

Esercizio 1. Sia V uno spazio vettoriale sul campo C e siano $\mathcal{V} = \{v_1, \dots, v_n\}$ una base di V e $\mathcal{V}^* = \{v_1^*, \dots, v_n^*\}$ la corrispondente base duale di V^* . Si mostri che per ogni vettore $v \in V$, si ha $v = \sum_{i=1}^n (v_i^* \circ v) v_i$ [risp. per ogni vettore $\xi \in V^*$, si ha $\xi = \sum_{i=1}^n (\xi \circ v_i) v_i^*$].

Esercizio 2. Sia V uno spazio vettoriale di dimensione finita sul campo C e siano $\mathcal{V} = \{v_1, \dots, v_n\}$ e $\mathcal{W} = \{w_1, \dots, w_n\}$ due basi di V . Indicate con $\mathcal{V}^* = \{v_1^*, \dots, v_n^*\}$ e $\mathcal{W}^* = \{w_1^*, \dots, w_n^*\}$ le rispettive basi duali, siano $P = (p_{ij})_{1 \leq i, j \leq n} = \alpha_{\mathcal{V}, \mathcal{W}}(1_V)$ e $Q = (q_{ij})_{1 \leq i, j \leq n} = \alpha_{\mathcal{W}^*, \mathcal{V}^*}(1_{V^*})$, le matrici dei cambiamenti di base. Si mostri che $Q = {}^t P$.

Esercizio 3. Sia V lo spazio vettoriale dei polinomi di $\mathbb{R}[X]$, di grado ≤ 3 e si consideri la sua base $\{1, X, X^2, X^3\}$. Si mostri che l'applicazione $\phi: V \rightarrow \mathbb{R}$, definita da $P \mapsto P(2)$, è un elemento di V^* e la si scriva come combinazione dei vettori della base duale della base data.

Esercizio 4. Sia V uno spazio vettoriale di dimensione finita su C e sia $S \neq \emptyset$ un sottoinsieme di $V^* = \text{Hom}_C(V, C)$.

(a) È vero che gli elementi di S generano V^* se, e solo se, $\bigcap_{\zeta \in S} \ker \zeta = \langle 0 \rangle$?

(b) È vero che gli elementi di S sono linearmente indipendenti se, e solo se, per ogni elemento $\zeta_0 \in S$, esiste un vettore, $v_0 \in V$, che appartiene a $\bigcap_{\zeta \neq \zeta_0 \in S} \ker \zeta$, ma non appartiene a $\ker \zeta_0$?

Esercizio 5. Sia $V = \mathbb{Q}[X]$ lo spazio vettoriale di tutti i polinomi a coefficienti razionali e si considerino la base $\{1, X, X^2, \dots\}$ di V ed il corrispondente sottoinsieme $\mathcal{E} = \{\xi_0, \xi_1, \xi_2, \dots\}$ di $V^* = \text{Hom}_{\mathbb{Q}}(V, \mathbb{Q})$, definito dalle condizioni $e_i(X^j) = \delta_{i,j}$ per ogni coppia (i, j) di interi non-negativi. Si mostri che l'applicazione $\phi: V \rightarrow \mathbb{Q}$, definita da $P \mapsto P(1)$, è un elemento di V^* , ma che non è possibile scriverla come combinazione lineare finita degli elementi di \mathcal{E} .

Esercizio 6. Sia V uno spazio vettoriale complesso di dimensione 4 e sia V^* il suo duale. Indichiamo con $\{v_1, \dots, v_4\}$ una base di V e con $\{v_1^*, \dots, v_4^*\}$ la base duale di V^* . Si considerino i sottospazi di V^*

$$\begin{aligned} Z &= \langle 2v_1^* - 3v_2^* - v_4^*, 3v_2^* - 2v_3^* + v_4^*, v_1^* + v_4^* \rangle \quad \text{e} \\ Z_\lambda &= \langle \lambda v_1^* + 2v_2^* - 3\lambda v_3^*, (\lambda + 1)v_1^* + 2v_2^* - 3v_3^* + v_4^*, 2\lambda v_2^* - 3v_3^* + 2\lambda v_4^* \rangle, \lambda \in \mathbb{C}. \end{aligned}$$

(a) Si calcolino, al variare di λ le dimensioni dei sottospazi Z^\perp , Z_λ^\perp e $Z^\perp + Z_\lambda^\perp$.

(b) Si dica per quali valori di λ si ha $Z^\perp + Z_\lambda^\perp = Z^\perp \oplus Z_\lambda^\perp$.

Esercizio 7. Sia data una base $\{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ dello spazio vettoriale reale V e si denoti, come di consueto, con $\{v_1^*, v_2^*, v_3^*, v_4^*\}$ la base duale di V^* . Si consideri al variare di λ tra i numeri reali, il sottospazio S_λ di V^* generato dai vettori

$$\begin{aligned} &(\lambda - 1)v_1^* + 2v_2^* - \lambda v_3^* + 2\lambda v_4^*, & 2v_1^* - v_3^* + v_4^*, \\ &-(\lambda + 1)v_1^* - \lambda v_2^* + (\lambda + 2)v_3^* - 2v_4^*, & 2v_1^* + (\lambda - 2)v_2^* - 2v_3^*. \end{aligned}$$

(a) Si determini al variare di λ la dimensione del sottospazio S_λ^\perp di V .

(b) Si determini l'intersezione di tutti i sottospazi S_λ di V^* .

Esercizio 8. Si consideri lo spazio, $V = \mathbb{R}[X]_{\leq 3}$ dei polinomi, a coefficienti reali, di grado minore o uguale a 3, con la base (canonica) $\mathcal{B} = \{1, X, X^2, X^3\}$.

(a) È vero che $\mathcal{V} = \{1, X - 1, (X - 2)^2, (X - 3)^3\}$ è una base di V ? In caso affermativo si scrivano le matrici di cambiamento di base $\alpha_{\mathcal{V}, \mathcal{B}}(1)$ e $\alpha_{\mathcal{B}, \mathcal{V}}(1)$.

(b) Sia $\mathcal{B}^* = \{\delta_0, \delta_1, \delta_2, \delta_3\} \subset V^*$, ove $\delta_k(P(X)) = \frac{P^{(k)}(0)}{k!}$ per ogni $P(X)$ in V e $k = 0, \dots, 3$. Si verifichi che \mathcal{B}^* è la base duale di \mathcal{B} in V^* . Scrivere gli elementi della base \mathcal{V}^* , duale di \mathcal{V} , come combinazione lineare degli elementi di \mathcal{B}^* .

Esercizio 9. Si consideri lo spazio, $V = K[X]_{\leq n}$ dei polinomi, a coefficienti nel campo K , di grado minore o uguale a n e sia V^* lo spazio vettoriale duale. Si verifichi che le forme lineari non nulle, ξ_0, \dots, ξ_n , sono una base di V^* nei casi seguenti:

(a) Esistono x_0, \dots, x_n in K , a due a due distinti, tali che $\xi_j(P) = P(x_j)$ per ogni $P \in V$ e per ogni $j = 0, \dots, n$.

(b) Esiste $x_0 \in K$ tale che $\xi_j(P) = P^{(j)}(x_0)$ per ogni $j = 0, \dots, n$.

In ciascuno dei due casi si scriva la corrispondente base duale di V .

Esercizio 10. Si consideri lo spazio, $V = K[X]_{\leq n}$ dei polinomi di grado minore o uguale a n , a coefficienti nel campo K , di caratteristica 0, e sia V^* lo spazio vettoriale duale. Si verifichi che le forme lineari ξ_0, \dots, ξ_n , definite da $\xi_j(P) = P^{(j)}(j)$ per ogni $P \in V$, sono linearmente dipendenti.

Esercizio 11. Siano V e W spazi vettoriali su C , $\mathcal{V} = \{v_1, \dots, v_n\}$ e $\mathcal{W} = \{w_1, \dots, w_m\}$ basi di tali spazi, $\phi: V \rightarrow W$ e $\phi^*: W^* \rightarrow V^*$ due applicazioni lineari, l'una trasposta dell'altra. Si verifichi che, se $A = \alpha_{\mathcal{V}, \mathcal{W}}(\phi)$, allora ${}^tA = \alpha_{\mathcal{W}^*, \mathcal{V}^*}(\phi^*)$, ove \mathcal{V}^* e \mathcal{W}^* sono le basi duali delle basi date.

Esercizio 12. Sia V uno spazio vettoriale sul campo C e sia V^* lo spazio vettoriale duale. Dati $v^*, w^* \in V^*$, si consideri l'applicazione (detta *prodotto tensoriale* delle forme lineari v^* e w^*)

$$\begin{aligned} v^* \otimes w^*: \quad V \times V &\rightarrow C \\ (x, y) &\mapsto (v^* \circ x)(w^* \circ y). \end{aligned}$$

(a) Si mostri che $v^* \otimes w^*$ è un'applicazione bilineare e si verifichi che, per ogni coppia di vettori $v^*, w^* \in V^*$ e per ogni costante $c \in C$, si ha $(cv^*) \otimes w^* = c(v^* \otimes w^*) = v^* \otimes (cw^*)$.

(b) Si mostri che, presi comunque $u^*, v^*, w^* \in V^*$, si ha $(u^* + v^*) \otimes w^* = u^* \otimes w^* + v^* \otimes w^*$ e $u^* \otimes (v^* + w^*) = u^* \otimes v^* + u^* \otimes w^*$.

(c) Fissata una base $\mathcal{V} = \{v_1, \dots, v_n\}$ dello spazio V e la rispettiva base duale $\mathcal{V}^* = \{v_1^*, \dots, v_n^*\}$ di V^* , si mostri che l'insieme $\{v_i^* \otimes v_j^* \mid 1 \leq i, j \leq n\}$ è una base dello spazio vettoriale $\text{Bil}(V, V, C)$ delle applicazioni bilineari su V .

(d) Estendere la definizione ad r forme lineari.

Esercizio 13. Siano V uno spazio vettoriale di dimensione 4, $\mathcal{V} = \{v_1, \dots, v_4\}$ una base di V e $\mathcal{V}^* = \{v_1^*, \dots, v_4^*\}$ la relativa base duale. Date le forme lineari $v^* = 2v_1^* - v_3^* + v_4^*$ e $w^* = v_1^* - 3v_2^* - v_3^*$ si calcoli l'applicazione bilineare $v^* \otimes w^*$ su una generica coppia di vettori di V .

Esercizio 14. Siano V uno spazio vettoriale di dimensione finita e $\phi: V \rightarrow V^*$ un isomorfismo. Si definisca che $g: V \times V \rightarrow C$ ponendo $g(v, w) = v \circ \phi(w)$, per ogni $(v, w) \in V \times V$

(a) Si verifichi che g è un'applicazione bilineare, non degenera e che per ogni $(v, w) \in V \times V$ si ha $g(w, v) = v \circ \phi^*(w)$, ove ϕ^* è l'applicazione trasposta di ϕ .

(b) si verifichi che g è simmetrica oppure alternante se, e solo se, per ogni coppia di vettori $v, w \in V$ si ha $g(v, w) = 0 \Leftrightarrow g(w, v) = 0$.

Esercizio 15. Si consideri lo spazio vettoriale $M_n(C)$ delle matrici quadrate di ordine n , ad elementi nel campo C . Si mostri che, fissata comunque una forma lineare $\alpha: M_n(C) \rightarrow C$, esiste una matrice $A \in M_n(C)$ tale che $\alpha(X) = \text{tr}(AX)$ per ogni $X \in M_n(C)$. Si deduca da ciò il fatto che, per ogni spazio vettoriale di dimensione finita V , lo spazio vettoriale $\text{Hom}_C(V, V)$ è canonicamente isomorfo al suo duale.

Esercizio 16. Sia V uno spazio vettoriale di dimensione finita sul campo C . Dati comunque due vettori v^* e w^* appartenenti allo spazio duale V^* , si consideri l'applicazione

$$\begin{aligned} v^* \wedge w^*: V \times V &\rightarrow C \\ (x, y) &\mapsto (v^* \circ x)(w^* \circ y) - (w^* \circ x)(v^* \circ y) \end{aligned}$$

(a) Si mostri che $v^* \wedge w^*$ è un'applicazione bilineare alternante e si verifichi che per ogni coppia di vettori $v^*, w^* \in V^*$ e per ogni costante $c \in C$, si ha $(cv^*) \wedge w^* = c(v^* \wedge w^*) = v^* \wedge (cw^*)$ e $v^* \wedge w^* = -w^* \wedge v^*$.¹

¹L'applicazione bilineare alternante $v^* \wedge w^*$ è detta il *prodotto esterno* delle forme lineari v^* e w^* . Si potrebbe mostrare che, data una base $\mathcal{V} = \{v_1, \dots, v_n\}$ dello spazio V e la rispettiva base duale $\mathcal{V}^* = \{v_1^*, \dots, v_n^*\}$ di V^* , l'insieme $\{v_i^* \wedge v_j^* \mid 1 \leq i < j \leq n\}$ è una base dello spazio $A^2(V)$ delle applicazioni bilineari alternanti su V . La definizione di prodotto esterno può essere estesa a più forme lineari, ovvero, dati $w_1^*, \dots, w_r^* \in V^*$, si definisce l'applicazione r -lineare alternante

$$\begin{aligned} w_1^* \wedge \dots \wedge w_r^*: \underbrace{V \times \dots \times V}_{r \text{ copie}} &\rightarrow C \\ (x_1, \dots, x_r) &\mapsto \sum_{\sigma \in \Sigma_r} (\text{sgn} \sigma) (w_1^* \circ x_{\sigma(1)}) \dots (w_r^* \circ x_{\sigma(r)}) \end{aligned}$$

dove Σ_r indica l'insieme delle permutazioni su r oggetti. Anche in questo caso, con le notazioni fissate sopra, l'insieme $\{v_{i_1}^* \wedge \dots \wedge v_{i_r}^* \mid 1 \leq i_1 < \dots < i_r \leq n\}$ è una base dello spazio $A^r(V)$

(b) Si mostri che le applicazioni $v_1^* \wedge w_1^* \neq 0 \neq v_2^* \wedge w_2^*$ sono proporzionali se, e solo se, $\langle v_1^*, w_1^* \rangle = \langle v_2^*, w_2^* \rangle$ in V^* .

(c) Nel caso in cui $\dim V = 4$, $\mathcal{V} = \{v_1, \dots, v_4\}$ è una base di V e $\mathcal{V}^* = \{v_1^*, \dots, v_4^*\}$ è la relativa base duale, si calcoli su una generica coppia di vettori di V l'applicazione bilineare $v^* \wedge w^*$, ove $v^* = 2v_1^* - v_3^* + v_4^*$ e $w^* = v_1^* - 3v_2^* - v_3^*$.

Esercizio 17. Siano V e W spazi vettoriali di dimensione finita sul campo C e siano fissate le basi $\mathcal{V} = \{v_1, \dots, v_n\}$ di V , $\mathcal{W} = \{w_1, \dots, w_m\}$ di W e la base duale $\mathcal{V}^* = \{v_1^*, \dots, v_n^*\}$ di V^* . Fissati $v^* \in V^*$ e $w \in W$ si consideri l'applicazione $w \otimes v^* : V \rightarrow W$ definita da $x \mapsto w(v^* \circ x)$ per ogni $x \in V$.

(a) Si verifichi che $w \otimes v^* \in \text{Hom}_C(V, W)$ e si determinino nucleo ed immagine. Si verifichi inoltre che nello spazio vettoriale $\text{Hom}_C(V, W)$ si ha

- $(w_1 + w_2) \otimes v^* = w_1 \otimes v^* + w_2 \otimes v^*$ per ogni $w_1, w_2 \in W$ e $v^* \in V^*$;
- $w \otimes (v_1^* + v_2^*) = w \otimes v_1^* + w \otimes v_2^*$ per ogni $w \in W$ e $v_1^*, v_2^* \in V^*$;
- $(aw) \otimes v^* = a(w \otimes v^*) = w \otimes (av^*)$ per ogni $w \in W$, $v^* \in V^*$ e $a \in C$.

È vero che l'applicazione $y^* \mapsto (y^* \circ w)v^*$ di $W^* \rightarrow V^*$ è la trasposta di $w \otimes v^*$?

(b) Siano $n = 5$ ed $m = 4$ e si considerino i vettori $v^* = 3v_1^* - v_3^* + 5v_5^*$ e $w = w_1 - 2w_2 + 3w_4$. Si determinino nucleo ed immagine di $w \otimes v^*$ e la matrice $\alpha_{\mathcal{V}, \mathcal{W}}(w \otimes v^*)$.

(c) In generale, dati $v^* = a_1v_1^* + \dots + a_nv_n^*$ e $w = b_1w_1 + \dots + b_mw_m$, che relazioni ci sono tra le colonne di coordinate $a = \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix}$, $b = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix}$ e la matrice $\alpha_{\mathcal{V}, \mathcal{W}}(w \otimes v^*)$.

(d) Si indichi con $W \otimes_C V^*$ il sottospazio di $\text{Hom}_C(V, W)$ generato su C dalle applicazioni del tipo $w \otimes v^*$, al variare di $v^* \in V^*$ e di $w \in W$. Si determini la dimensione di tale sottospazio esibendone una base e si concluda che $W \otimes_C V^* = \text{Hom}_C(V, W)$. [sugg. Si considerino gli elementi del tipo $w_i \otimes v_j^*$, ove $\mathcal{W} = \{w_1, \dots, w_m\}$ e $\mathcal{V}^* = \{v_1^*, \dots, v_n^*\}$ sono le basi descritte sopra.]

(e) Siano $v^* \in V^*$ e $w \in W$. Che relazioni ci sono tra l'omomorfismo $w \otimes v^* \in \text{Hom}_C(V, W)$ definito sopra e l'applicazione bilineare $w \otimes v^* : W^* \times V \rightarrow C$ definita nell'Esercizio 12?

Esercizio 18. Siano U , V e W tre spazi vettoriali di dimensione finita sul campo C e, seguendo l'esercizio precedente, identifichiamo $V \otimes_C U^*$ con $\text{Hom}_C(U, V)$ e $W \otimes_C V^*$ con $\text{Hom}_C(V, W)$. Identificando $W \otimes_C U^*$ con $\text{Hom}_C(U, W)$, come si descrive la composizione di applicazioni lineari? In particolare, dati $v \otimes u^*$ e $w \otimes v^*$, con $u^* \in U^*$, $v \in V$, $v^* \in V^*$, $w \in W$; che dire dell'applicazione composta $(w \otimes v^*) \circ (v \otimes u^*)$?

Esercizio 19. Sia V uno spazio vettoriale di dimensione finita sul campo C . Si consideri l'applicazione $\tau : \text{Hom}_C(V, V) \cong V \otimes_C V^* \rightarrow C$ definita da $v \otimes w^* \mapsto w^* \circ v$.

(a) Si verifichi che si tratta di un'applicazione lineare. Si fissi una base $\mathcal{V} = \{v_1, \dots, v_n\}$ di V e si scrivano le relazioni esistenti tra $\tau(\phi)$ e la matrice $\alpha_{\mathcal{V}, \mathcal{V}}(\phi)$.

(b) È vero che, fissata comunque un'applicazione lineare, $\xi : \text{Hom}_C(V, V) \rightarrow C$, esiste un (unico) omomorfismo $\psi_0 : V \rightarrow V$ tale che $\xi(\phi) = \tau(\psi_0 \circ \phi)$ per ogni $\phi \in \text{Hom}_C(V, V)$?

(c) È vero che, fissata comunque un'applicazione lineare, $\xi : \text{Hom}_C(V, V) \rightarrow C$, esiste un (unico) omomorfismo $\psi_1 : V \rightarrow V$ tale che $\xi(\phi) = \tau(\phi \circ \psi_1)$ per ogni $\phi \in \text{Hom}_C(V, V)$? È $\phi_0 = \phi_1$?

Esercizio 20. Siano U , V e W spazi vettoriali di dimensione finita sul campo C .

(a) Si mostri che c'è un isomorfismo canonico $V^* \otimes_C U^* \cong (U \otimes_C V)^*$.

(b) Dall'isomorfismo canonico $W \otimes_C (V^* \otimes_C U^*) \cong (W \otimes_C V^*) \otimes_C U^*$ si deduca l'isomorfismo

$$\text{Hom}_C(U \otimes_C V, W) \cong \text{Hom}_C(U, \text{Hom}_C(V, W))$$

e lo si scriva esplicitamente in termini di applicazioni lineari.

Si ponga $A^0(V) = C$ ed $A^1(V) = V^*$, allora il prodotto così definito per gli elementi della base $\mathcal{V}^* = \{v_1^*, \dots, v_n^*\}$ di V^* si può estendere per linearità ad un prodotto, compatibile con la moltiplicazione per costanti, su tutto l'insieme

$$A(V) = \bigoplus_{r=0}^{\dim V} A^r(V)$$

che rende $A(V)$ una C -algebra associativa e non-commutativa, detta l'algebra esterna su V^* ed usualmente indicata col simbolo $\Lambda(V^*)$. Per dualità si può definire in modo analogo l'algebra $\Lambda(V)$.