywających się z $\phi_2^{(\lambda)} \circ (\phi_0^{(\lambda)} \times \text{pr}_\lambda)$. Znowu więc znajdujemy jedyne odwzorowanie

$$\varepsilon^\square : \{\bullet\} \times G^\square \longrightarrow G^\square$$

spełniające warunek

$$\text{pr}_\lambda \circ \varepsilon^\square = \phi_2^{(\lambda)} \circ (\phi_0^{(\lambda)} \times \text{pr}_\lambda),$$

a zatem

$$\phi_2^\square \circ (\phi_0^\square \times \text{id}_{G^\square}) = \varepsilon^\square = \text{pr}_2.$$

Podobnie dowodzimy tożsamości

$$\phi_2^\square \circ (\text{id}_{G^\square} \times \phi_0^\square) = \text{pr}_1,$$

co w sumie pokazuje dowodnie, że $e^\square$ jest elementem neutralnym dodawania $\phi_2^\square$.

Bez trudu rekonstruujemy też operację brania przeciwności w $G^\square$, biorąc za punkt wyjścia odnośne operacje w składowych

$$\phi_1^{(\lambda)} : G_\lambda \curvearrowright.$$

Rozumując jak wcześniej, tworzymy rodzinę odwzorowań

$$\phi_1^{(\lambda)} \circ \text{pr}_\lambda : G^\square \longrightarrow G_\lambda,$$

z którymi możemy związać jedyne odwzorowanie

$$\phi_1^\square : G^\square \curvearrowright$$

o własności

$$\text{pr}_\lambda \circ \phi_1^\square = \phi_1^{(\lambda)} \circ \text{pr}_\lambda,$$

która identyfikuje $\phi_1^\square$ jako „branie przeciwności po współrzędnych”. Trzeba jeszcze tylko upewnić się, że odwzorowanie to nadaje monoidowi przemienemu $(G^\square, \phi_2^\square, \phi_0^\square)$ strukturę grupy przemiennej. Z rachunku

$$\begin{aligned} \text{pr}_\lambda \circ \phi_2^\square(\phi_1^\square(g), g) &= \phi_2^{(\lambda)} \circ (\text{pr}_\lambda \times \text{pr}_\lambda)(\phi_1^\square(g), g) \equiv \phi_2^{(\lambda)}(\text{pr}_\lambda \circ \phi_1^\square(g), \text{pr}_\lambda(g)) \\ &= \phi_2^{(\lambda)}(\phi_1^{(\lambda)} \circ \text{pr}_\lambda(g), \text{pr}_\lambda(g)) = e^{(\lambda)} = \phi_0^{(\lambda)}(\bullet) = \text{pr}_\lambda \circ \phi_0^\square(\bullet), \end{aligned}$$

wykonanego dla dowolnego $g \in G^\square$ a wskazującego na równość odwzorowań

$$\{\bullet\} \times G^\square \xrightarrow[\phi_0^\square \circ \text{pr}_1]{\phi_2^\square \circ (\phi_1^\square, \text{id}_{G^\square}) \circ \text{pr}_2} G^\square \xrightarrow{\text{pr}_\lambda} G_\lambda,$$

identycznych z $\phi_0^{(\lambda)} \circ \text{pr}_1$, wywodzimy wniosek o istnieniu jedyne odwzorowania

$$\mu^\square : \{\bullet\} \times G^\square \longrightarrow G^\square$$

o własności

$$\text{pr}_\lambda \circ \mu^\square = \phi_0^{(\lambda)} \circ \text{pr}_1.$$

Ostatecznie więc stwierdzamy słuszność tożsamości

$$\phi_2^\square \circ (\phi_1^\square, \text{id}_{G^\square}) \circ \text{pr}_2 = \mu^\square = \phi_0^\square \circ \text{pr}_1.$$

Analogiczne wnioskowanie prowadzi do jej symetrycznego odpowiednika

$$\phi_2^\square \circ (\text{id}_{G^\square}, \phi_1^\square) \circ \text{pr}_2 = \mu^\square = \phi_0^\square \circ \text{pr}_1,$$

co potwierdza identyfikację $\phi_1^\square$ jako operacji brania przeciwności.

Na koniec wreszcie indukujemy na zrekonstruowanej powyżej grupie przemiennej strukturę modułu nad pierścieniem R ze struktur składowych. W tym celu z każdego z działań

$$\ell^{(\lambda)} : R \times G_\lambda \longrightarrow G_\lambda$$

budujemy odwzorowanie

$$\ell^{(\lambda)} \circ (\text{id}_R \times \text{pr}_\lambda) : R \times G^\Gamma \longrightarrow G_\lambda,$$

co daje nam jedyne odwzorowanie

$$\ell^\Gamma : R \times G^\Gamma \longrightarrow G^\Gamma$$

o własności

$$\text{pr}_\lambda \circ \ell^\Gamma = \ell^{(\lambda)} \circ (\text{id}_R \times \text{pr}_\lambda).$$

Z tej ostatniej odczytujemy definicję ℓ^Γ jako „działania po współrzędnych”. W żmudnym, lecz poza tym absolutnie trywialnym rachunku przekonujemy się, że tak zdefiniowane odwzorowanie spełnia aksjomaty działania, i tym samym zamykamy kanoniczną konstrukcję modułu na produkcie kartezjańskim G^Γ .

Na zakończenie dyskusji struktury produktu modułów należy podkreślić, że odwzorowanie Φ wskazane w Równ. (3), którego istnienie zapewnia, dla zadanej rodziny $f \in \text{Mor } \mathbf{Mod}_R^{\tilde{\Lambda}}$, terminalny charakter produktu nośników $G_\lambda \in \mathbf{Set}$ struktury (lewego) R -modułu w kategorii $\mathbf{Set}^{(\tilde{\Lambda})}$, jest automatycznie R -liniowe, czyli podnosi się do kategorii $\mathbf{Mod}_R^{(\tilde{\Lambda})}$. Istotnie, wprost na mocy jego definicji i z racji R -liniowości składowych f_λ otrzymujemy tożsamość

$$\begin{aligned} \Phi(r_1 \triangleright_X x_1 +_X r_2 \triangleright_X x_2)(\lambda) &\equiv \text{pr}_\lambda \circ \Phi(r_1 \triangleright_X x_1 +_X r_2 \triangleright_X x_2) = f_\lambda(r_1 \triangleright_X x_1 +_X r_2 \triangleright_X x_2) \\ &= r_1 \triangleright_\lambda f_\lambda(x_1) +_\lambda r_2 \triangleright_\lambda f_\lambda(x_2) \\ &= r_1 \triangleright_\lambda \text{pr}_\lambda \circ \Phi(x_1) +_\lambda r_2 \triangleright_\lambda \text{pr}_\lambda \circ \Phi(x_2) \\ &= (r_1 \triangleright_\lambda \Phi(x_1) +_\lambda r_2 \triangleright_\lambda \Phi(x_2))(\lambda), \end{aligned}$$

prawdziwą dla dowolnych $x_1, x_2 \in X (\in \mathbf{Mod}_R)$ i $r_1, r_2 \in R$ oraz $\lambda \in \Lambda$, zatem także zapowiedzianą konstatację R -liniowości

$$\Phi(r_1 \triangleright_X x_1 +_X r_2 \triangleright_X x_2) = r_1 \triangleright_\lambda \Phi(x_1) +_\lambda r_2 \triangleright_\lambda \Phi(x_2).$$

O ile konstrukcja produktu modułów postępuje automatycznie po dokonaniu narzucającego się wyboru nośnika G^Γ , o tyle konstrukcja koproduktu, który będziemy w dalszej części kursu nazywać sumą prostą modułów, wymaga pewnej dozy inwencji oraz rozlicznych sprawdzeń (jednoznaczności konstrukcji). Zaznaczamy zawczasu, że poniższa konstrukcja stosuje się wyłącznie do grup przemiennych, co będziemy podkreślać pisząc e_λ w notacji addytywnej jako 0_λ .

Definicja 5. Przyjmijmy zapis Def. 3 i 4. **Suma prosta modułów z rodziny G .** to para

$$(\mathcal{M}^\sqcup, \{j_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}), \quad \mathcal{M}^\oplus := \left(\left(\bigoplus_{\lambda \in \Lambda} G_\lambda, \phi_2^\Gamma, \phi_1^\Gamma, \phi_0^\Gamma \right), \ell^\Gamma \right),$$

w której $\mathcal{M}^\oplus$ jest podmodułem produktu modułów $\mathcal{M}^\Gamma$ z rodziny G o nośniku

$$(5) \quad \bigoplus_{\lambda \in \Lambda} G_\lambda := \{ g \in G^\Gamma \mid |\{ \lambda \in \Lambda \mid \text{pr}_\lambda(g) \neq 0_\lambda \}| < \infty \}$$

(czyli $\text{pr}_\lambda(g)$ jest elementem neutralnym dla prawie wszystkich indeksów) i w której $j_\lambda : G_\lambda \longrightarrow G^\Gamma$ są iniekcjami kanonicznymi spełniającymi warunki

$$(6) \quad \forall_{\lambda, \mu \in \Lambda} \forall_{g_\mu \in G_\mu} : \text{pr}_\lambda \circ j_\mu(g_\mu) := \begin{cases} g_\mu & \text{dla } \lambda = \mu \\ \mathbf{0}_\lambda & \text{dla } \lambda \neq \mu \end{cases}.$$

Pokażemy najpierw, że odwzorowania j_λ są homomorfizmami oraz że mają cechę uniwersalności. Na początku ustalmy (dowolnie) indeks $\mu \in \Lambda$ i obliczmy – dla dowolnych $g_\mu, h_\mu \in G_\mu$ –

$$\begin{aligned} \text{pr}_\lambda \circ \phi_2^\square \circ (j_\mu \times j_\mu)(g_\mu, h_\mu) &= \phi_2^{(\lambda)} \circ (\text{pr}_\lambda \times \text{pr}_\lambda) \circ (j_\mu \times j_\mu)(g_\mu, h_\mu) \\ &= \phi_2^{(\lambda)} \circ ((\text{pr}_\lambda \circ j_\mu) \times (\text{pr}_\lambda \circ j_\mu))(g_\mu, h_\mu) \\ &= \left\{ \begin{array}{ll} \phi_2^{(\mu)}(g_\mu, h_\mu) & \text{dla } \lambda = \mu \\ \phi_2^{(\lambda)}(\mathbf{0}_\lambda, \mathbf{0}_\lambda) = \mathbf{0}_\lambda & \text{dla } \lambda \neq \mu \end{array} \right\} \\ &= \text{pr}_\lambda \circ j_\mu \circ \phi_2^{(\mu)}(g_\mu, h_\mu), \end{aligned}$$

dowodząc tym samym równości dwóch rodzin odwzorowań

$$G_\mu \times G_\mu \xrightarrow[\text{j}_\mu \circ \phi_2^{(\mu)}]{\phi_2^\square \circ (j_\mu \times j_\mu)} G^\square \xrightarrow{\text{pr}_\lambda} G_\lambda$$

identycznych z $\psi_\lambda : (g_\mu, h_\mu) \mapsto \begin{cases} \phi_2^{(\mu)}(g_\mu, h_\mu) & \text{dla } \lambda = \mu \\ \mathbf{0}_\lambda & \text{dla } \lambda \neq \mu \end{cases}$. W konsekwencji terminalności pary $(G^\square, \{\text{pr}_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda})$ równość ta implikuje istnienie jedynej rodziny odwzorowań

$$\alpha_\mu : G_\mu \times G_\mu \longrightarrow G^\square, \quad \mu \in \Lambda$$

o własności

$$\forall \lambda \in \Lambda : \text{pr}_\lambda \circ \alpha_\mu = \psi_\lambda.$$

Na tej podstawie wnioskujemy o równości

$$\phi_2^\square \circ (j_\mu \times j_\mu) = j_\mu \circ \phi_2^{(\mu)},$$

która wyraża homomorficzny charakter j_μ . Dowód uniwersalności j_λ wymaga, iżbyśmy z dowolną rodziną homomorfizmów grup (przemiennych)

$$\chi_\lambda : G_\lambda \longrightarrow Y, \quad \lambda \in \Lambda$$

określoną dla dowolnej grupy przemiennej Y potrafili stowarzyszyć odwzorowanie

$$H : \bigoplus_{\lambda \in \Lambda} G_\lambda \longrightarrow Y$$

spełniające relacje

$$(7) \quad \forall \lambda \in \Lambda : H \circ j_\lambda = \chi_\lambda,$$

dowodząc przy tym, że odwzorowanie o tej własności jest dane jednoznacznie. Postulujemy, dla dowolnego $g \in \bigoplus_{\lambda \in \Lambda} G_\lambda$,

$$H(g) := \sum_{\lambda \in \Lambda} \chi_\lambda \circ \text{pr}_\lambda(g).$$

Zauważmy, że suma w powyższej definicji jest skończona, por. (5), zatem definicja ma sens i możemy ją zapisać w postaci

$$H = \sum_{\lambda \in \Lambda} \chi_\lambda \circ \text{pr}_\lambda \upharpoonright_{\bigoplus_{\lambda \in \Lambda} G_\lambda},$$

a nadto – że tak zdefiniowane odwzorowanie jest homomorfizmem grup przemiennych, bo status ten mają wszystkie odwzorowania pr_λ i χ_λ . Sprawdzamy też bez trudu relację (7), wybrawszy dowolnie $g_\lambda \in G_\lambda$,

$$\begin{aligned} H \circ j_\lambda(g_\lambda) &= \sum_{\mu \in \Lambda} \chi_\mu \circ \text{pr}_\mu \circ j_\lambda(g_\lambda) \equiv \chi_\lambda \circ \text{pr}_\lambda \circ j_\lambda(g_\lambda) +_Y \sum_{\mu \in \Lambda \setminus \{\lambda\}} \chi_\mu \circ \text{pr}_\mu \circ j_\lambda(g_\lambda) \\ &= \chi_\lambda(g_\lambda) +_Y \sum_{\mu \in \Lambda \setminus \{\lambda\}} \chi_\mu(\mathbf{0}_\mu) = \chi_\lambda(g_\lambda). \end{aligned}$$

Dowodzimy następnie jedyności H . Niechaj $\tilde{H} : \bigoplus_{\lambda \in \Lambda} G_\lambda \longrightarrow Y$ będzie dowolnym innym takim odwzorowaniem, a wtedy różnica odwzorowań

$$H - \tilde{H} : \bigoplus_{\lambda \in \Lambda} G_\lambda \longrightarrow Y : g \longmapsto H(g) +_Y P_Y \circ \tilde{H}(g),$$

będąca homomorfizmem grup przemennych (przypomnijmy, że rzuty kanoniczne są homomorfizmami grup przemennych), spełnia tożsamości

$$(H - \tilde{H}) \circ j_\lambda(g_\lambda) = H \circ j_\lambda(g_\lambda) +_Y P_Y(\tilde{H} \circ j_\lambda(g_\lambda)) = \chi_\lambda(g_\lambda) +_Y P_Y(\chi_\lambda(g_\lambda)) = \mathbf{0}_Y.$$

Możemy stąd wyciągnąć prosty wniosek:

$$\bigcup_{\lambda \in \Lambda} j_\lambda(G_\lambda) \subset \text{Ker}(H - \tilde{H}).$$

Jednakowoż $\text{Ker}(H - \tilde{H})$ jest podgrupą $\bigoplus_{\lambda \in \Lambda} G_\lambda$, tj. podzbiorem domkniętym ze względu na operację brania skończonych sum jego elementów, każdy zaś element $g \in \bigoplus_{\lambda \in \Lambda} G_\lambda$ jest taką właśnie sumą skończoną elementów z różnych $j_\lambda(G_\lambda)$. Ażeby się o tym przekonać, rozważmy odwzorowanie

$$\iota^\oplus : \bigoplus_{\lambda \in \Lambda} G_\lambda \ni g \longmapsto \sum_{\lambda \in \Lambda} j_\lambda \circ \text{pr}_\lambda(g),$$

które jest dobrze określone z tych samych powodów co H i które wobec homomorficzności rzutów kanonicznych spełnia tożsamości

$$\text{pr}_\lambda \circ \iota^\oplus(g) \equiv \text{pr}_\lambda \circ \sum_{\mu \in \Lambda} j_\mu \circ \text{pr}_\mu(g) = \sum_{\mu \in \Lambda} (\text{pr}_\lambda \circ j_\mu)(\text{pr}_\mu(g)) = \text{pr}_\lambda(g) \equiv \text{pr}_\lambda \circ \text{id}_{\bigoplus_{\lambda \in \Lambda} G_\lambda}(g).$$

Te ostatnie – jak w poprzednio dyskutowanych przypadkach (tj. w konsekwencji terminalności produktu kartezjańskiego) – prowadzą do równości

$$(8) \quad \iota^\oplus = \text{id}_{\bigoplus_{\lambda \in \Lambda} G_\lambda},$$

zadającej rzeczony rozkład g na skończoną sumę

$$(9) \quad g = \sum_{\lambda \in \Lambda} j_\lambda \circ \text{pr}_\lambda(g).$$

Wracając do zasadniczego wyводу, stwierdzamy, że jedynym podzbiorem $\bigoplus_{\lambda \in \Lambda} G_\lambda$ zawierającym $\bigcup_{\lambda \in \Lambda} j_\lambda(G_\lambda)$ i domkniętym względem operacji brania sum skończonych jest cały zbiór $\bigoplus_{\lambda \in \Lambda} G_\lambda$,

$$\text{Ker}(H - \tilde{H}) = \bigoplus_{\lambda \in \Lambda} G_\lambda,$$

czyli też ostatecznie

$$H = \tilde{H}.$$

Należy podkreślić, że nigdzie w dotychczasowej dyskusji koproduktu nie braliśmy pod uwagę dodatkowej struktury R -modułu na nośniku grupy przemiennej, możemy przeto podsumować tę jej część stwierdzeniem, że oto czwórka

$$\left(\bigoplus_{\lambda \in \Lambda} G_\lambda, \phi_2^\square, \phi_1^\square, \phi_0^\square \right)$$

stanowi spójną definicję sumy prostej grup przemennych. Jako że działanie pierścienia R w jawny sposób zachowuje podgrupę $\bigoplus_{\lambda \in \Lambda} G_\lambda \subset G^\square$, dla naszych celów wystarczy jeszcze tylko upewnić się, że zarówno injekcje kanoniczne j_λ , jak też jedyny homomorfizm grup H są odwzorowaniami R -liniowymi. W tym drugim przypadku własność ta jest bezpośrednim następstwem R -liniowości rzutów kanonicznych pr_λ oraz odwzorowań χ_λ . W przypadku pierwszym R -liniowości stwierdzamy na gruncie terminalności produktu kartezjańskiego oraz dowiedzionych własności odwzorowań $\ell^\square$ i $\ell^{(\lambda)}$, stosując sprawdzoną strategię rozważań wcześniejszych. Punktem wyjścia jest obserwacja (wysłowiona dla dowolnych $\lambda, \mu \in \Lambda$ oraz $(r, g_\mu) \in R \times G_\mu$)

$$\begin{aligned} \text{pr}_\lambda \circ \ell^\square \circ (\text{id}_R \times j_\mu)(r, g_\mu) &= \ell^{(\lambda)} \circ (\text{id}_R \times \text{pr}_\lambda) \circ (\text{id}_R \times j_\mu)(r, g_\mu) \\ &\equiv \ell^{(\lambda)} \circ (\text{id}_R \times \text{pr}_\lambda \circ j_\mu)(r, g_\mu) = (\text{pr}_\lambda \circ j_\mu) \circ \ell^{(\mu)}(r, g_\mu), \end{aligned}$$

wskazująca na równość dwóch rodzin odwzorowań

$$R \times G_\mu \xrightarrow[\jmath_\mu \circ \ell^{(\mu)}]{\ell^\square \circ (\text{id}_R \times \jmath_\mu)} \bigoplus_{\nu \in \Lambda} G_\nu \xrightarrow{\text{pr}_\lambda} G_\lambda ,$$

identycznych z $r_\lambda : (r, g_\mu) \mapsto \begin{cases} \ell^{(\mu)}(r, g_\mu) & \text{dla } \lambda = \mu \\ 0_\lambda & \text{dla } \lambda \neq \mu \end{cases}$. Terminalność pary $(G^\square, \{\text{pr}_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda})$ przesądza w tej sytuacji o istnieniu jedynej rodziny odwzorowań

$$\rho_\mu : R \times G_\mu \longrightarrow \bigoplus_{\nu \in \Lambda} G_\nu \subset G^\square$$

o własności

$$\forall_{\lambda \in \Lambda} : \text{pr}_\lambda \circ \rho_\mu = r_\lambda .$$

Stąd ostatecznie wyprowadzamy pożądaną równość

$$\jmath_\lambda \circ \ell^{(\lambda)} = \ell^\square \circ (\text{id}_R \times \jmath_\lambda)$$

wyrażającą R -liniowość iniekcji kanonicznych.

3.3. Iloczyn tensorowy. Narzędzia formalne pozyskane dotychczas pozwalają nam wprowadzić nową, wieloliniową strukturę algebraiczną, o fundamentalnym znaczeniu dla konstrukcji algebr Clifforda i ich modułów, więc obiektów, których dyskusji jest poświęcony niniejszy cykl wykładów. Strukturę tę definiujemy i badamy poniżej.

Zaczynamy od wprowadzającej

Definicja 6. Przyjmijmy dotychczasowy zapis i ustalmy $R \in \mathbf{Ring}$. Niechaj $G_1 \in \mathbf{Mod}_{R^{\text{op}}}$, $G_2 \in \mathbf{Mod}_R$ oraz $H \in \mathbf{AbGrp}$ i niech $\varphi : G_1 \times G_2 \longrightarrow H$ będzie **dwu- $\mathbb{Z}$ -liniowe** (czyli dwu-addytywne), tj.

$$\forall_{g_1, g_2 \in G_1} \forall_{g_3 \in G_2} : \varphi(g_1 +_1 g_2, g_3) = \varphi(g_1, g_3) +_H \varphi(g_2, g_3) ,$$

$$\forall_{h_1 \in G_1} \forall_{h_2, h_3 \in G_2} : \varphi(h_1, h_2 +_2 h_3) = \varphi(h_1, h_2) +_H \varphi(h_1, h_3) .$$

Odwzorowanie φ nazywamy **śród- R -liniowym**, jeśli spełnia dodatkowy warunek **śród- R -jednorodności**

$$\forall_{(r, g_1, g_2) \in R \times G_1 \times G_2} : \varphi(g_1 \triangleleft r, g_2) = \varphi(g_1, r \triangleright g_2) .$$

Odwzorowania śród- R -liniowe dla ustalonej pary (G_1, G_2) tworzą kategorię ${}^{G_1}L^{G_2}$, której obiektami są pary (H, φ) złożone z $H \in \mathbf{AbGrp}$ i odwzorowania śród- R -liniowego $\varphi \in \mathbf{Set}(G_1 \times G_2, H)$, morfizmami zaś – dla ustalonych obiektów $(H_\alpha, \varphi_\alpha)$, $\alpha \in \{1, 2\}$, utworzonych przez $H_\alpha \in \mathbf{AbGrp}$ i odwzorowania śród- R -liniowe⁵ $\varphi_\alpha : G_1 \times G_2 \longrightarrow H_\alpha$ – odwzorowania

$$\text{Hom}_{G_1 L^{G_2}}((H_1, \varphi_1), (H_2, \varphi_2)) = \{ \chi \in \mathbf{AbGrp}(H_1, H_2) \mid \varphi_2 = \chi \circ \varphi_1 \} .$$

Przykłady 3. Fundamentalnym przykładem odwzorowania śród- R -liniowego jest mnożenie w pierścieniu R , przy czym R traktujemy tutaj jako kanoniczny lewy $({}_R R)$ i prawy (R_R) R -moduł.

Możemy już teraz wprowadzić obiekt podstawowy naszych rozważań:

Definicja 7. Przyjmijmy dotychczasowy zapis. **Iloczyn tensorowy nad R** prawego R -modułu G_1 i lewego R -modułu G_2 to struktura inicjalna

$$(G_1 \otimes_R G_2, \otimes_R)$$

dla warunku

$P_{(G_1, G_2); F_0, F}(H, \varphi) \equiv \varphi : F_0(G_1, G_2) \equiv F(G_1) \times F(G_2) \longrightarrow F(H)$ jest odwzorowaniem śród- R -liniowym”,

⁵Godzi się podkreślić, że w obecnym zapisie, jak i wszędzie poniżej, konsekwentnie powstrzymujemy się od używania funktora zapominania, który *implicite* bywa przykładany do rozmaitych struktur algebraicznych, co pozwala nadać sens napisom – jak $G_1 \times G_2 \longrightarrow H_\alpha$ – utworzonym z bytów z różnych kategorii.

w którego zapisie $F_0 \equiv F \times F : \mathbf{Mod}_{R^{\text{op}}} \times \mathbf{Mod}_R \longrightarrow \mathbf{Set}$ jest funktorem zbudowanym z funktorów zapominania F i przyporządkowującym parze modułów (wzgl. odwzorowań R -liniowych) iloczyn kartezyjański ich nośników (wzgl. tychże odwzorowań), a $F : \mathbf{AbGrp} \longrightarrow \mathbf{Set}$ jest funktorem zapominania przyporządkowującym grupie przemiennej (wzgl. homomorfizmowi między takimi grupami) jej nośnik (wzgl. to samo odwzorowanie traktowane jako odwzorowanie między zbiorami).

Uwaga 1. Dokonajmy elementarnej egzegezy powyższej definicji, zapominając po drodze funktor zapominania we wszystkich (niemal) jego objawieniach: Oto więc iloczyn tensorowy R -modułów G_1 i G_2 to – w istocie – para $(G_1 \otimes_R G_2, \otimes_R)$ złożona z grupy przemiennej $G_1 \otimes_R G_2$ oraz odwzorowania śród- R -liniowego $\otimes_R : G_1 \times G_2 \longrightarrow G_1 \otimes_R G_2$, zwanego **kanonicznym odwzorowaniem śród- R -liniowym**, o tej własności, że dla każdej grupy przemiennej H i każdego odwzorowania śród- R -liniowego $\varphi : G_1 \times G_2 \longrightarrow H$ istnieje dokładnie jeden homomorfizm grup przemiennych $\tilde{\varphi} : G_1 \otimes_R G_2 \longrightarrow H$, który czyni przemiennym diagram

$$(10) \quad \begin{array}{ccccccc} & & & & H & \xleftarrow{F \circ \text{pr}_1} & (H, \varphi) \\ & & & & \uparrow \tilde{\varphi} & & \uparrow \tilde{\varphi} \\ & & \varphi \nearrow & & & & \\ (G_1, G_2) & \xrightarrow{F_0} & G_1 \times G_2 & \xrightarrow{\otimes_R} & G_1 \otimes_R G_2 & \xleftarrow{F \circ \text{pr}_1} & (G_1 \otimes_R G_2, \otimes_R) \end{array},$$

czyli – mówiąc po ludzku – spełnia tożsamość

$$(11) \quad \forall_{(g_1, g_2) \in G_1 \times G_2} : \tilde{\varphi}(g_1 \otimes_R g_2) = \varphi(g_1, g_2),$$

gdzie wprowadziliśmy standardowe oznaczenie

$$(12) \quad \otimes_R(g_1, g_2) \equiv g_1 \otimes_R g_2.$$

Mamy wielce uspokajające

Twierdzenie 3. Przyjmijmy zapis Def. 7. Dla dowolnego pierścienia R i dowolnych $G_1 \in \mathbf{Mod}_{R^{\text{op}}}$, $G_2 \in \mathbf{Mod}_R$ iloczyn tensorowy $(G_1 \otimes_R G_2, \otimes_R)$ istnieje i jest określony jednoznacznie z dokładnością do jedynego izomorfizmu grup przemiennych.

Dowód: Wprost z definicji iloczynu tensorowego jako morfizmu uniwersalnego wynika – w świetle Tw. 2.2 – druga część dowodzonego twierdzenia. Pozostaje zatem wykazać jego istnienie, co czynimy w sposób bezpośredni (konstruktywny). Utwórzmy wolny $\mathbb{Z}$ -moduł (czyli grupę przemienią)

$$\langle G_1 \times G_2 \rangle_{\mathbb{Z}} = \{ n_{(\cdot, \cdot)} : G_1 \times G_2 \longrightarrow \mathbb{Z} \mid |\{ n_{(g_1, g_2)} \in \mathbb{Z}^\times \mid (g_1, g_2) \in G_1 \times G_2 \}| < \infty \}$$

nad *zbiorem*⁶ $G_1 \times G_2$. Moduł ten posiada naturalną bazę $\{\delta_{(g_1, g_2)}\}_{(g_1, g_2) \in G_1 \times G_2}$ złożoną z odwzorowań

$$\delta_{(g_1, g_2)} : G_1 \times G_2 \longrightarrow \mathbb{Z} : (h_1, h_2) \mapsto \begin{cases} 1 & \text{dla } (h_1, h_2) = (g_1, g_2) \\ 0 & \text{dla } (h_1, h_2) \neq (g_1, g_2) \end{cases},$$

którą możemy wykorzystać do zapisania wyróżnionego $\mathbb{Z}$ -podmodułu

$$\begin{aligned} T &:= \langle \{ \delta_{(g_1 +_1 g_2, g_3)} - \delta_{(g_1, g_3)} - \delta_{(g_2, g_3)} \}_{g_1, g_2 \in G_1, g_3 \in G_2} \\ &\quad \cup \{ \delta_{(h_1, h_2 +_2 h_3)} - \delta_{(h_1, h_2)} - \delta_{(h_1, h_3)} \}_{h_1 \in G_1, h_2, h_3 \in G_2} \\ &\quad \cup \{ \delta_{(k_1 \triangleleft_1 r, k_2)} - \delta_{(k_1, r \triangleright_2 k_2)} \}_{k_1 \in G_1, k_2 \in G_2, r \in R} \rangle_{\mathbb{Z}}. \end{aligned}$$

Wobec przemienności grupy $\langle G_1 \times G_2 \rangle_{\mathbb{Z}}$ ten ostatni określa $\mathbb{Z}$ -moduł ilorazowy (czyli (przemienią) grupę ilorazową). Postulujemy

$$(13) \quad G_1 \otimes_R G_2 := \langle G_1 \times G_2 \rangle_{\mathbb{Z}} / T,$$

⁶Podkreślimy: *nie* chodzi tutaj o strukturę grupy przemiennej $G_1 \times G_2$, lecz o „gołą” strukturę zbioru.

a ponieważ zbiór $G_1 \times G_2$ zanurza się kanonicznie w $\langle G_1 \times G_2 \rangle_{\mathbb{Z}}$ (jako *zbiór*) wedle schematu

$$(14) \quad \tilde{\mathcal{J}}_{G_1 \times G_2} : G_1 \times G_2 \rightarrow \langle G_1 \times G_2 \rangle_{\mathbb{Z}} : (g_1, g_2) \mapsto \delta_{(g_1, g_2)},$$

wykorzystującego przeto możemy też zdefiniować

$$(15) \quad \begin{aligned} \otimes_R &:= \pi_{\langle G_1 \times G_2 \rangle_{\mathbb{Z}}/T} \circ \tilde{\mathcal{J}}_{G_1 \times G_2} : G_1 \times G_2 \longrightarrow G_1 \otimes_R G_2 \\ &: (g_1, g_2) \mapsto \delta_{(g_1, g_2)} + T \equiv g_1 \otimes_R g_2, \end{aligned}$$

używając rzutu kanonicznego *modulo* T .

Zacniemy od sprawdzenia śród- R -liniowości zdefiniowanego powyżej odwzorowania $\otimes_R$, licząc dla dowolnych $g_1, g_2 \in G_1$, $g_3, g_4 \in G_2$ i $r \in R$, co następuje:

$$\begin{aligned} (g_1 +_1 g_2) \otimes_R g_3 &\equiv \delta_{(g_1 +_1 g_2, g_3)} + T = \delta_{(g_1, g_3)} + \delta_{(g_2, g_3)} + (\delta_{(g_1 +_1 g_2, g_3)} - \delta_{(g_1, g_3)} - \delta_{(g_2, g_3)}) + T \\ &\equiv \delta_{(g_1, g_3)} + \delta_{(g_2, g_3)} + T = (\delta_{(g_1, g_3)} + T) + (\delta_{(g_2, g_3)} + T) \\ &\equiv g_1 \otimes_R g_3 + g_2 \otimes_R g_3, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} g_1 \otimes_R (g_3 +_2 g_4) &\equiv \delta_{(g_1, g_3 +_2 g_4)} + T = \delta_{(g_1, g_3)} + \delta_{(g_1, g_4)} + (\delta_{(g_1, g_3 +_2 g_4)} - \delta_{(g_1, g_3)} - \delta_{(g_1, g_4)}) + T \\ &\equiv \delta_{(g_1, g_3)} + \delta_{(g_1, g_4)} + T = (\delta_{(g_1, g_3)} + T) + (\delta_{(g_1, g_4)} + T) \\ &\equiv g_1 \otimes_R g_3 + g_1 \otimes_R g_4, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} g_1 \triangleleft_1 r \otimes_R g_2 &\equiv \delta_{(g_1 \triangleleft_1 r, g_2)} + T = \delta_{(g_1, r \triangleright_2 g_2)} + (\delta_{(g_1 \triangleleft_1 r, g_2)} - \delta_{(g_1, r \triangleright_2 g_2)}) + T \\ &= \delta_{(g_1, r \triangleright_2 g_2)} + T \equiv g_1 \otimes_R r \triangleright_2 g_2. \end{aligned}$$

W następnej kolejności wykażemy istnienie i jednoznaczność odwzorowania $\tilde{\varphi}$, o którym mowa w Uwadze 1. W tym celu wykorzystamy bazowość układu $\{\delta_{(g_1, g_2)}\}_{(g_1, g_2) \in G_1 \times G_2}$ w $\langle G_1 \times G_2 \rangle_{\mathbb{Z}}$, jak też i to, że odwzorowanie $\pi_{\langle G_1 \times G_2 \rangle_{\mathbb{Z}}/T}$ jest epimorfizmem, zatem definiująca tożsamość (11) ustala obraz względem odwzorowania $\tilde{\varphi}$ układu generującego dziedzinę tego odwzorowania. Jest zatem jasne, że istnieje co najwyżej jedno $\mathbb{Z}$ -liniowe rozszerzenie tak zadanego (na układzie generującym) odwzorowania. Rozszerzenie to przyjmuje następującą postać: wobec surjektywności rzutu kanonicznego *modulo* T każdy element $\tau \in G_1 \otimes_R G_2$ możemy przedstawić w formie $\tau = \nu + T$ dla pewnej funkcji $\nu \in \mathbb{Z}^{G_1 \times G_2}$ o ograniczonym nośniku (więc przyjmującej wartości różne od $0_{\mathbb{Z}}$ dla skończonej liczby argumentów – zbiór takich funkcji będziemy oznaczać symbolem $\mathcal{R}_0(\mathbb{Z}; G_1 \times G_2)$), skoro zaś układ $\{\delta_{(g_1, g_2)}\}_{(g_1, g_2) \in G_1 \times G_2}$ jest bazą $\langle G_1 \times G_2 \rangle_{\mathbb{Z}}$, to możemy rozłożyć $\nu = \sum_{(g_1, g_2) \in G_1 \times G_2} n_{(g_1, g_2)} \triangleright \delta_{(g_1, g_2)}$, przy czym – jak łatwo widać – $n_{(g_1, g_2)} \equiv \nu(g_1, g_2)$, ostatecznie więc najbardziej ogólna postać elementu modułu $G_1 \otimes_R G_2$ to

$$(16) \quad \tau = \sum_{(g_1, g_2) \in G_1 \times G_2} \nu(g_1, g_2) \triangleright \delta_{(g_1, g_2)} + T \equiv \sum_{(g_1, g_2) \in G_1 \times G_2} \nu(g_1, g_2) \triangleright (g_1 \otimes_R g_2),$$

gdzie w ostatnim kroku wykorzystaliśmy oczywistą tożsamość ($[\triangleright]$ to działanie pierścienia $\mathbb{Z}$ na zbiorze T -warstw)

$$0[\triangleright]T \equiv 0[\triangleright][0] \bmod T \equiv [0 \triangleright 0] \bmod T = [0] \bmod T \equiv T,$$

a ponieważ $\tilde{\varphi}$ z założenia ma być homomorfizmem grup przemiennej, przeto

$$\tilde{\varphi}(\tau) = \sum_{(g_1, g_2) \in G_1 \times G_2} \tilde{\nu}(g_1, g_2) \triangleright_H \tilde{\varphi}(g_1 \otimes_R g_2),$$

co daje antycypowany jednoznaczny wynik ostateczny

$$\tilde{\varphi}(\tau) = \sum_{(g_1, g_2) \in G_1 \times G_2} \tilde{\nu}(g_1, g_2) \triangleright_H \varphi(g_1, g_2).$$

Innymi słowy, określenie postaci przyjmowanej przez $\tilde{\varphi}$ na układzie generującym $G_1 \otimes_R G_2$ złożonym z tensorów prostych, w sposób zdeterminowany przez samą definicję obiektu inicjalnego, jednoznacznie podpowiada postać (jedyne) rozszerzenia $\mathbb{Z}$ -liniowego tego odwzorowania do całego modułu tensorowego. $\square$

Mając na względzie przyszłą wygodę dowodzenia, podamy obecnie równoważną definicję iloczynu tensorowego modułów uwzględniającą powyższe rozumowanie, a to w formie

Stwierdzenie 3. Przyjmijmy zapis Def. 7. Niechaj $(T, \tau) \in {}^{G_1}L_2^G$. Poniższe zdania logiczne są równoważne.

- (i) (T, τ) jest iloczynem tensorowym modułów G_1 i G_2 nad R .
- (ii) Grupa T jest generowana (nad $\mathbb{Z}$) przez elementy postaci $\tau(g_1, g_2)$, $(g_1, g_2) \in G_1 \times G_2$, tj.

$$(17) \quad T = \langle \tau(G_1 \times G_2) \rangle_{\mathbb{Z}},$$

a ponadto dla każdej pary $(H, \varphi) \in {}^{G_1}L^{G_2}$ jest określone odwzorowanie $\tilde{\varphi} \in {}^{G_1}L^{G_2}((T, \tau), (H, \varphi))$, tj. takie, które czyni przemianym diagram

$$(18) \quad \begin{array}{ccc} & & H \\ & \nearrow \varphi & \uparrow \tilde{\varphi} \\ G_1 \times G_2 & \xrightarrow{\tau} & T \end{array}$$

Dowód:

- (i) $\Rightarrow$ (ii) Prawdziwość zdania (i) implikuje istnienie (jedyne) odwzorowania $\tilde{\varphi}$ wprost na mocy uniwersalności iloczynu tensorowego. Niechaj

$$T_\tau := \langle \tau(G_1 \times G_2) \rangle_{\mathbb{Z}}$$

będzie podgrupą generowaną przez elementy $\tau(g_1, g_2)$, $(g_1, g_2) \in G_1 \times G_2$. Wobec zawierania $\tau(G_1 \times G_2) \subset T$ (w **Set**) i domkniętości T względem brania kombinacji $\mathbb{Z}$ -liniowych elementów mamy kanoniczny monomorfizm grup przemianych (zanurzenie) $j_{T_\tau} : T_\tau \rightarrow T$, a wobec tego τ kanonicznie określa obiekt $(T_\tau, \underline{\tau}) \in {}^{G_1}L^{G_2}$ o własności

$$j_{T_\tau} \circ \underline{\tau} = \tau.$$

Istotnie, powyższe zachodzi (trywialnie) w **Set**, a przy tym zanurzenie j_{T_τ} tworzy ledwie wierny obraz swej dziedziny w przeciwdziedziny, więc śród- R -liniowość τ jest dziedziczona przez $\underline{\tau}$. W tych okolicznościach inicjalność τ gwarantuje istnienie homomorfizmu grup przemianych $\tilde{\tau} : T \rightarrow T_\tau$ o własności

$$\tilde{\tau} \circ \tau = \underline{\tau},$$

a zatem zachodzi tożsamość

$$j_{T_\tau} \circ \tilde{\tau} \circ \tau = j_{T_\tau} \circ \underline{\tau} = \tau \equiv \text{id}_T \circ \tau,$$

która wobec tejże inicjalności τ daje nam równość

$$j_{T_\tau} \circ \tilde{\tau} = \text{id}_T,$$

implikującą postulowaną surjektywność zanurzenia kanonicznego,

$$\text{Im } j_{T_\tau} = T.$$

- (ii) $\Rightarrow$ (i) Niechaj $\tilde{\varphi}_1 : T \rightarrow H$ i $\tilde{\varphi}_2 : T \rightarrow H$ będą dwoma homomorfizmami grup przemianych domykającymi Diag. (18),

$$\tilde{\varphi}_1 \circ \tau = \varphi = \tilde{\varphi}_2 \circ \tau,$$

skąd wniosek:

$$\tilde{\varphi}_1 \upharpoonright_{\tau(G_1 \times G_2)} = \tilde{\varphi}_2 \upharpoonright_{\tau(G_1 \times G_2)}.$$

Równość (17) przesądza o pożądaney równości obu homomorfizmów (wobec ich $\mathbb{Z}$ -liniowości),

$$\tilde{\varphi}_1 = \tilde{\varphi}_2.$$

□

W następnej kolejności zajmujemy się omówieniem operacji tensorowania odwzorowań liniowych. Nasza dyskusja będzie zarazem stanowić pierwszą demonstrację siły pojęcia morfizmu uniwersalnego. Zaczniemy, jak (niemal) zawsze od

Definicja 8. Przyjmijmy zapis Def. 7 i niechaj $G_1, H_1 \in \mathbf{Mod}_{R^{\text{op}}}$ i $G_2, H_2 \in \mathbf{Mod}_R$. **Iloczyn tensorowy nad R odwzorowań R -liniowych** $\chi_1 \in \text{Hom}_{R^{\text{op}}}(G_1, H_1)$ i $\chi_2 \in \text{Hom}_R(G_2, H_2)$ to (jedyne) homomorfizm grup przemiennej

$$\chi_1 \otimes \chi_2 : G_1 \otimes_R G_2 \longrightarrow H_1 \otimes_R H_2$$

o własności

$$\forall (g_1, g_2) \in G_1 \times G_2 : (\chi_1 \otimes \chi_2)(g_1 \otimes_R g_2) = \chi_1(g_1) \otimes_R \chi_2(g_2).$$

Stwierdzenie 4. Dla dowolnego pierścienia R i dowolnych $G_1, H_1 \in \mathbf{Mod}_{R^{\text{op}}}$, $G_2, H_2 \in \mathbf{Mod}_R$ oraz $(\chi_1, \chi_2) \in \text{Hom}_{R^{\text{op}}}(G_1, H_1) \times \text{Hom}_R(G_2, H_2)$ homomorfizm grup przemiennej $\chi_1 \otimes \chi_2$ jest dobrze określony.

Dowód: Rozważmy odwzorowanie

$$\varphi : G_1 \times G_2 \longrightarrow H_1 \otimes_R H_2 : (g_1, g_2) \longmapsto \chi_1(g_1) \otimes_R \chi_2(g_2).$$

Jest ono jawnie $\text{śród-}R$ -liniowe, zatem w świetle uniwersalności iloczynu tensorowego nad R określa ono jednoznacznie odwzorowanie $\chi_1 \otimes \chi_2 := \tilde{\varphi}$, o którym mowa w dowodzonym stwierdzeniu. □

Uwaga 2. Przyjęty zapis iloczynu odwzorowań liniowych może być mylący, sugeruje bowiem, jakoby $\chi_1 \otimes \chi_2$ było iloczynem tensorowym odwzorowań χ_1 i χ_2 traktowanych jako elementy $\mathbb{Z}$ -modułów (tj. grup przemiennej) $\text{Hom}_{\mathbb{Z}}(G_1, H_1)$ i $\text{Hom}_R(G_2, H_2)$, odpowiednio, tymczasem skonstruowane poniżej odwzorowanie $\text{Hom}_{\mathbb{Z}}(G_1, H_1) \otimes_{\mathbb{Z}} \text{Hom}_R(G_2, H_2) \longrightarrow \text{Hom}_{\mathbb{Z}}(G_1 \otimes_R G_2, H_1 \otimes_R H_2)$ nie jest w ogólności ani surjektywne, ani iniektywne.

Stwierdzenie 5. Przyjmijmy zapis Def. 8. Istnieje kanoniczny homomorfizm $\mathbb{Z}$ -modułów

$$\iota : \text{Hom}_R(G_1, H_1) \otimes_{\mathbb{Z}} \text{Hom}_R(G_2, H_2) \longrightarrow \text{Hom}_{\mathbb{Z}}(G_1 \otimes_R G_2, H_1 \otimes_R H_2)$$

o własności

$$\iota(\chi_1 \otimes_{\mathbb{Z}} \chi_2) = \chi_1 \otimes \chi_2.$$

Dowód: Odwzorowanie

$$\varphi : \text{Hom}_R(G_1, H_1) \times \text{Hom}_R(G_2, H_2) \longrightarrow \text{Hom}_{\mathbb{Z}}(G_1 \otimes_R G_2, H_1 \otimes_R H_2)$$

$$: (\chi_1, \chi_2) \longmapsto \chi_1 \otimes \chi_2$$

jest jawnie $\mathbb{Z}$ -dwuliniowe, więc też automatycznie $\text{śród-}\mathbb{Z}$ -liniowe, a zatem określa jednoznacznie odwzorowanie $\iota := \tilde{\varphi}$, o którym mowa w dowodzonym stwierdzeniu. □

Mamy przydatne

Stwierdzenie 6. Przyjmijmy zapis Def. 8. Dla dowolnych $G_1, H_1, K_1 \in \mathbf{Mod}_{R^{\text{op}}}$ i $G_2, H_2, K_2 \in \mathbf{Mod}_R$ oraz $\chi_1 \in \text{Hom}_{R^{\text{op}}}(G_1, H_1)$, $\chi_2 \in \text{Hom}_R(G_2, H_2)$ i $\psi_1 \in \text{Hom}_R(H_1, K_1)$, $\psi_2 \in \text{Hom}_R(H_2, K_2)$ zachodzi tożsamość

$$(19) \quad (\psi_1 \otimes \psi_2) \circ (\chi_1 \otimes \chi_2) = (\psi_1 \circ \chi_1) \otimes (\psi_2 \circ \chi_2).$$

W szczególności ilekroć χ_1 i χ_2 są odwracalne, otrzymujemy

$$(\chi_1 \otimes \chi_2)^{-1} = \chi_1^{-1} \otimes \chi_2^{-1}.$$

Podobnie, surjektywność χ_1 i χ_2 implikuje surjektywność $\chi_1 \otimes \chi_2$ wobec tożsamości

$$\text{Im}(\chi_1 \otimes \chi_2) = \text{Im} \chi_1 \otimes_R \text{Im} \chi_2.$$

Dowód: Wobec Równ. (16) oraz $\mathbb{Z}$ -liniowości $\otimes_R$ (a także po uwzględnieniu $\mathbb{Z}$ -liniowości superpozycji odwzorowań $\mathbb{Z}$ -liniowych, jakimi są – na mocy Stw. 4 – odwzorowania $\psi_1 \otimes \psi_2$ i $\chi_1 \otimes \chi_2$) wystarczy sprawdzić dowodzoną tożsamość (19) na generatorach $g_1 \otimes_R g_2$, $(g_1, g_2) \in G_1 \times G_2$ grupy przemiennej $G_1 \otimes_R G_2$, co jest rzeczą prostą. $\square$

W podsumowaniu dotychczasowej dyskusji możemy wypowiedzieć związane

Twierdzenie 4. Przyjmijmy dotychczasowy zapis. Iloczyn tensorowy określa funktor kowariantny $\otimes_R : \mathbf{Mod}_{R^{\text{op}}} \times \mathbf{Mod}_R \rightarrow \mathbf{AbGrp}$ o składowej obiektowej $(G_1, G_2) \mapsto G_1 \otimes_R G_2$ i składowej morfizmowej $(\chi_1, \chi_2) \mapsto \chi_1 \otimes \chi_2$.

Dowód: Wynika wprost z Def. 8 oraz Stw. 6. $\square$

Uniwersalna natura iloczynu tensorowego dostarcza nam potężnego narzędzia analizy jego własności strukturalnych, z których kilka opiszemy w dalszej części. Nim to uczynimy, potrzebujemy przypomnieć prostą obserwację z dziedziny algebry liniowej: Każdy *prawy* (wzgl. *lewy*) moduł G nad pierścieniem R z działaniem $G \times R \rightarrow G : (g, r) \mapsto g \triangleleft r$ (wzgl. $R \times G \rightarrow G : (r, g) \mapsto r \triangleright g$) niesie kanoniczną strukturę *lewego* (wzgl. *prawego*) modułu nad pierścieniem przeciwnym R^{op} (o nośniku R , wyposażonego w mnożenie $R^{\times 2} \ni (r_1, r_2) \mapsto r_2 \cdot_R r_1 \equiv r_1 \cdot_{R^{\text{op}}} r_2 \in R$) określoną⁷ przez działanie $R^{\text{op}} \times G \rightarrow G : (r, g) \mapsto g \triangleleft r \equiv r \triangleright_{\text{op}} g$ (wzgl. $G \times R^{\text{op}} \rightarrow G : (g, r) \mapsto r \triangleright g \equiv g \triangleleft_{\text{op}} r$) i oznaczaną w dalszej części wykładu symbolem $G^{(\text{op})}$.

Studium podstawowych własności iloczynu tensorowego zaczynamy od

Twierdzenie 5 (O przemienności iloczynu tensorowego). Przyjmijmy zapis Def. 7 i niechaj $G_1^{(\text{op})}$ (wzgl. $G_2^{(\text{op})}$) oznacza lewy (wzgl. prawy) R^{op} -moduł o nośniku G_1 (wzgl. G_2) i strukturze indukowanej w naturalny sposób ze struktury prawego (wzgl. lewego) R -modułu na G_1 (wzgl. G_2). Istnieje kanoniczny izomorfizm grup przemiennych

$$\sigma_{G_1, G_2} : G_1 \otimes_R G_2 \xrightarrow{\cong} G_2^{(\text{op})} \otimes_{R^{\text{op}}} G_1^{(\text{op})}$$

o własności

$$\forall (g_1, g_2) \in G_1 \times G_2 : \sigma_{G_1, G_2}(g_1 \otimes_R g_2) = g_2 \otimes_{R^{\text{op}}} g_1.$$

Dowód: Wprost na mocy definicji $G_\alpha^{(\text{op})}$, $\alpha \in \{1, 2\}$ odwzorowanie

$$\varphi : G_1 \times G_2 \rightarrow G_2^{(\text{op})} \otimes_{R^{\text{op}}} G_1^{(\text{op})} : (g_1, g_2) \mapsto g_2 \otimes_{R^{\text{op}}} g_1$$

jest *śród- R -liniowe*, istnieje zatem jedyne odwzorowanie $\mathbb{Z}$ -liniowe

$$\sigma_{G_1, G_2} : G_1 \otimes_R G_2 \rightarrow G_2^{(\text{op})} \otimes_{R^{\text{op}}} G_1^{(\text{op})}$$

o własności wskazanej w tezie dowodzonego twierdzenia. Analogicznie dowodzimy istnienia jedynego odwzorowania $\mathbb{Z}$ -liniowego

$$\tau_{G_1, G_2} : G_2^{(\text{op})} \otimes_{R^{\text{op}}} G_1^{(\text{op})} \rightarrow G_1 \otimes_R G_2$$

o własności

$$\forall (g_1, g_2) \in G_1 \times G_2 : \tau_{G_1, G_2}(g_2 \otimes_{R^{\text{op}}} g_1) = g_1 \otimes_R g_2.$$

⁷Istotnie, mamy np. $(r_1 \cdot_{\text{op}} r_2) \triangleright_{\text{op}} g \equiv g \triangleleft (r_1 \cdot_{\text{op}} r_2) \equiv g \triangleleft (r_2 \cdot r_1) = (g \triangleleft r_2) \triangleleft r_1 \equiv r_1 \triangleright_{\text{op}} (r_2 \triangleright_{\text{op}} g)$.

Otrzymujemy więc równości, trywialnie spełnione na generatorach, a więc i ogólnie,

$$\sigma_{G_1, G_2} \circ \tau_{G_1, G_2} = \text{id}_{G_2^{(\text{op})} \otimes_{R^{\text{op}}} G_1^{(\text{op})}},$$

$$\tau_{G_1, G_2} \circ \sigma_{G_1, G_2} = \text{id}_{G_1 \otimes_R G_2}.$$

□

Celem zbadania zagadnienia łączności operacji tensorowania modułów uogólnimy najpierw nasze dotychczasowe rozważania w sposób opisany w

Stwierdzenie 7. Przyjmijmy zapis Def.7 oraz 8 i niechaj $G_1, H_1 \in \mathbf{Mod}_{(R_2, R_1^{\text{op}})}$, $G_2, H_2 \in \mathbf{Mod}_{R_1}$, $G_3, H_3 \in \mathbf{Mod}_{R_1^{\text{op}}}$, $G_4, H_4 \in \mathbf{Mod}_{(R_1, R_2^{\text{op}})}$. Wówczas

(i) $G_1 \otimes_{R_1} G_2$ jest lewym R_2 -modułem z działaniem określonym na generatorach:

$$\forall_{(r, g_1, g_2) \in R_2 \times G_1 \otimes_{R_1} G_2} : r \triangleright_{\otimes} (g_1 \otimes_{R_1} g_2) := (r \triangleright_{(1)} g_1) \otimes_{R_1} g_2.$$

(ii) $\forall_{(\chi_1, \chi_2) \in \text{Hom}_{(R_2, R_1)}(G_1, H_1) \times \text{Hom}_{R_1}(G_2, H_2)} : \chi_1 \otimes \chi_2 \in \text{Hom}_{R_2}(G_1 \otimes_{R_1} G_2, H_1 \otimes_{R_1} H_2).$

(iii) $G_3 \otimes_{R_1} G_4$ jest prawym R_2 -modułem z działaniem określonym na generatorach:

$$\forall_{(g_3, g_4, r) \in G_3 \otimes_{R_1} G_4 \times R_2} : (g_3 \otimes_{R_1} g_4) \triangleleft_{\otimes} r := g_3 \otimes_{R_1} (g_4 \triangleleft_{(4)} r).$$

(iv) $\forall_{(\psi_1, \psi_2) \in \text{Hom}_{R_1}(G_3, H_3) \times \text{Hom}_{(R_1, R_2)}(G_4, H_4)} : \psi_1 \otimes \psi_2 \in \text{Hom}_{R_2}(G_3 \otimes_{R_1} G_4, H_3 \otimes_{R_1} H_4).$

Dowód: Przedstawimy jedynie dowód punktów (i) i (ii) tezy, dowód pozostałych punktów przebiega w pełni analogicznie.

Ad (i) Określmy dla dowolnego $r \in R_2$ odwzorowanie

$$\varphi_r : G_1 \times G_2 \longrightarrow G_1 \otimes_{R_1} G_2 : (g_1, g_2) \longmapsto (r \triangleright_{(1)} g_1) \otimes_{R_1} g_2.$$

Jest ono jawnie śród- R_1 -liniowe (wobec przemienności działań: lewego (pierścienia R_2) i prawego (pierścienia R_1)), więc też indukuje jedyne odwzorowanie $\mathbb{Z}$ -liniowe

$$\ell_r^{\otimes} := \widetilde{\varphi_r} : G_1 \otimes_{R_1} G_2 \longrightarrow G_1 \otimes_{R_1} G_2$$

o pożądanej własności

$$\ell_r^{\otimes}(g_1 \otimes_{R_1} g_2) = (r \triangleright_{(1)} g_1) \otimes_{R_1} g_2.$$

Bez trudu sprawdzamy, że to ostatnie zadaje strukturę lewego R_2 -modułu na swej dziedzinie, według schematu

$$\begin{aligned} \ell_r^{\otimes} : R_2 \times G_1 \otimes_{R_1} G_2 &\longrightarrow G_1 \otimes_{R_1} G_2 \\ : \left(r, \sum_{(g_1, g_2) \in G_1 \times G_2} \nu(g_1, g_2) \triangleright (g_1 \otimes_{R_1} g_2) \right) &\longmapsto \sum_{(g_1, g_2) \in G_1 \times G_2} \nu(g_1, g_2) \triangleright \ell_r^{\otimes}(g_1 \otimes_{R_1} g_2). \end{aligned}$$

Ad (ii) Trywialne sprawdzenie na generatorach.

□

Możemy już teraz wysławić

Twierdzenie 6 (O łączności iloczynu tensorowego). Przyjmijmy dotychczasowy zapis i niechaj $G_1 \in \mathbf{Mod}_{R_1^{\text{op}}}$, $G_2 \in \mathbf{Mod}_{(R_1, R_2^{\text{op}})}$, $G_3 \in \mathbf{Mod}_{R_2}$. Istnieje kanoniczny izomorfizm naturalny

$$\begin{array}{ccc} & \xrightarrow{\otimes_{R_2} \circ (\otimes_{R_1} \times \text{Id}_{\mathbf{Mod}_{R_2}})} & \\ & \Downarrow \alpha_{\cdot, \cdot, \cdot} & \\ \mathbf{Mod}_{R_1^{\text{op}}} \times \mathbf{Mod}_{(R_1, R_2^{\text{op}})} \times \mathbf{Mod}_{R_2} & & \mathbf{AbGrp} \\ & \xleftarrow{\otimes_{R_2} \circ (\otimes_{R_1} \times \text{Id}_{\mathbf{Mod}_{R_2}})} & \end{array}$$

między funktorami kowariantnymi

$$\begin{aligned} \otimes_{R_2} \circ (\otimes_{R_1} \times \text{Id}_{\mathbf{Mod}_{R_2}}) & : \mathbf{Mod}_{R_1^{\text{op}}} \times \mathbf{Mod}_{(R_1, R_2^{\text{op}})} \times \mathbf{Mod}_{R_2} \longrightarrow \mathbf{AbGrp} \\ & : (G_1, G_2, G_3) \longmapsto (G_1 \otimes_{R_1} G_2) \otimes_{R_2} G_3 \end{aligned}$$

oraz

$$\begin{aligned} \otimes_{R_1} \circ (\text{Id}_{\mathbf{Mod}_{R_1}} \times \otimes_{R_2}) & : \mathbf{Mod}_{R_1^{\text{op}}} \times \mathbf{Mod}_{(R_1, R_2^{\text{op}})} \times \mathbf{Mod}_{R_2} \longrightarrow \mathbf{AbGrp} \\ & : (G_1, G_2, G_3) \longmapsto G_1 \otimes_{R_1} (G_2 \otimes_{R_2} G_3), \end{aligned}$$

o własności

$$\forall_{(g_1, g_2, g_3) \in G_1 \times G_2 \times G_3} : \alpha_{G_1, G_2, G_3}((g_1 \otimes_{R_1} g_2) \otimes_{R_2} g_3) = g_1 \otimes_{R_1} (g_2 \otimes_{R_2} g_3).$$

Dowód: Ustalenie postaci postulowanego izomorfizmu na generatorach gwarantuje – jak uprzednio – jego jednoznaczność. Pozostaje dowieść jego istnienia, co uczynimy w sposób konstruktywny. Zdefiniujmy, dla dowolnego $g_3 \in G_3$, odwzorowanie

$$h_{g_3} : G_2 \longrightarrow G_2 \otimes_{R_2} G_3 : g_2 \longmapsto g_2 \otimes_{R_2} g_3,$$

jawnie R_1 -liniowe,

$$r_1 \triangleright h_{g_3}(g_2) \equiv r_1 \triangleright (g_2 \otimes_{R_2} g_3) \equiv (r_1 \triangleright g_2) \otimes_{R_2} g_3 \equiv h_{g_3}(r_1 \triangleright g_2),$$

po czym rozważmy indukowane przezeń odwzorowanie $\mathbb{Z}$ -liniowe

$$\widehat{h}_{g_3} := \text{id}_{G_1} \otimes h_{g_3} : G_1 \otimes_{R_1} G_2 \longrightarrow G_1 \otimes_{R_1} (G_2 \otimes_{R_2} G_3).$$

To ostatnie zadaje odwzorowanie

$$\widehat{h} : G_1 \otimes_{R_1} G_2 \times G_3 \longrightarrow G_1 \otimes_{R_1} (G_2 \otimes_{R_2} G_3),$$

które na generatorach określamy jako

$$\widehat{h}(g_1 \otimes_{R_1} g_2, g_3) := \widehat{h}_{g_3}(g_1 \otimes_{R_1} g_2).$$

Odwzorowanie to jest $\mathbb{Z}$ -liniowe w pierwszym argumencie wprost na mocy $\mathbb{Z}$ -liniowości $\widehat{h}_{g_3}$, a nadto – $\mathbb{Z}$ -liniowe w drugim argumencie wobec tożsamości (zapisanej dla dowolnych $g_1 \otimes_{R_1} g_2 \in G_1 \otimes_{R_1} G_2$ i $g_3, h_3 \in G_3$)

$$\begin{aligned} \widehat{h}_{g_3 + (3)h_3}(g_1 \otimes_{R_1} g_2) & \equiv g_1 \otimes_{R_1} h_{g_3 + (3)h_3}(g_2) = g_1 \otimes_{R_1} (g_2 \otimes_{R_2} (g_3 + (3)h_3)) \\ & = g_1 \otimes_{R_1} (g_2 \otimes_{R_2} g_3 + \otimes g_2 \otimes_{R_2} h_3) = g_1 \otimes_{R_1} (g_2 \otimes_{R_2} g_3) + \otimes g_1 \otimes_{R_1} (g_2 \otimes_{R_2} h_3) \\ & \equiv \widehat{h}_{g_3}(g_1 \otimes_{R_1} g_2) + \otimes \widehat{h}_{h_3}(g_1 \otimes_{R_1} g_2). \end{aligned}$$

Także na generatorach sprawdzamy jego śród- R_2 -jednorodność, z której wynika istnienie jedynego odwzorowania $\mathbb{Z}$ -liniowego α o pożądanej własności. Dowód istnienia odwrotności α przebiega w pełni analogicznie (sprawdzenie na generatorach). I wreszcie naturalność opisanej tu rodziny izomorfizmów jest oczywistą konsekwencją ich definicji. $\square$

Uwaga 3. Zagadnienie uniwersalne dla odwzorowań śród- R -liniowych ma swoje naturalne uogólnienie na przypadek n -liniowy dla $n > 2$, które w przypadku $n = 3$ prowadzi do definicji grupy przemiennej $G_1 \otimes_{R_1} G_2 \otimes_{R_2} G_3$, zwanej potrójnym iloczynem tensorowym. Łatwo wykazać istnienie kanonicznego izomorfizmu grup przemiennej

$$(G_1 \otimes_{R_1} G_2) \otimes_{R_2} G_3 \cong G_1 \otimes_{R_1} G_2 \otimes_{R_2} G_3.$$

Uogólnienie tej obserwacji formalizujemy w poniższej definicji, pozostawiając Czytelnikowi dowód jej sensowności (tj. istnienia przedmiotu tejże) jako proste, a pożyteczne ćwiczenie.

Definicja 9. Przyjmijmy dotychczasowy zapis i dla ustalonego $n \in \mathbb{N} \setminus \{0, 1\}$ niechaj $G_1 \in \mathbf{Mod}_{R_1^{\text{op}}}$, $G_n \in \mathbf{Mod}_{R_{n-1}}$ oraz $G_k \in \mathbf{Mod}_{(R_{k-1}, R_k)}$, $k \in \overline{2, n-1}$. Niech też ${}_{G_1}L^{G_2}L^{G_3}\dots L^{G_{n-1}}L^{G_n}$ będzie kategorią, której obiektami są pary (H, φ) złożone z $H \in \mathbf{AbGrp}$ i odwzorowania $\varphi : G_1 \times G_2 \times \dots \times G_n \longrightarrow H$ n -addytywnego i śród- R_l -jednorodnego dla każdej pary (G_l, G_{l+1}) , $l \in \overline{1, n-1}$ i której morfizmami – dla ustalonych obiektów $(H_\alpha, \varphi_\alpha)$, $\alpha \in \{1, 2\}$, utworzonych przez $H_\alpha \in \mathbf{AbGrp}$ i odwzorowania $\varphi_\alpha : G_1 \times G_2 \times \dots \times G_n \longrightarrow H_\alpha$ – są odwzorowania

$$\text{Hom}_{G_1L^{G_2}L^{G_3}\dots L^{G_{n-1}}L^{G_n}}((H_1, \varphi_1), (H_2, \varphi_2)) = \{ \chi \in \mathbf{AbGrp}(H_1, H_2) \mid \varphi_2 = \chi \circ \varphi_1 \}.$$

n -krotny iloczyn tensorowy nad $(R_1, R_2, \dots, R_{n-1})$ rodziny modułów $\{G_i\}_{i \in \overline{1, n}}$ to struktura inicjalna

$$(G_1 \otimes_{R_1} G_2 \otimes_{R_2} G_3 \otimes_{R_3} \dots \otimes_{R_{n-1}} G_n, \otimes_R^n)$$

dla warunku

$$P_{(G_1, G_2, \dots, G_n); F_1, F_2}(H, \varphi) \equiv \text{„}\varphi : G_1 \times G_2 \times \dots \times G_n \longrightarrow H \text{ jest}$$

$$\text{odwzorowaniem śród-}R_l\text{-liniowym dla } l \in \overline{1, n-1}\text{”},$$

w którego zapisie $F_1 : \mathbf{Mod}_{R_1^{\text{op}}} \times \mathbf{Mod}_{(R_1, R_2)} \times \mathbf{Mod}_{(R_2, R_3)} \times \dots \times \mathbf{Mod}_{(R_{n-1}, R_n)} \times \mathbf{Mod}_{R_n} \longrightarrow \mathbf{Set}$ jest funktorem przyporządkowującym n -tce (bi)modułów (wzgl. stosownych odwzorowań liniowych) iloczyn kartezjański ich nośników (wzgl. tychże odwzorowań), a $F_2 : \mathbf{AbGrp} \longrightarrow \mathbf{Set}$ jest funktorem zapominania jak w Def. 7.

Istnienie kanonicznej struktury (R, R) -bimodułu na R , określonej przez lewo- i prawostronne mnożenie (łącznie!) przez elementy R , pozwala nam w przypadku dowolnego $G_1 \in \mathbf{Mod}_{R^{\text{op}}}$ traktować $G_1 \otimes_R R$ jako R -moduł prawostronny, a w przypadku dowolnego $G_2 \in \mathbf{Mod}_R$ – $R \otimes_R G_2$ jako R -moduł lewostronny. Obserwacja ta nadaje sens

Stwierdzenie 8. Przyjmijmy zapis Def. 7 oraz Równ. (16). Odwzorowanie

$${}_{G_1}\xi : G_1 \longrightarrow G_1 \otimes_R R : g \longmapsto g \otimes_R \mathbf{1}_R$$

jest izomorfizmem R -modułów prawostronnych, o odwrotności zadanej przez odwzorowanie

$$\begin{aligned} {}_{G_1}\kappa & : G_1 \otimes_R R \longrightarrow G_1 \\ & : \sum_{(g, r) \in G_1 \times R} \nu(g, r) \triangleright (g \otimes_R r) \longmapsto \sum_{(g, r) \in G_1 \times R} \nu(g, r) \triangleright (g \triangleleft r). \end{aligned}$$

Podobnie odwzorowanie

$$\xi_{G_2} : G_2 \longrightarrow R \otimes_R G_2 : g \longmapsto \mathbf{1}_R \otimes_R g$$

jest izomorfizmem R -modułów lewostronnych, o odwrotności zadanej przez odwzorowanie

$$\begin{aligned} \kappa_{G_2} & : R \otimes_R G_2 \longrightarrow G_2 \\ & : \sum_{(r, g) \in R \times G_2} \nu(r, g) \triangleright (r \otimes_R g) \longmapsto \sum_{(r, g) \in R \times G_2} \nu(r, g) \triangleright (r \triangleright g). \end{aligned}$$

Dowód: Dowodzimy pierwszej części tezy, dowód drugiej części jest w pełni analogiczny. Łatwo sprawdzamy, że jawnie $\mathbb{Z}$ -dwuliniowe (wprost z definicji działania) odwzorowanie

$$\wp : G_1 \times R \longrightarrow G_1 : (g, r) \longmapsto g \triangleleft r$$

jest śród- R -jednorodne,

$$\forall_{(g, r, s) \in G_1 \times R \times R} : \wp((g \triangleleft r), s) \equiv (g \triangleleft r) \triangleleft s = g \triangleleft (r \cdot_R s) \equiv g \triangleleft (r \triangleright s) \equiv \wp(g, r \triangleright s),$$

to zaś implikuje istnienie (jedyne) odwzorowania $\mathbb{Z}$ -liniowego ${}_{G_1}\kappa \equiv \widetilde{\wp}$ jak w tezie dowodzonego stwierdzenia. Tożsamości ${}_{G_1}\kappa \circ {}_{G_1}\xi = \text{id}_{G_1}$ oraz ${}_{G_1}\xi \circ {}_{G_1}\kappa = \text{id}_{G_1 \otimes_R R}$ sprawdzamy bezpośrednio na generatorach (tensorach prostych). $\square$

Budowanie relacji iloczynu tensorowego z produktem i sumą prostą modułów zaczynamy od elementarnego

Stwierdzenie 9. Przyjmijmy dotychczasowy zapis, ustalmy zbiory (indeksów) Λ_1, Λ_2 i niechaj $G_1. \in \mathbf{Mod}_{R^{\text{op}}}^{\Lambda_1}$ oraz $G_2. \in \mathbf{Mod}_R^{\Lambda_2}$. Odwzorowanie

$$\begin{aligned} \tau &: \prod_{\lambda_1 \in \Lambda_1} G_{1\lambda_1} \times \prod_{\lambda_2 \in \Lambda_2} G_{2\lambda_2} \longrightarrow \prod_{(\lambda_1, \lambda_2) \in \Lambda_1 \times \Lambda_2} G_{1\lambda_1} \otimes_R G_{2\lambda_2} \\ &: (g^{(1)}, g^{(2)}) \longmapsto (g^{(1)} \circ \text{pr}_1) \otimes_R (g^{(2)} \circ \text{pr}_2), \end{aligned}$$

w którego zapisie $\text{pr}_\alpha : \Lambda_1 \times \Lambda_2 \longrightarrow \Lambda_\alpha$, $\alpha \in \{1, 2\}$ są rzutami kanonicznymi, indukuje kanoniczny homomorfizm grup przemiennych

$$\tilde{\tau} : \prod_{\lambda_1 \in \Lambda_1} G_{1\lambda_1} \otimes_R \prod_{\lambda_2 \in \Lambda_2} G_{2\lambda_2} \longrightarrow \prod_{(\lambda_1, \lambda_2) \in \Lambda_1 \times \Lambda_2} G_{1\lambda_1} \otimes_R G_{2\lambda_2}$$

o własności

$$\forall_{(g^{(1)}, g^{(2)}) \in G_{1.} \times G_{2.}} : \tilde{\tau}(g^{(1)} \otimes_R g^{(2)}) = (g^{(1)} \circ \text{pr}_1) \otimes_R (g^{(2)} \circ \text{pr}_2).$$

Dowód: Odwzorowanie τ jest jawnie $\mathbb{Z}$ -dwuliniowe i śród- R -jednorodne, zatem teza dowodzonego stwierdzenia wynika wprost z Tw. 3. $\square$

W ogólności nie możemy orzekać o własnościach $\tilde{\tau}$ bez poczynienia dodatkowych założeń odnośnie do struktury rodzin modułów pojawiających się w jego definicji (znane są przykłady odwzorowań nieiniektywnych i niesurjektywnych). Na większą precyzję wypowiedzi pozwala ograniczenie rozważań do podmodułów modułów produktowych danych przez sumy proste. Oto więc znajdujemy ważne

Twierdzenie 7. Przyjmijmy zapis Stw. 9. Kanoniczny homomorfizm grup przemiennych $\tilde{\tau}$ ogranicza się do iloczynu podmodułów $\bigoplus_{\lambda_\alpha \in \Lambda_\alpha} G_{\alpha\lambda_\alpha} \subset \prod_{\lambda_\alpha \in \Lambda_\alpha} G_{\alpha\lambda_\alpha}$, $\alpha \in \{1, 2\}$, tj. zadaje kanoniczny homomorfizm grup przemiennych

$$\tilde{\tau} : \bigoplus_{\lambda_1 \in \Lambda_1} G_{1\lambda_1} \otimes_R \bigoplus_{\lambda_2 \in \Lambda_2} G_{2\lambda_2} \longrightarrow \bigoplus_{(\lambda_1, \lambda_2) \in \Lambda_1 \times \Lambda_2} G_{1\lambda_1} \otimes_R G_{2\lambda_2},$$

przy czym sumy proste tensorowane w dziedzinie $\tilde{\tau}$ to sumy proste R -modułów, gdy tymczasem przeciwdziedzina jest sumą prostą $\mathbb{Z}$ -modułów. Homomorfizm ten jest izomorfizmem grup przemiennych.

Dowód: Wobec zerowości iloczynu tensorowego dowolnego elementu jednego modułu z elementem zerowym drugiego modułu $\tilde{\tau}$ -obraz iloczynu tensorowego skończonych kombinacji R -liniowych elementów $\bigoplus_{\lambda_1 \in \Lambda_1} G_{1\lambda_1}$ i – odpowiednio – $\bigoplus_{\lambda_2 \in \Lambda_2} G_{2\lambda_2}$ jest skończoną kombinacją $\mathbb{Z}$ -liniową tensorów prostych z $G_{1\lambda_1} \otimes_R G_{2\lambda_2}$, więc – w istocie –

$$\tilde{\tau}\left(\bigoplus_{\lambda_1 \in \Lambda_1} G_{1\lambda_1} \otimes_R \bigoplus_{\lambda_2 \in \Lambda_2} G_{2\lambda_2}\right) \subset \bigoplus_{(\lambda_1, \lambda_2) \in \Lambda_1 \times \Lambda_2} G_{1\lambda_1} \otimes_R G_{2\lambda_2}.$$

W świetle Stw. 9 pozostaje zatem znaleźć odwzorowanie $\mathbb{Z}$ -liniowe

$$h : \bigoplus_{(\lambda_1, \lambda_2) \in \Lambda_1 \times \Lambda_2} G_{1\lambda_1} \otimes_R G_{2\lambda_2} \longrightarrow \bigoplus_{\lambda_1 \in \Lambda_1} G_{1\lambda_1} \otimes_R \bigoplus_{\lambda_2 \in \Lambda_2} G_{2\lambda_2}$$

spełniające tożsamości

$$h \circ \tilde{\tau} = \text{id}_{\bigoplus_{\lambda_1 \in \Lambda_1} G_{1\lambda_1} \otimes_R \bigoplus_{\lambda_2 \in \Lambda_2} G_{2\lambda_2}}, \quad \tilde{\tau} \circ h = \text{id}_{\bigoplus_{(\lambda_1, \lambda_2) \in \Lambda_1 \times \Lambda_2} G_{1\lambda_1} \otimes_R G_{2\lambda_2}}.$$

Przywołując definicję sumy prostej jako struktury inicjalnej, stwierdzamy przy tym, że istnienie i jednoznaczność poszukiwanego odwzorowania będzie wynikać wprost z istnienia stosownej rodziny homomorfizmów grup przemiennych

$$\begin{aligned} \chi_{\cdot, \cdot} &: \Lambda_1 \times \Lambda_2 \longrightarrow \mathbf{AbGrp}_1 \\ &: (\lambda_1, \lambda_2) \longmapsto \chi_{\lambda_1, \lambda_2} \in \text{Hom}_{\mathbb{Z}}\left(G_{1\lambda_1} \otimes_R G_{2\lambda_2}, \bigoplus_{\mu_1 \in \Lambda_1} G_{1\mu_1} \otimes_R \bigoplus_{\mu_2 \in \Lambda_2} G_{2\mu_2}\right), \end{aligned}$$

której elementy wybieramy w postaci

$$(20) \quad \chi_{\lambda_1, \lambda_2} := j_{\lambda_1} \otimes j_{\lambda_2},$$

gdzie zastosowaliśmy notację Def. 2.9 oraz 8. Homomorfizmy te indukują odwzorowanie spełniające relację

$$h \circ j_{\lambda_1, \lambda_2} = \chi_{\lambda_1, \lambda_2},$$

wyrażoną w terminach włożeń kanonicznych

$$j_{\lambda_1, \lambda_2} : G_{1\lambda_1} \otimes_R G_{2\lambda_2} \longrightarrow \bigoplus_{(\mu_1, \mu_2) \in \Lambda_1 \times \Lambda_2} G_{1\mu_1} \otimes_R G_{2\mu_2}.$$

Oznaczmy symbolicznie

$$j_{\lambda_\alpha} : G_{\alpha\lambda_\alpha} \longrightarrow \bigoplus_{\mu_\alpha \in \Lambda_\alpha} G_{\alpha\mu_\alpha} : g_{\lambda_\alpha} \longmapsto \delta_{\lambda_\alpha, \cdot}^{\mathbb{Z}} \triangleright g_{\lambda_\alpha}, \quad \alpha \in \{1, 2\}$$

oraz

$$\begin{aligned} j_{\lambda_1, \lambda_2} & : G_{1\lambda_1} \otimes_R G_{2\lambda_2} \longrightarrow \bigoplus_{(\mu_1, \mu_2) \in \Lambda_1 \times \Lambda_2} G_{1\mu_1} \otimes_R G_{2\mu_2} \\ & : \sum_{(g_1, g_2) \in G_{1\lambda_1} \times G_{2\lambda_2}} \nu(g_1, g_2) \triangleright (g_1 \otimes_R g_2) \\ & \longmapsto \sum_{(g_1, g_2) \in G_{1\lambda_1} \times G_{2\lambda_2}} \delta_{(\lambda_1, \lambda_2), (\cdot, \cdot)}^{\mathbb{Z}} \cdot \nu(g_1, g_2) \triangleright (g_1 \otimes_R g_2) \end{aligned}$$

i przywołajmy Równ. (2.10). Możemy już teraz wprost sprawdzić – z wykorzystaniem definiującej własności (20), jak również $\mathbb{Z}$ -liniowości iloczynu tensorowego – pożądane tożsamości (na tensorach prostych z $\bigoplus_{\mu_1 \in \Lambda_1} G_{1\mu_1} \otimes_R \bigoplus_{\mu_2 \in \Lambda_2} G_{2\mu_2}$, dla dowolnych $r \in \mathcal{R}_0(R; \Lambda_1)$ i $s \in \mathcal{R}_0(R; \Lambda_2)$)

$$\begin{aligned} h \circ \tilde{\tau}(g \triangleleft_{(1)} r \otimes_R s \triangleright_{(2)} g) & = h(g \triangleleft_{(1)} r \circ \text{pr}_1 \otimes_R s \triangleright_{(2)} g \circ \text{pr}_2) \\ & \equiv \sum_{(\lambda_1, \lambda_2) \in \Lambda_1 \times \Lambda_2} h \circ j_{\lambda_1, \lambda_2} \circ \text{pr}_{\lambda_1, \lambda_2}(g \triangleleft_{(1)} r \circ \text{pr}_1 \otimes_R s \triangleright_{(2)} g \circ \text{pr}_2) \\ & = \sum_{(\lambda_1, \lambda_2) \in \Lambda_1 \times \Lambda_2} (j_{\lambda_1} \otimes j_{\lambda_2})(g_{\lambda_1} \triangleleft_{(1)} r_{\lambda_1} \otimes_R s_{\lambda_2} \triangleright_{(2)} g_{\lambda_2}) \\ & = \sum_{\lambda_1 \in \Lambda_1} \sum_{\lambda_2 \in \Lambda_2} j_{\lambda_1}(g_{\lambda_1} \triangleleft_{(1)} r_{\lambda_1}) \otimes_R j_{\lambda_2}(s_{\lambda_2} \triangleright_{(2)} g_{\lambda_2}) \\ & = \sum_{\lambda_1 \in \Lambda_1} j_{\lambda_1}(g_{\lambda_1} \triangleleft_{(1)} r_{\lambda_1}) \otimes_R \sum_{\lambda_2 \in \Lambda_2} j_{\lambda_2}(s_{\lambda_2} \triangleright_{(2)} g_{\lambda_2}) \\ & = \sum_{\lambda_1 \in \Lambda_1} j_{\lambda_1} \circ \text{pr}_{\lambda_1}(g \triangleleft_{(1)} r) \otimes_R \sum_{\lambda_2 \in \Lambda_2} j_{\lambda_2} \circ \text{pr}_{\lambda_2}(s \triangleright_{(2)} g) \\ & = g \triangleleft_{(1)} r \otimes_R s \triangleright_{(2)} g. \end{aligned}$$

Podobnie pokazujemy – dla dowolnej rodziny $N_{(\cdot, \cdot)} \in \mathcal{R}_0(\mathbb{Z}; \Lambda_1 \times \Lambda_2)$ –

$$\begin{aligned} & \tilde{\tau} \circ h(N_{(\cdot, \cdot)} \cdot \nu(g^{(1)} \circ \text{pr}_1, g^{(2)} \circ \text{pr}_2) \triangleright (g^{(1)} \circ \text{pr}_1 \otimes_R g^{(2)} \circ \text{pr}_2)) \\ & = \sum_{(\lambda_1, \lambda_2) \in \Lambda_1 \times \Lambda_2} \tilde{\tau} \circ h \circ j_{\lambda_1, \lambda_2} \circ \text{pr}_{\lambda_1, \lambda_2}(N_{(\cdot, \cdot)} \cdot \nu(g^{(1)} \circ \text{pr}_1, g^{(2)} \circ \text{pr}_2) \\ & \quad \triangleright (g^{(1)} \circ \text{pr}_1 \otimes_R g^{(2)} \circ \text{pr}_2)) \\ & = \sum_{(\lambda_1, \lambda_2) \in \Lambda_1 \times \Lambda_2} \tilde{\tau} \circ (j_{\lambda_1} \otimes j_{\lambda_2})(N_{(\lambda_1, \lambda_2)} \cdot \nu(g_{\lambda_1}^{(1)}, g_{\lambda_2}^{(2)}) \triangleright (g_{\lambda_1}^{(1)} \otimes_R g_{\lambda_2}^{(2)})) \\ & \equiv \sum_{(\lambda_1, \lambda_2) \in \Lambda_1 \times \Lambda_2} \tilde{\tau}(N_{(\lambda_1, \lambda_2)} \cdot \nu(g_{\lambda_1}^{(1)}, g_{\lambda_2}^{(2)}) \triangleright (j_{\lambda_1}(g_{\lambda_1}^{(1)}) \otimes_R j_{\lambda_2}(g_{\lambda_2}^{(2)}))) \\ & = \sum_{(\lambda_1, \lambda_2) \in \Lambda_1 \times \Lambda_2} \tilde{\tau}(N_{(\lambda_1, \lambda_2)} \cdot \nu(g_{\lambda_1}^{(1)}, g_{\lambda_2}^{(2)}) \triangleright (\delta_{\lambda_1, \cdot}^{\mathbb{Z}} \triangleright g_{\lambda_1}^{(1)} \otimes_R \delta_{\lambda_2, \cdot}^{\mathbb{Z}} \triangleright g_{\lambda_2}^{(2)})) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \tilde{\tau} \left(\sum_{(\lambda_1, \lambda_2) \in \Lambda_1 \times \Lambda_2} N_{(\lambda_1, \lambda_2)} \cdot \nu(g_{\lambda_1}^{(1)}, g_{\lambda_2}^{(2)}) \triangleright (\delta_{\lambda_1, \cdot 1}^{\mathbb{Z}} \triangleright g_{\lambda_1}^{(1)} \otimes_R \delta_{\lambda_2, \cdot 2}^{\mathbb{Z}} \triangleright g_{\lambda_2}^{(2)}) \right) \\
 &= \tilde{\tau} \left(N_{(\cdot, \cdot 2)} \cdot \nu(g_{\cdot 1}^{(1)}, g_{\cdot 2}^{(2)}) \triangleright (g_{\cdot 1}^{(1)} \otimes_R g_{\cdot 2}^{(2)}) \right) \\
 &= N_{(\text{pr}_1, \text{pr}_2)} \cdot \nu(g_{\cdot}^{(1)} \circ \text{pr}_1, g_{\cdot}^{(2)} \circ \text{pr}_2) \triangleright (g_{\cdot}^{(1)} \circ \text{pr}_1 \otimes_R g_{\cdot}^{(2)} \circ \text{pr}_2) \\
 &\equiv N_{(\cdot, \cdot)} \cdot \nu(g_{\cdot}^{(1)} \circ \text{pr}_1, g_{\cdot}^{(2)} \circ \text{pr}_2) \triangleright (g_{\cdot}^{(1)} \circ \text{pr}_1 \otimes_R g_{\cdot}^{(2)} \circ \text{pr}_2).
 \end{aligned}$$

□

Prostą konsekwencją powyższego twierdzenia jest

Stwierdzenie 10. Przyjmijmy zapis Def. 7 i niechaj $((V_\alpha, +_\alpha, P_\alpha, \bullet \mapsto 0_\alpha), \ell_\alpha)$, $\alpha \in \{1, 2\}$ będą dwiema przestrzeniami wektorowymi nad ciałem $\mathbb{K}$. Ich iloczyn tensorowy $V_1 \otimes_{\mathbb{K}} V_2$ spełnia warunek

$$\dim_{\mathbb{K}} (V_1 \otimes_{\mathbb{K}} V_2) = \dim_{\mathbb{K}} V_1 \cdot \dim_{\mathbb{K}} V_2.$$

Dowód: Pochodna Tw. 7 i stwierdzenia o rozkładzie przestrzeni wektorowej na (wewnętrzną) sumę prostą powłok liniowych elementów bazy. □

Istotnie pogłębiony wgląd w relację między iloczynem tensorowym i sumą prostą, tudzież produktem modułów uzyskujemy w przypadku modułów wolnych, do których teraz przechodzimy. Tytułem wprowadzenia sformułujemy

Stwierdzenie 11. Przyjmijmy dotychczasowy zapis. Niechaj $G \in \mathbf{Mod}_R$ będzie R -modulem wolnym o bazie $\{g_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}$, indeksowanej przez pewien zbiór Λ , i niech $H \in \mathbf{Mod}_{R^{\text{op}}}$. Wówczas

$$\forall_{\tau \in H \otimes_R G} \exists!_{h \in \mathcal{R}_0(H; \Lambda)} : \tau = \sum_{\lambda \in \Lambda} h_\lambda \otimes_R g_\lambda$$

i istnieje (niekanoniczny) izomorfizm grup przemiennej

$$H \otimes_R G \cong \bigoplus_{\lambda \in \Lambda} H.$$

Dowód: Wybór bazy w R -module G jest równoznaczny ze wskazaniem izomorfizmu R -modułów

$$G \cong \bigoplus_{\lambda \in \Lambda} \langle g_\lambda \rangle_R,$$

co w świetle Tw. 7 (a przy domyślnym zastosowaniu Stw. 6) pozwala zapisać

$$H \otimes_R G \cong H \otimes_R \bigoplus_{\lambda \in \Lambda} \langle g_\lambda \rangle_R \cong \bigoplus_{\lambda \in \Lambda} (H \otimes_R \langle g_\lambda \rangle_R).$$

Liniowa niezależność (nad R) każdego z elementów bazy $\{g_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}$ oznacza dalej, że odwzorowanie

$$\iota_\lambda : R \longrightarrow \langle g_\lambda \rangle_R : r \longmapsto r \triangleright g_\lambda$$

jest izomorfizmem R -modułów, którego istnienie daje nam, po uwzględnieniu tezy Stw. 8, pożądaný izomorfizm grup przemiennej

$$H \otimes_R G \cong \bigoplus_{\lambda \in \Lambda} (H \otimes_R \langle g_\lambda \rangle_R) \cong \bigoplus_{\lambda \in \Lambda} (H \otimes_R R) \cong \bigoplus_{\lambda \in \Lambda} H.$$

Powyższe rozumowanie pozwala nam bez trudu przeprowadzić dowód pierwszej części stwierdzenia. Istotnie, rozważmy dowolny tensor

$$\sum_{(h, g) \in H \times G} \nu(h, g) \triangleright (h \otimes_R g) \in H \otimes_R G,$$

określony przez rodzinę $\nu \in \mathcal{R}_0(\mathbb{Z}; H \times G)$. Uwzględniwszy skończoność tej ostatniej, jak również skończoność rodziny $r.(g) \in \mathcal{R}_0(R; \Lambda)$ wyznaczającej jednoznaczny rozkład elementu $g \in G$ w

bazie $\{g_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}$, wreszcie też wykorzystawszy śród- R -liniowość $\otimes_R$, stwierdzamy

$$\begin{aligned}
 \sum_{(h,g) \in H \times G} \nu(h,g) \triangleright (h \otimes_R g) &= \sum_{(h,g) \in H \times G} \nu(h,g) \triangleright \left(h \otimes_R \sum_{\lambda \in \Lambda} r_\lambda(g) \triangleright_G g_\lambda \right) \\
 &= \sum_{\lambda \in \Lambda} \sum_{(h,g) \in H \times G} \nu(h,g) \triangleright (h \otimes_R r_\lambda(g) \triangleright_G g_\lambda) \\
 &= \sum_{\lambda \in \Lambda} \sum_{(h,g) \in H \times G} \nu(h,g) \triangleright (h \triangleleft_H r_\lambda(g) \otimes_R g_\lambda) \\
 &= \sum_{\lambda \in \Lambda} \left(\sum_{(h,g) \in H \times G} \nu(h,g) \triangleright (h \triangleleft_H r_\lambda(g)) \right) \otimes_R g_\lambda,
 \end{aligned}$$

co jest poszukiwanym rozkładem,

$$h_\lambda := \sum_{(h,g) \in H \times G} \nu(h,g) \triangleright (h \triangleleft_H r_\lambda(g)) \in H.$$

Jego jednoznaczność wynika wprost z równoważności

$$\sum_{\lambda \in \Lambda} h_\lambda \otimes_R g_\lambda = \mathbf{0}_{H \otimes_R G} \iff \forall \lambda \in \Lambda : h_\lambda = \mathbf{0}_H,$$

której nietrywialną składową $\implies$ otrzymujemy ewaluując odwzorowanie $\mathbb{Z}$ -liniowe ${}_H\kappa \circ (\text{id}_H \otimes \iota_\mu^{-1} \circ \text{pr}_\mu)$ (patrz: Stw.8) na obu stronach równości z lewej strony dla każdego indeksu $\mu \in \Lambda$ z osobna. $\square$

Rozumowanie jak to przedstawione powyżej prowadzi nas wprost do

Stwierdzenie 12. Przyjmijmy dotychczasowy zapis. Jeśli oba moduły G_1 i G_2 są wolne, przy czym odnośne bazy to $\{g_{\lambda_1}^{(1)}\}_{\lambda_1 \in \Lambda_1}$ i $\{g_{\lambda_2}^{(2)}\}_{\lambda_2 \in \Lambda_2}$, to w zapisie dowolnego elementu

$$\sum_{\lambda_1 \in \Lambda_1} g_{\lambda_1}^{(1)} \otimes_R h_{\lambda_1}^{(2)} \equiv \sum_{\lambda_2 \in \Lambda_2} h_{\lambda_2}^{(1)} \otimes_R g_{\lambda_2}^{(2)}$$

w terminach elementów $h_{\lambda_1}^{(2)} \in G_2$ i $h_{\lambda_2}^{(1)} \in G_1$, o rozkładach

$$h_{\lambda_1}^{(2)} = \sum_{\lambda_2 \in \Lambda_2} h_{\lambda_1, \lambda_2}^{(2)} \triangleright_{(2)} g_{\lambda_2}^{(2)}, \quad h_{\lambda_2}^{(1)} = \sum_{\lambda_1 \in \Lambda_1} g_{\lambda_1}^{(1)} \triangleleft_{(1)} h_{\lambda_2, \lambda_1}^{(1)},$$

o którym orzeka Stw. 11, są spełnione tożsamości

$$\forall (\lambda_1, \lambda_2) \in \Lambda_2 \times \Lambda_2 : h_{\lambda_1, \lambda_2}^{(2)} = h_{\lambda_2, \lambda_1}^{(1)}.$$

Dowód: Wystarczy wykorzystać jednoznaczność rozkładu, o którym mówi Stw. 11 (w wersji stosownie zszytyzowanej). $\square$

Uwaga 4. Należy podkreślić, że mimo swe strukturalne powinowactwo do stwierdzeń orzekających o jednoznaczności rozkładu elementu modułu w bazie, powyższe stwierdzenie nie pozwala nam traktować układu $\{g_{\lambda_1}^{(1)} \otimes_R g_{\lambda_2}^{(2)}\}_{(\lambda_1, \lambda_2) \in \Lambda_2 \times \Lambda_2}$ jako bazy, oto bowiem grupa przemienna $G_1 \otimes_R G_2$ nie jest w ogólności R -modułem.

Znaczenie założenia o istnieniu (skończonej) bazy eksponuje

Stwierdzenie 13. Przyjmijmy dotychczasowy zapis i niechaj $H. \in \mathbf{Mod}_{R^{\text{op}}}^{\tilde{\Lambda}}$. Jeśli $G \in \mathbf{Mod}_R$ jest R -modułem wolnym, to wówczas kanoniczny homomorfizm grup przemiennych

$$\tilde{\tau} : \prod_{\lambda \in \Lambda} H_\lambda \otimes_R G \longrightarrow \prod_{\lambda \in \Lambda} (H_\lambda \otimes_R G),$$

o którym mówi Stw. 9, jest monomorfizmem. Jeżeli ponadto moduł G jest skończenie generowany, to homomorfizm ten jest izomorfizmem.

Dowód: Niechaj $\{g_\mu\}_{\mu \in \Lambda}$ będzie bazą G , a wtedy dowolny element $t = \prod_{\lambda \in \Lambda} H_\lambda \otimes_R G$ można – w świetle Stw. 11 – zapisać jednoznacznie jako

$$t = \sum_{\mu \in \Lambda} h_\mu^\mu \otimes_R g_\mu, \quad h_\mu^\mu \in \prod_{\lambda \in \Lambda} H_\lambda,$$

zatem jego obrazem względem odwzorowania kanonicznego $\tilde{\tau}$ jest element grupy $\prod_{\lambda \in \Lambda} (H_\lambda \otimes_R G)$ postaci

$$\tilde{\tau}(t) : \Lambda \longrightarrow \prod_{\lambda \in \Lambda} (H_\lambda \otimes_R G) : \lambda \longmapsto \sum_{\mu \in \Lambda} h_\lambda^\mu \otimes_R g_\mu \in H_\lambda \otimes_R G.$$

Ten ostatni jest zerem wtedy i tylko wtedy, gdy

$$\forall_{\lambda \in \Lambda} : \sum_{\mu \in \Lambda} h_\lambda^\mu \otimes_R g_\mu = 0_{H_\lambda \otimes_R G},$$

to zaś – wobec jednoznaczności rozkładu orzeczonej w Stw. 11 – jest równoważne stwierdzeniu

$$\forall_{\lambda \in \Lambda} \forall_{\mu \in \Lambda} : h_\lambda^\mu = 0_{H_\lambda},$$

co pokazuje injektywność odwzorowania $\tilde{\tau}$ w rozpatrywanym przypadku.

Jeśli ponadto $N := |\Lambda| < \infty$, to na podstawie Tw. 7 oraz Stw. 8 (i wcześniejszych naszych rozważań, w tym Stw. 6) otrzymujemy z jednej strony

$$\begin{aligned} \iota_1 : \prod_{\lambda \in \Lambda} H_\lambda \otimes_R G &\cong \prod_{\lambda \in \Lambda} H_\lambda \otimes_R \bigoplus_{n=1}^N \langle g_n \rangle_R \cong \bigoplus_{n=1}^N \left(\prod_{\lambda \in \Lambda} H_\lambda \otimes_R \langle g_n \rangle_R \right) \\ &\cong \bigoplus_{n=1}^N \left(\prod_{\lambda \in \Lambda} H_\lambda \otimes_R R \right) \cong \bigoplus_{n=1}^N \prod_{\lambda \in \Lambda} H_\lambda \cong \prod_{n=1}^N \prod_{\lambda \in \Lambda} H_\lambda \equiv \prod_{(n,\lambda) \in \overline{1,N} \times \Lambda} H_\lambda, \end{aligned}$$

z drugiej zaś

$$\begin{aligned} \iota_2 : \prod_{\lambda \in \Lambda} (H_\lambda \otimes_R G) &\cong \prod_{\lambda \in \Lambda} \left(H_\lambda \otimes_R \bigoplus_{n=1}^N \langle g_n \rangle_R \right) \cong \prod_{\lambda \in \Lambda} \bigoplus_{n=1}^N (H_\lambda \otimes_R \langle g_n \rangle_R) \\ &\cong \prod_{\lambda \in \Lambda} \bigoplus_{n=1}^N (H_\lambda \otimes_R R) \cong \prod_{\lambda \in \Lambda} \bigoplus_{n=1}^N H_\lambda \equiv \prod_{\lambda \in \Lambda} \prod_{n=1}^N H_\lambda \cong \prod_{(n,\lambda) \in \overline{1,N} \times \Lambda} H_\lambda. \end{aligned}$$

W powyższych rozważaniach wykorzystaliśmy oczywiste izomorfizmy

$$\prod_{\lambda_1 \in \Lambda_1} \prod_{\lambda_2 \in \Lambda_2} G_{\lambda_1, \lambda_2} \cong \prod_{(\lambda_1, \lambda_2) \in \Lambda_1 \times \Lambda_2} G_{\lambda_1, \lambda_2},$$

które dowolnemu odwzorowaniu

$$\gamma : \Lambda_1 \longrightarrow \bigcup_{\lambda_1 \in \Lambda_1} \mathbf{Set}(\Lambda_2, \bigcup_{\lambda_2 \in \Lambda_2} G_{\lambda_1, \lambda_2})$$

o własności

$$\forall_{\lambda_1 \in \Lambda_1} : \gamma_{\lambda_1} : \Lambda_2 \longrightarrow \bigcup_{\lambda_2 \in \Lambda_2} G_{\lambda_1, \lambda_2} : \lambda_2 \longmapsto \gamma_{\lambda_1}(\lambda_2) \in G_{\lambda_1, \lambda_2}$$

przyporządkowują odwzorowanie

$$g_{\cdot, \cdot}^\gamma : \Lambda_1 \times \Lambda_2 \longrightarrow \bigcup_{(\lambda_1, \lambda_2) \in \Lambda_1 \times \Lambda_2} G_{\lambda_1, \lambda_2} : (\lambda_1, \lambda_2) \longmapsto \gamma_{\lambda_1}(\lambda_2),$$

i odwrotnie – z każdym odwzorowaniem

$$g_{\cdot, \cdot} : \Lambda_1 \times \Lambda_2 \longrightarrow \bigcup_{(\lambda_1, \lambda_2) \in \Lambda_1 \times \Lambda_2} G_{\lambda_1, \lambda_2} : (\lambda_1, \lambda_2) \longmapsto g_{\lambda_1, \lambda_2} \in G_{\lambda_1, \lambda_2}$$

stowarzyszą odwzorowanie

$$\gamma^{g_{\cdot, \cdot}} : \Lambda_1 \longrightarrow \bigcup_{\lambda_1 \in \Lambda_1} \mathbf{Set}(\Lambda_2, \bigcup_{\lambda_2 \in \Lambda_2} G_{\lambda_1, \lambda_2})$$

o wartościach danych przez odwzorowania

$$\gamma_{\lambda_1}^{g, \cdot} : \Lambda_2 \longrightarrow \bigcup_{\lambda_2 \in \Lambda_2} G_{\lambda_1, \lambda_2} : \lambda_2 \longmapsto g_{\lambda_1, \lambda_2}.$$

Endomorfizm złożony $\iota_2 \circ \tilde{\tau} \circ \iota_1^{-1}$ grupy przemiennej $\prod_{(n, \lambda) \in \overline{1, N} \times \Lambda} H_\lambda$ jest injektywny wprost z konstrukcji, ale też bez trudu stwierdzamy, że jest to endomorfizm identycznościowy, co przesądza o bijektywnym charakterze $\tilde{\tau}$. $\square$

Ilekość pierścieni bazowy jest przemiennej, w *naturalny* sposób pojawia się dodatkowa struktura algebraiczna na grupie przemiennej $G_1 \otimes_R G_2$ z Def. 7. Ażeby uwypuklić znaczenie przemienności R , prześledźmy następujące rozumowanie, którego celem jest wyindukowanie na rzeczzonej grupie struktury R -modułu przy użyciu istniejących działań R na czynnikach iloczynu tensorowego. Oczywiście kandydat do roli R -działania (lewostronnego) to odwzorowanie

$$\begin{aligned} \ell^\otimes & : R \times (G_1 \otimes_R G_2) \longrightarrow G_1 \otimes_R G_2 \\ & : \left(r, \sum_{(g_1, g_2) \in G_1 \times G_2} \nu(g_1, g_2) \triangleright (g_1 \otimes_R g_2) \right) \longmapsto \sum_{(g_1, g_2) \in G_1 \times G_2} \nu(g_1, g_2) \triangleright (g_1 \otimes_R r \triangleright_{(2)} g_2). \end{aligned} \quad (21)$$

Na pierwszy rzut oka odwzorowanie to ma pożądaną własność (wypisaną dla dowolnych $r_1, r_2 \in R$)

$$\begin{aligned} & \ell_{r_1}^\otimes \circ \ell_{r_2}^\otimes \left(\sum_{(g_1, g_2) \in G_1 \times G_2} \nu(g_1, g_2) \triangleright (g_1 \otimes_R g_2) \right) \\ & = \ell_{r_1}^\otimes \left(\sum_{(g_1, g_2) \in G_1 \times G_2} \nu(g_1, g_2) \triangleright (g_1 \otimes_R r_2 \triangleright_{(2)} g_2) \right) \\ & = \sum_{(g_1, g_2) \in G_1 \times G_2} \nu(g_1, g_2) \triangleright (g_1 \otimes_R r_1 \triangleright_{(2)} (r_2 \triangleright_{(2)} g_2)) \\ & = \sum_{(g_1, g_2) \in G_1 \times G_2} \nu(g_1, g_2) \triangleright (g_1 \otimes_R (r_1 \cdot_R r_2) \triangleright_{(2)} g_2) \\ & \equiv \ell_{r_1 \cdot_R r_2}^\otimes \left(\sum_{(g_1, g_2) \in G_1 \times G_2} \nu(g_1, g_2) \triangleright (g_1 \otimes_R g_2) \right). \end{aligned}$$

Jeśli jednak weźmiemy pod uwagę *śródo- R -jednorodność* $\otimes_R$, to natrafimy na kłopot, oto bowiem otrzymujemy tożsamość

$$\begin{aligned} & \ell_{r_1}^\otimes \circ \ell_{r_2}^\otimes \left(\sum_{(g_1, g_2) \in G_1 \times G_2} \nu(g_1, g_2) \triangleright (g_1 \otimes_R g_2) \right) \\ & = \ell_{r_1}^\otimes \left(\sum_{(g_1, g_2) \in G_1 \times G_2} \nu(g_1, g_2) \triangleright (g_1 \otimes_R r_2 \triangleright_{(2)} g_2) \right) \\ & = \ell_{r_1}^\otimes \left(\sum_{(g_1, g_2) \in G_1 \times G_2} \nu(g_1, g_2) \triangleright (g_1 \triangleleft_{(1)} r_2 \otimes_R g_2) \right) \\ & = \sum_{(g_1, g_2) \in G_1 \times G_2} \nu(g_1, g_2) \triangleright (g_1 \triangleleft_{(1)} r_2 \otimes_R r_1 \triangleright_{(2)} g_2) \\ & = \sum_{(g_1, g_2) \in G_1 \times G_2} \nu(g_1, g_2) \triangleright ((g_1 \triangleleft_{(1)} r_2) \triangleleft_{(1)} r_1 \otimes_R g_2) \\ & = \sum_{(g_1, g_2) \in G_1 \times G_2} \nu(g_1, g_2) \triangleright (g_1 \triangleleft_{(1)} (r_2 \cdot_R r_1) \otimes_R g_2) \\ & = \sum_{(g_1, g_2) \in G_1 \times G_2} \nu(g_1, g_2) \triangleright (g_1 \otimes_R (r_2 \cdot_R r_1) \triangleright_{(2)} g_2) \\ & \equiv \ell_{r_2 \cdot_R r_1}^\otimes \left(\sum_{(g_1, g_2) \in G_1 \times G_2} \nu(g_1, g_2) \triangleright (g_1 \otimes_R g_2) \right), \end{aligned}$$

która jest *naturalnie* (tj. w sposób jawnie pozwalający na uniknięcie sprzeczności w okolicznościach generycznych) spełniona w połączeniu z poprzednią, gdy

$$\forall_{r_1, r_2 \in R} : r_1 \cdot_R r_2 = r_2 \cdot_R r_1 ,$$

tj., gdy R jest przemienny. Przyjmując to za punkt wyjścia do dalszych rozważań, wprowadzamy

Definicja 10. Przyjmijmy zapis Def. 7, przy czym niechaj R będzie pierścieniem przemiennym. Struktura R -modułu na $G_1 \otimes_R G_2$ jest zadawana przez odwzorowanie (działanie) (21). Analogicznie definiujemy strukturę R -modułu na n -krotnym iloczynie tensorowym rodziny modułów $\{G_A\}_{A \in \overline{1, n}}$ z Def. 9 przy $R_l := R$, $l \in \overline{1, n-1}$.

Jako natychmiastowe corollarium do Stw. 12 otrzymujemy

Stwierdzenie 14. Przyjmijmy zapis Def. 10 i Stw. 12. Jeśli oba moduły G_1 i G_2 są wolne, przy czym odnośne bazy to $\{g_{\lambda_1}^{(1)}\}_{\lambda_1 \in \Lambda_1}$ i $\{g_{\lambda_2}^{(2)}\}_{\lambda_2 \in \Lambda_2}$, to także R -moduł $G_1 \otimes_R G_2$ jest wolny, a rodzina $\{g_{\lambda_1}^{(1)} \otimes_R g_{\lambda_2}^{(2)}\}_{(\lambda_1, \lambda_2) \in \Lambda_1 \times \Lambda_2}$ jest jego bazą.

Dowód: Oczywisty. □

LITERATURA

- [KM76] K. Kuratowski and A. Mostowski, *Teoria mnogości*, Monografie Matematyczne, vol. XXVII, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1976.
- [Lei14] T. Leinster, *Basic Category Theory*, Cambridge Studies in Advanced Mathematics, vol. 143, Cambridge University Press, 2014.

ZADANIA DOMOWE

Zadanie domowe 1. Udowodnij Stw. 1 i 2.

Zadanie domowe 2. Niechaj $\mathcal{C}$ będzie kategorią lokalnie małą. Dla dowolnej pary $A, B \in \mathcal{C}$ udowodnij implikację: $\mathcal{C}(\cdot, A) \cong \mathcal{C}(\cdot, B)$ (w $\mathbf{PreSh}(\mathcal{C})$) $\implies A \cong B$ (w $\mathcal{C}$).

Zadanie domowe 3. Wprowadzamy pojęcie **funktorów dołączonych**. Niechaj $\mathcal{C}$ i $\mathcal{D}$ będą kategoriami, $F : \mathcal{C} \rightarrow \mathcal{D}$ i $G : \mathcal{D} \rightarrow \mathcal{C}$ zaś – funktorami (kowariantnymi). Mówimy, że F jest **lewostronnie dołączony** do G , a G jest **prawostronnie dołączony** do F i piszemy

$$F \dashv G,$$

ilekroć dla dowolnych $(A, X) \in \mathcal{C} \times \mathcal{D}$ istnieje bijekcja

$$\mathcal{D}(F(A), X) \rightarrow \mathcal{C}(A, G(X)) : f \mapsto f^\vee,$$

$$\mathcal{C}(A, G(X)) \rightarrow \mathcal{D}(F(A), X) : g \mapsto g^\wedge,$$

$$f^{\vee\wedge} = f, \quad g^{\wedge\vee} = g,$$

zwana **adiunkcją**, która jest *naturalna* w A i X w następującym sensie: Dla dowolnych $\xi \in \mathcal{D}(X, \tilde{X})$ oraz $\alpha \in \mathcal{C}(\tilde{A}, A)$ zachodzą tożsamości

$$(\xi \circ f)^\vee = G(\xi) \circ f^\vee \quad \wedge \quad (g \circ \alpha)^\wedge = g^\wedge \circ F(\alpha).$$

Więcej o funktorach dołączonych (w tym liczne przykłady) można znaleźć w [Lei14].

Związek z bytami wprowadzonymi na wykładzie pojawia się już w elementarnych:

Stwierdzenie 15. Niechaj $F \dashv G$ będzie opisaną powyżej parą funktorów wzajem dołączonych. Wówczas F -obraz obiektu początkowego w $\mathcal{C}$ jest obiektem początkowym w $\mathcal{D}$, a G -obraz obiektu końcowego w $\mathcal{D}$ jest obiektem końcowym w $\mathcal{C}$.

oraz

Stwierdzenie 16. Niechaj $F \dashv G$ będzie opisaną powyżej parą funktorów wzajem dołączonych. Wówczas rodziny morfizmów $\{\eta_A := \text{Id}_{F(A)}^\vee\}_{A \in \mathcal{C}}$ i $\{\varepsilon_X := \text{Id}_{G(X)}^\wedge\}_{X \in \mathcal{D}}$ określają transformacje naturalne $\eta : \text{id}_{\mathcal{C}} \implies G \circ F$ i $\varepsilon : F \circ G \implies \text{id}_{\mathcal{D}}$, odpowiednio, spełniające **tożsamości trójkąta**:

$$\begin{array}{ccc} F(A) & \xrightarrow{F(\eta_A)} & F \circ G \circ F(A) \\ & \searrow \text{Id}_{F(A)} & \downarrow \varepsilon_{F(A)} \\ & & F(A) \end{array} \quad , \quad \begin{array}{ccc} G(X) & \xrightarrow{\eta_{G(X)}} & G \circ F \circ G(X) \\ & \searrow \text{Id}_{G(X)} & \downarrow G(\varepsilon_X) \\ & & G(X) \end{array}$$

ślusne dla dowolnych $(A, X) \in \mathcal{C} \times \mathcal{D}$. Pierwszą z tych transformacji, η , określamy mianem **jedności** (adiunkcji), drugą zaś, ε – mianem **kojedności** (adiunkcji).

które należy udowodnić (bez zaglądania do [Lei14]). Dowodzi się, że adiunkcje pomiędzy funktorami F i G jak wyżej są w jedno-jednoznacznej odpowiedniości z parami transformacji naturalnych o własnościach jedności i kojedności wyrażanych przez tożsamości trójkąta, *cp.* [Lei14, Tw. 2.2.5]. Mamy także

Stwierdzenie 17. Niechaj $F \dashv G$ będzie adiunkcją o jedności η i kojedności ε . Oznaczmy przez $\mathbf{Fix}(G \circ F)$ pełną podkategorię kategorii $\mathcal{C}$ o obiektach A określonych przez warunek odwracalności η_A , a przez $\mathbf{Fix}(F \circ G)$ pełną podkategorię kategorii $\mathcal{D}$ o obiektach X określonych przez warunek odwracalności ε_X . Adiunkcja $F \dashv G$ ogranicza się do równoważności $\mathbf{Fix}(G \circ F) \cong \mathbf{Fix}(F \circ G)$.

którego prawdziwość należy wykazać (można zaglądać, aby nazbierać intuicji!). To samo tyczy się

Stwierdzenie 18. Niechaj $F \dashv G$ będzie adiunkcją o kojedności ε . Funktor G jest w pełni wierny wtedy i tylko wtedy, gdy ε jest izomorfizmem (naturalnym).

Nietrywialną⁸ relację pomiędzy adiunkcjami i równoważnościami ustala

Stwierdzenie 19. Niechaj $\mathcal{C}$ i $\mathcal{D}$ będą kategoriami, $F : \mathcal{C} \xrightarrow{\cong} \mathcal{D}$ zaś – równoważnością pomiędzy nimi (albo ściślej: jej składową w rozumieniu Def. 1-2.4.). Dla dowolnego funktora $G : \mathcal{D} \rightarrow \mathcal{C}$, dla którego istnieje izomorfizm naturalny $\eta : \text{id}_{\mathcal{C}} \Rightarrow G \circ F$, istnieje *dokładnie jeden* izomorfizm naturalny $\varepsilon : F \circ G \Rightarrow \text{id}_{\mathcal{D}}$ taki, że czwórka $(F, G, \eta, \varepsilon)$ jest adiunkcją. Równoważność F określamy wówczas mianem **dołączonej**.

którego dowód pozostawiamy Czytelnikom. Pomocny w jego przeprowadzeniu może się okazać

Lemat 1. Niechaj $\mathcal{C}$ i $\mathcal{D}$ będą kategoriami, para $(F, G) \in [\mathcal{C}_1, \mathcal{C}_2] \times [\mathcal{C}_2, \mathcal{C}_1]$ zaś – równoważnością pomiędzy nimi, dla której $\widehat{\eta}$ i $\check{\eta}$ są izomorfizmami naturalnymi opisanymi w treści Def. 1-2.4. Wówczas para $(\eta, \varepsilon) := (\widehat{\eta}^{-1}, \check{\eta})$ spełnia dowolną z pary tożsamości trójkąta wtedy i tylko wtedy, gdy spełnia też drugą z nich.

którego dowodzimy niezależnie.

Zadanie domowe 4. Niechaj V_i , $i \in \{1, 2, 3\}$ będą przestrzeniami wektorowymi nad ciałem $\mathbb{K}$. Dla danego odwzorowania dwu- $\mathbb{K}$ -liniowego

$$\varphi : V_1 \times V_2 \rightarrow V_3$$

definiujemy odwzorowanie

$$\psi : V_1 \times V_2 \rightarrow V_3 : v \mapsto \varphi(\text{pr}_1(v), \text{pr}_2(v))$$

w terminach rzutów kanonicznych $\text{pr}_j : V_1 \times V_2 \rightarrow V_j$, $j \in \{1, 2\}$. Udowodnij, że ψ spełnia tożsamości:

$$\psi(v_1 + v_2) + \psi(v_1 - v_2) = 2_{\mathbb{K}} \triangleright \psi(v_1) + 2_{\mathbb{K}} \triangleright \psi(v_2), \quad v_1, v_2 \in V_1 \times V_2$$

oraz

$$\psi(\lambda \triangleright v) = \lambda^2 \triangleright \psi(v), \quad (\lambda, v) \in \mathbb{K} \times V,$$

w których zapisie $2_{\mathbb{K}} = 1_{\mathbb{K}} + 1_{\mathbb{K}}$.

Zadanie domowe 5. Udowodnij istnienie izomorfizmu $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z} \otimes_{\mathbb{Z}} \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \cong \mathbb{Z}/\text{NWD}(m, n)\mathbb{Z}$ dla $m, n \in \mathbb{N}^*$, więc też w szczególności trywialność grupy przemiennej $\mathbb{Z}/m\mathbb{Z} \otimes_{\mathbb{Z}} \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} = 0$ dla m i n względnie pierwszych.

Zadanie domowe 6. Niechaj $\mathbb{K}$ będzie ciałem. Rozważmy odwzorowanie

$$\beta : \mathbb{K}^{\times m} \times \mathbb{K}^{\times n} \rightarrow \text{Mat}(m \times n; \mathbb{K}) : ((x^1, x^2, \dots, x^m)^T, (y^1, y^2, \dots, y^n)^T) \mapsto (A^i_j := x^i y^j)_{\substack{i \in \overline{1, m} \\ j \in \overline{1, n}}}.$$

Udowodnij, że para $(\text{Mat}(m \times n; \mathbb{K}), \beta)$ jest iloczynem tensorowym $\mathbb{K}^{\times m}$ i $\mathbb{K}^{\times n}$.

Zadanie domowe 7. Niechaj $S_1, S_2 \in \mathbf{Set}$ i niech $\langle S_1 \rangle_{\mathbb{K}}$ i $\langle S_2 \rangle_{\mathbb{K}}$ będą odnośnymi wolnymi przestrzeniami wektorowymi generowanymi przez S_1 i, odpowiednio, S_2 . Wskaż izomorfizm

$$\langle S_1 \times S_2 \rangle_{\mathbb{K}} \cong \langle S_1 \rangle_{\mathbb{K}} \otimes_{\mathbb{K}} \langle S_2 \rangle_{\mathbb{K}}.$$

Zadanie domowe 8. Niechaj $V \in \mathbf{Vect}_{\mathbb{K}}$ i niech $V_1, V_2 \subset V$ będą podprzestrzeniami spełniającymi warunek $V_1 + V_2 = V$ (suma algebraiczna). Oznaczmy $W := V_1 \cap V_2$. Udowodnij

$$V/V_1 \otimes_{\mathbb{K}} V/V_2 \cong (V_1 \otimes_{\mathbb{K}} V_2)/(V_1 \otimes_{\mathbb{K}} W + W \otimes_{\mathbb{K}} V_2).$$

Zadanie domowe 9. Niechaj $V_1, V_2, W_1, W_2 \in \mathbf{Vect}_{\mathbb{K}}$ oraz niech $\varphi \in \text{Hom}_{\mathbb{K}}(V_1, V_2)$ i $\psi \in \text{Hom}_{\mathbb{K}}(W_1, W_2)$. Udowodnij

$$\ker(\varphi \otimes \psi) = \ker \varphi \otimes_{\mathbb{K}} W_1 + V_1 \otimes_{\mathbb{K}} \ker \psi.$$

⁸Izomorfizmy naturalne równoważności nie muszą *a priori* spełniać tożsamości trójkąta. W szczególności więc transformacje naturalne η i ε z treści Stw. 19 *nie muszą* pokrywać się z transformacjami naturalnymi określającymi F jako równoważność.