ح.بوعيون	قوانين التركيب الداخلي الزمرة ـ الحلقة ـ الجسم	الثانية ع ر

I) تعريف وأمثلة:

1- تعريف:

لتكن E مجموعة غير فارغة. نسمي قانون تركيب داخلي في E كل تطبيق f من E نحو E

$$f : E\times E \to E : (a,b) \to a*b$$

ترميز: العنصر $f(a,b)$ يسمى مركب العنصرين (a,b)

ونرمز له عادة ب $a*b$; aTb ; $a\perp b$

إذا كان $*$ قانون تركيب داخلي في E فإننا نكتب $(E,*)$ ونقرأ المجموعة E مزودة بالقانون $*$.

ملاحظة: ليكن $*$ قانون تركيب داخلي في E:

$$(\forall (a,b,c,d)\in E^4)\qquad \begin{cases}a=b\\ c=d\end{cases}\Rightarrow a*c=b*d$$

لأن:

$$\begin{cases}a=b\\ c=d\end{cases}\Rightarrow (a,c)=(b,d)\Rightarrow f(a,c)=f(b,d)$$

$$\Rightarrow a*c=b*d$$

*) لدينا:

$$(\forall (a,b,c)\in E^3)\begin{cases}a=b\Rightarrow a*c=b*c\\ a=b\Rightarrow c*a=c*b\end{cases}$$

2- أمثلة:

1- الجمع والضرب قانونا تركيب داخلي في $\mathbb{C},\mathbb{R},\mathbb{Q},\mathbb{Z},\mathbb{N}$

2- ⊗ الضرب قانون تركيب داخلي في $\mathbb{R}^+$ لكنه ليس كذلك في $\mathbb{R}^-$. لأن إذا كان $(a,b)\in\mathbb{R}_-^2$ فإن: $(a\times b)\in\mathbb{R}^+$ أي $(a\times b)\notin\mathbb{R}_-$.

3- ⊕ جمع متجهتين قانون تركيب داخلي في كل من V_2 و V_3.

4- الجداء السلمي ليس قانون تركيب داخلي في V_2 و V_3.

5- الجداء المتجهي قانون تركيب داخلي في V_3.

6- لتكن E مجموعة غير فارغة و $P(E)$ مجموعة أجزاء E. الاتحاد والتقاطع والفرق التماثلي قوانين تركيب داخلية في $P(E)$.

7- ليكن X جزء من $\mathbb{R}$. ليكن $F(X,\mathbb{R})$ مجموعة الدوال المعرفة من X نحو $\mathbb{R}$. الجمع والضرب المعرفين على $F(X,\mathbb{R})$ كما يلي:

$$(\forall x\in X)\qquad (f+g)(x)=f(x)+g(x)$$
$$(f.g)(x)=f(x).g(x)$$

قوانين تركيب داخلية في $F(X,\mathbb{R})$.

8- لتكن $A(E,E)$ مجموعة التطبيقات من E نحو E. E مجموعة غير فارغة.

التركيب o المعرف على $A(E,E)$ ب:

$$(\forall x\in E)\qquad (fog)(x)=f(g(x))$$

قانون تركيب داخلي في $A(E,E)$.

9- ليكن T مجموعة إزاحة المستوى. و H_0 مجموعة التحاكيات التي مركزها O. و R_0 مجموعة الدورانات التي لها نفس المركز O. التركيب "o" قانون تركيب داخلي في كل من T و H_0 و R_0.

لأن:

$$T_{\vec{u}}oT_{\vec{v}}=T_{\vec{u}+\vec{v}}$$
$$h_{(O,R)}oh'_{(O,R')}=h_{(O,RR')}$$
$$R_{(o,\alpha)}oR_{(o,\beta)}=R_{(o,\alpha+\beta)}$$

10- القانون $*$ المعرف على $\mathbb{R}$ بما يلي:

$$(\forall (a,b)\in\mathbb{R}^2)\ a*b=a^4+a^3-3a^2b$$

قانون تركيب داخلي في $\mathbb{R}$.

11- نعتبر المجموعة $E=\{1,2,3,6\}$

لنبين أن المضاعف المشترك الأصغر "$\vee$" قانون تركيب داخلي في E.

ولهذا نضع الجدول التالي الذي يسمى جدول القانون في E أو جدول $(E,\vee)$.

$\vee$	1	2	3	6
1	1	2	3	6
2	2	2	6	6
3	3	6	3	6
6	6	6	6	6

نلاحظ أن مركب أي عنصر من E هو عنصر من E. وبالتالي القانون "$\vee$" قانون تركيب داخلي في E.

3- جزء مستقر بالنسبة لقانون تركيب داخلي:

a) تعريف:

لتكن E مجموعة مزودة بقانون تركيب داخلي $*$. وليكن S جزء من E $(S\subset E)$.

نقول إن S جزء مستقر من $(E,*)$ إذا وفقط إذا كان:

$$(\forall (x,y)\in S^2)\quad x*y\in S$$

b) أمثلة:

1- $\mathbb{R}^+$ جزء مستقر من $(\mathbb{R},\times)$

2- $\mathbb{R}_-$ ليس جزءا مستقرا من $(\mathbb{R},\times)$

3- نعتبر المجموعة: $U=\{z\in\mathbb{C}/|z|=1\}$

$$(\forall (z,z')\in U^2):|z.z'|=|z|.|z'|=1.1=1$$

إذن: $(\forall (z,z')\in U^2): zz'\in U$

إذن U جزء مستقر من $(\mathbb{C},\times)$

ملاحظة:

إذا كان S جزءا مستقرا من $(E,*)$ فإن $*$ قانون تركيب داخلي في S.

II) خاصيات قوانين التركيب الداخلي:

1- التجميعية و التبادلية:

a) تعريف:

ليكن $*$ قانون تركيب داخلي في E.

1) نقول إن القانون $*$تجميعي في E إذا وفقط إذا كان

$$\left(\forall(a,b,c)\in E^3\right)\ a*(b*c)=(a*b)*c$$

2) نقول إن القانون $*$ تبادلي في E إذا وفقط إذا كان

$$\left(\forall(a,b)\in E^2\right)\quad a*b=b*a$$

ملاحظة:

إذا كان القانون $*$ تجميعي فإن:

$$a*(b*c)=a*b*c$$

b) أمثلة:

القوانين (1)، (3)، (6)، (7) و (9) التي رأيناها في أمثلة قوانين التركيب الداخلية كلها تجميعية وتبادلية (الفقرة I).

. نبين على (7) و (9) :

نبين أن الجمع تجميعي في $F(X,\mathbb{R})$:

ليكن f و g و h من $F(X,\mathbb{R})$. لنبين أن:

$$f+(g+h)=(f+g)+h$$

يعني: $(f+(g+h))(x)=((f+g)+h)(x)$

لدينا :

$$\begin{aligned}(\forall x\in X)\left(f+(g+h)\right)(x)&=f(x)+(g+h)(x)\\&=f(x)+g(x)+h(x)\\&=\left(f(x)+g(x)\right)+h(x)\\&=(f+g)(x)+h(x)\\&=\left((f+g)+h\right)(x)\end{aligned}$$

(لأن الجمع تجميعي في $\mathbb{R}$).

إذن $f+(g+h)=(f+g)+h$ ومنه الجمع تجميعي في $F(X,\mathbb{R})$.

نبين أن o تجميعي في T

نعتبر $t_{\vec{u}}$ و $t_{\vec{v}}$ و $t_{\vec{w}}$ من T لنبين أن:

$$t_{\vec{u}}o\left(t_{\vec{v}}ot_{\vec{w}}\right)=\left(t_{\vec{u}}ot_{\vec{v}}\right)ot_{\vec{w}}$$

لدينا:

$$\begin{aligned}t_{\vec{u}}o\left(t_{\vec{v}}ot_{\vec{w}}\right)&=t_{\vec{u}}ot_{\vec{v}+\vec{w}}\\&=t_{\vec{u}+(\vec{v}+\vec{w})}=t_{(\vec{u}+\vec{v})+\vec{w}}=t_{\vec{u}+\vec{v}}ot_{\vec{w}}\\&=\left(t_{\vec{u}}ot_{\vec{v}}\right)ot_{\vec{w}}\end{aligned}$$

(لأن الجمع تجميعي في V_3).

إذن:

$$\left(\forall(t_{\vec{u}},t_{\vec{v}},t_{\vec{w}})\in T^3\right);t_{\vec{u}}o\left(t_{\vec{v}}ot_{\vec{w}}\right)=\left(t_{\vec{u}}ot_{\vec{v}}\right)ot_{\vec{w}}$$

إذن o تجميعي في T.

ملاحظة:

. الجداء المتجهي ليس تجميعيا و لا تبادليا في V_3

. ليكن $(\vec{i},\vec{j},\vec{k})$ معلم م.م مباشر.

← لدينا $\vec{i}\wedge\vec{j}=-\vec{j}\wedge\vec{i}$ إذن "$\wedge$" ليس تبادليا.

← لدينا $(\vec{i}\wedge\vec{j})\wedge\vec{j}=\vec{k}\wedge\vec{j}=-\vec{i}$

و $\vec{i}\wedge(\vec{j}\wedge\vec{j})=\vec{i}\wedge\vec{0}=\vec{0}$

إذن $(\vec{i}\wedge\vec{j})\wedge\vec{j}\neq\vec{i}\wedge(\vec{j}\wedge\vec{j})$

ومنه "$\wedge$" (الجداء المتجهي) ليس تجميعيا في V_3.

تمرين تطبيقي:

نعتبر القانون $*$ المعرف على $\mathbb{R}$ بما يلي:

$$x*y=x+y+xy$$

ادرس تجميعية وتبادلية القانون $*$.

. التبادلية:

لدينا: $\left(\forall(x,y)\in\mathbb{R}^2\right)\ x*y=x+y+xy$

$$=y+x+yx=y*x$$

إذن $x*y=y*x$ ومنه $*$ تبادلي.

. التجميعية:

ليكن x و y و z من $\mathbb{R}$ لنتحقق هل:

$$(x*y)*z=x*(y*z)$$

لدينا:

$$\begin{aligned}(x*y)*z&=(x+y+xy)*z\\&=x+y+xy+z+(x+y+xy)z\\&=x+y+xy+z+xz+yz+xyz\quad(1)\end{aligned}$$

ولدينا:

$$\begin{aligned}x*(y*z)&=x*(y+z+yz)\\&=x+y+z+yz+x(y+z+yz)\\&=x+y+z+yz+xy+xz+xyz\quad(2)\end{aligned}$$

وبما أن (2) و (1) فإن $*$ تجميعي:

$$\left(\forall(x,y,z)\in\mathbb{R}^3\right)\ (x*y)*z=x*(y*z)$$

c) تجميعية مركب تطبيقي:

خاصية:

نعتبر التطبيقات من:

$$E\to F\to G\to H$$

لدينا: $ho(gof)=(hog)of$

هذا لا يعني أن o تجميعي.

− لنبين أن: $ho(gof)=(hog)of$

يعني:

$$(\forall x\in E)\ \left(ho(gof)\right)(x)=\left((hog)of\right)(x)$$

− ليكن $x\in E$

نضع $f(x)=y$ و $g(y)=z$ و $h(z)=t$

لدينا:

$$\begin{aligned}\left((hog)of\right)(x)&=(hog)\left(f(x)\right)=(hog)(y)\\&=h\left(g(y)\right)=h(z)=t\end{aligned}$$

ولدينا:

$$\begin{aligned}\left(ho(gof)\right)(x)&=h\left((gof)(x)\right)\\&=h\left(g\left(f(x)\right)\right)=h\left(g(y)\right)\\&=h(z)=t\end{aligned}$$

إذن:

$$(\forall x\in E)\left((hog)of\right)(x)=\left(ho(gof)\right)(x)$$

ومنه: $(hog)of=ho(gof)$

حالة خاصة:

ليكن $A(E,E)$ مجموعة التطبيقات من E نحو E.
لدينا "o" قانون تجميعي غير تبادلي في $A(E,E)$.

2- العنصر المحايد:

a) تعريف:

ليكن $*$ قانون تركيب داخلي في E. و $e\in E$.
نقول إن e عنصر محايد في E بالنسبة للقانون $*$ أو عنصر محايد في $(E,*)$ إذا وفقط إذاكان:
$$(\forall x\in E)\ e*x=x \ \ et\ \ x*e=x$$

ملاحظة:

إذا كان القانون $*$ تبادلي فإن e عنصر محايد إذا وفقط إذا كان:
$$(\forall x\in E)\ \ x*e=x$$

b) أمثلة:

← العدد 0 هو العنصر المحايد في كل من $(\mathbb{C},+),(\mathbb{R},+),(\mathbb{Q},+),(\mathbb{Z},+),(\mathbb{N},+)$

← العدد 1 هو العنصر المحايد في كل من $(\mathbb{C},\times),(\mathbb{R},\times),(\mathbb{Q},\times),(\mathbb{Z},\times),(\mathbb{N},\times)$

← $\vec{0}$ هو العنصر المحايد في كل من: $(V_3,+),(V_2,+)$

← $\varnothing$ هو العنصر المحايد في $(P(E),\cup)$

← E هو العنصر المحايد في $(P(E),\cap)$

← $\varnothing$ هو العنصر المحايد في $(P(E),\Delta)$

← الدالة $\theta:x\to 0$ هو العنصر المحايد في $(F(X,\mathbb{R}),+)$

← الدالة $f:x\to 1$ هو العنصر المحايد في $(F(X,\mathbb{R}),\times)$

← التطبيق المطابق $Id_E:x\to x$ عنصر محايد في $(A(E,E),o)$ $(foId_E=Id_Eof=f)$

ملاحظة:

نعتبر القانون $*$ المعرف على $\mathbb{N}^*$ بما يلي:
$$(\forall(a,b)\in\mathbb{N}^{*2})\ \ a*b=a^b$$
لدينا: $(\forall a\in\mathbb{N}^*)a*1=a^1=a\ \ (1)$

ولدينا: $1*a=1^a=1$

إذن 1 ليس عنصر محايدا.

وبما أنه يحقق (1) نقول إن 1 محايد على اليمين.

تعريف:

← نقول إن e عنصر محايد على اليمين في $(E,*)$ إذا وفقط إذا كان $(\forall x\in E)\ x*e=x$

← نقول إن e عنصر محايد على اليسار في $(E,*)$ إذا وفقط إذا كان $(\forall x\in E)\ e*x=x$

← يكون e محايدا إذا وفقط إذا كان محايد على E اليمين وعلى اليسار.

c) وحدانية العنصر المحايد:

خاصية:

ليكن $*$ قانون تركيب داخلي في E. إذا كان للقانون $*$ عنصرا محايد فإنه وحيد.

برهان:

نفترض أن $*$ يقبل عنصرين محايدين e و e'

– لدينا e عنصر محايد و $e'\in E$ إذن: $e*e'=e'$

ولدينا e' عنصر محايد و $e\in E$ إذن: $e*e'=e$

إذن $e'=e$

ومنه العنصر المحايد وحيد. (إذا كان موجودا).

تمارين تطبيقي:

تمرين (1):

نعتبر القانون $*$ المعرف على $\mathbb{R}$ بما يلي:
$$(\forall(x,y)\in\mathbb{R}^2)x*y=xy-4x-4y+20$$
– هل للقانون $*$ عنصر محايد؟

. لنبحث عن e من $\mathbb{R}$ بحيث: $(\forall x\in\mathbb{R})e*x=x*e=x$

ونلاحظ أن $*$ تبادلي. إذن يكفي أن نبحث عن e بحيث:
$$(\forall x\in\mathbb{R})e*x=x$$
لدينا:
$$(\forall x\in\mathbb{R})e*x=x \Leftrightarrow (\forall x\in\mathbb{R})ex-4e-4x+20-x=0$$
$$\Leftrightarrow (\forall x\in\mathbb{R})x(e-5)-4e+20=0$$
$$\Leftrightarrow \begin{cases}e-5=0\\20-4=0\end{cases}\Leftrightarrow\begin{cases}e=5\\e=5\end{cases}$$
إذن $e=5$ هو العنصر المحايد للقانون $*$.

تمرين (2):

نعتبر القانون $*$ المعرف على $\mathbb{R}$ ب:
$$(\forall x,y\in\mathbb{R})x*y=x+4y-1$$
هل للقانون $*$ عنصر محايد؟

. لنبحث عن e من $\mathbb{R}$ بحيث $(\forall x\in\mathbb{R})x*e=e*x=x$

يعني: $(\forall x\in\mathbb{R})x*e=x\ \ et\ \ e*x=x$

– لدينا:
$$(\forall x\in\mathbb{R})e*x=x\Leftrightarrow(\forall x\in\mathbb{R})e+4x-1=x$$
$$\Leftrightarrow(\forall x\in\mathbb{R})e+3x-1=0$$
$$\Leftrightarrow\begin{cases}3=0\\e-1=0\end{cases}$$
و هذا مستحيل.

إذن $*$ لا يقبل عنصرا محايدا في $\mathbb{R}$.

3- العنصر المماثل:

a) تعريف:

ليكن $*$ قانون تركيب داخلي في E. نفترض أن $*$ يقبل عنصرا محايدا e.
نقول إن العنصر x من E يقبل مماثلا بالنسبة ل $*$ إذا وفقط إذا وجد عنصر x' من E بحيث:
$$x*x'=x'*x=e$$

ملاحظة:

إذا كان القانون $*$ تبادلي نكتفي بإحدى المتساويتين.

b) أمثلة:

← في كل من $(\mathbb{C},+),(\mathbb{R},+),(\mathbb{Q},+),(\mathbb{Z},+)$ كل عنصر x يقبل مماثلا هو $-x$.

← في $(\mathbb{C}^*,\times);(\mathbb{R}^*,\times);(\mathbb{Q}^*,\times)$ كل عنصر x يقبل مماثلا هو $\frac{1}{x}$.

لأن: $x.\frac{1}{x}=\frac{1}{x}.x=1$

← ليكن $B(E,E)$ مجموعة التقابلات من E نحو E.

لدينا "o" قانون تركيب داخلي في $B(E,E)$ العنصر المحايد هو التطبيق الطابق Id_E.

كل عنصر f من $B(E,E)$ له مماثل هو تقابله العكسي f^{-1}

لأن: $fof^{-1} = f^{-1}of = Id_E$

c) خاصيات:

خاصية (1):

ليكن $*$ قانون تركيب داخلي في E. نفترض أن القانون $*$ يقبل عنصرا محايدا e وتجميعي. إذا كان لعنصر x مماثل x' فإن اذا المماثل وحيد.

برهان:

نفترض أن x يقبل مماثلين x' و x''.

يعني: $x*x' = x'*x = e$

$x*x'' = x''*x = e$

– لدينا:

$$x' = x'*e = x'*(x*x'') = (x'*x)*x''$$
$$= e*x'' = x''$$

إذن $x' = x''$.

خاصية (2):

ليكن $*$ قانون تركيب داخلي في E. نفترض أن القانون $*$ يقبل عنصرا محايدا e وتجميعي. إذا كان لعنصرين x و y مماثلان x' و y' فإن: $x*y$ يقبل مماثلا هو $y'*x'$.

يعني: $(x*y)' = y'*x'$.

برهان:

لدينا:

$$(x*y)*(y'*x')$$
$$= x*(y*y')*x' = x*e*x'$$
$$= (x*e)*x' = x*x' = e$$

وبنفس الطريقة نجد: $(y'*x')*(x*y) = e$

استنتاج:

ليكن f و g من $B(E,E)$.

مماثل f هو f^{-1} ومماثل g هو g^{-1}.

مماثل fog هو $g^{-1}of^{-1}$.

ونعلم أن مماثل fog هو $(fog)^{-1}$

إذن: $(fog)^{-1} = g^{-1}of^{-1}$

تمرين:

نعتبر القانون $*$ المعرف على $\mathbb{R}$ بما يلي:

$x*y = xy - 4x - 4y + 20$

من خلال ما سبق 5 هو العنصر المحايد.

– حدد العناصر التي تقبل مماثلا.

ليكن $x \in \mathbb{R}$

لنتحقق هل x يقبل مماثلا.

لنبحث عن x' بحيث $x*x' = 5$ (القانون تبادلي).

لدينا: $x*x' = 5 \Leftrightarrow xx' - 4x - 4x' + 20 = 5$

$\Leftrightarrow x'(x-4) = 4x-15$

← إذا كان $x \neq 4$

فإن: $x' = \frac{4x-15}{x-4}$ ومنه x يقبل مماثلا هو $\frac{4x-15}{x-4}$

← إذا كان $x = 4$

فإن $o = 1$ ومنه 4 لا يقبل مماثلا

إذن مجموعة العناصر التي تقبل مماثلا هي: $\mathbb{R} - \{4\}$

والمماثل هو: $\frac{4x-15}{x-4}$.

4- العنصر المنتظم:

a) تعريف:

ليكن $*$ قانون تركيب داخلي في E. نقول إن عنصرا a من E منتظم إذا وفقط إذا كان:

$$(\forall (x,y) \in E^2) \begin{cases} a*x = a*y \Rightarrow x = y \\ x*a = y*a \Rightarrow x = y \end{cases}$$

ملاحظة:

إذا كان القانون $*$ تبادلي فإن أحد الاستلزامين كاف.

b) أمثلة:

← جميع عناصر كل من المجموعات $\mathbb{C}, \mathbb{R}, \mathbb{Q}, \mathbb{Z}, \mathbb{N}$ منتظمة بالنسبة للجمع لأن: $a+x = a+y \Rightarrow x = y$

← في كل من $\mathbb{C}, \mathbb{R}, \mathbb{Q}, \mathbb{Z}, \mathbb{N}$ كل عنصر $a \neq 0$ منتظم بالنسبة للضرب لأن: $ax = ay \Rightarrow x = y$

تمرين:

ليكن $*$ قانون تركيب داخلي في E، تجميعي.

e العنصر المحايد في $(E,*)$. ليكن $a \in E$.

– بين أنه إذا كان a يقبل مماثلا فإن a منتظم.

نفترض أن a يقبل مماثلا a'

لنبين أن a منتظم أي: $(\forall (x,y) \in E^2)$

$a*x = a*y \Rightarrow x = y$

$x*a = y*a \Rightarrow x = y$

لدينا:

$$a*x = a*y \Rightarrow a'*(a*x) = a'*(a*y)$$
$$\Rightarrow (a'*a)*x = (a'*a)*y$$
$$\Rightarrow e*x = e*y$$
$$\Rightarrow x = y$$

وبنفس الطريقة نبين أن: $x*a = y*a \Rightarrow x = y$

إذن a منتظم.

III) التشاكل:

1- تعريف وأمثلة:

a) تعريف:

ليكن $*$ قانون تركيب داخلي في E.

و T قانون تركيب داخلي في F.

نسمي تشاكل من $(E,*)$ نحو (F,T) كل تطبيق $f : E \to F$ يحقق ما يلي:

$(\forall (x,y) \in E^2) : f(x*y) = f(x)\mathrm{T}f(y)$.

b) أمثلة:

1- نعتبر التطبيق: $f:(\mathbb{R},+)\to(\mathbb{R},+)$

$$x\to ax$$

لنبين أن f تشاكل.

يعني: $(\forall(x,y)\in\mathbb{R}^2)\ f(x+y)=f(x)+f(y)$

- لدينا: $f(x+y)=a(x+y)=ax+ay$

$$=f(x)+f(y)$$

إذن:

$$(\forall(x,y)\in\mathbb{R}^2)\ f(x+y)=f(x)+f(y)$$

إذن f تشاكل من $(\mathbb{R},+)$ نحو $(\mathbb{R},+)$.

2- نعتبر $f:\mathbb{Q}\to\mathbb{R}$

$r\to a^r$ مع $(a\in\mathbb{R}_+^*)$

بين أن f تشاكل من $(\mathbb{Q},+)$ نحو $(\mathbb{R},\times)$

- ليكن r و r' من $\mathbb{Q}$.

لنبين أن: $f(r+r')=f(r)\times f(r')$

لدينا:

$$f(r+r')=a^{r+r'}=a^r\times a^{r'}=f(r)\times f(r')$$

إذن: $(V(r,r')\in\mathbb{Q}^2)\ f(r+r')=f(r).f(r')$

ومنه f تشاكل من $(\mathbb{Q},+)$ نحو $(\mathbb{R},\times)$.

تمارين تطبيقية:

تمرين 1:

نعرف في $\mathbb{R}^2$ جمع زوجين وجداء زوجين بما يلي:

$$(x,y)+(x',y')=(x+x',y+y')$$

$$(x,y).(x',y')=(xx'-yy',xy'+x'y)$$

ونعتبر التطبيق $f:\mathbb{C}\to\mathbb{R}^2$

$$z=a+ib\to(a,b)$$

بين أن f تشاكل من $(\mathbb{C},+)$ نحو $(\mathbb{R}^2,+)$

بين أن f تشاكل من $(\mathbb{C},\times)$ نحو $(\mathbb{R}^2,\times)$

← لنبين أن f تشاكل من $(\mathbb{C},+)$ نحو $(\mathbb{R}^2,+)$.

ليكن $z=a+ib$ et $z'=a'+ib'$

لنبين أن: $f(z+z')=f(z)+f(z')$

لدينا:

$$z+z'=(a+ib)+(a'+ib')$$
$$=(a+a')+i(b+b')$$

إذن:

$$f(z+z')=(a+a',b+b')$$
$$=(a,b)+(a',b')=f(z)+f(z')$$

إذن f تشاكل من $(\mathbb{C},+)$ نحو $(\mathbb{R}^2,+)$.

← لنبين أن f تشاكل من $(\mathbb{C},+)$ نحو $(\mathbb{R}^2,+)$.

ليكن $z=a+ib$ ولنبين أن: $f(z.z')=f(z).f(z')$

$z'=a'+ib'$

لدينا:

$$z.z'=(a+ib).(a'+ib')=(aa'-bb')+i(ab'+a'b)$$

إذن:

$$f(z.z')=(aa'-bb',ab'+a'b)$$

ولدينا:

$$f(z).f(z')=(a,b).(a',b')$$
$$=(aa'-bb',ab'+a'b)$$

إذن $f(z.z')=f(z).f(z')$

ومنه f تشاكل من $(\mathbb{C},\times)$ نحو $(\mathbb{R}^2,\times)$

تمرين 2:

نعتبر المجموعة $A=\{f_{(a,b)}:x\to ax+b\ /\ (a,b)\in IR^2\}$

ونعرف على IR^2 القانون T بمايلي: $(a,b)T(a',b')=(aa',ab'+b)$ ونعتبر التطبيق

$$\varphi:(A,\circ)\to(IR,T)$$
$$f_{(a,b)}\to(a,b)$$

بين أن φ تشاكل

يكون φ تشاكل من (A,o) نحو $(\mathbb{R}^2,T)$ إذا وفقط إذا كان:

$$\left(\forall\left(f_{(a,b)},f_{(a',b')}\right)\in A^2\right):$$

$$\varphi\left(f_{(a,b)}of_{(a',b')}\right)=\varphi\left(f_{(a,b)}\right)T\varphi\left(f_{(a',b')}\right)$$

لدينا

$$(\forall x\in\mathbb{R})\left(f_{(a,b)}of_{(a',b')}\right)(x)=f_{(a,b)}\left(f_{(a',b')}(x)\right)$$
$$=f_{(a,b)}(a'x+b')$$
$$=a(a'x+b')+b$$
$$=aa'x+ab'+b$$

إذن:

$$\varphi\left(f_{(a,b)}of_{(a',b')}\right)=(aa',ab'+b)$$
$$=(a,b)T(a',b')$$
$$=\varphi(f_{(a,b)})T\varphi(f_{(a',b')})$$

ومنه: φ تشاكل

2- خاصيات:

خاصية 1

ليكن f تشاكل من $(E,*)$ نحو (F,T)
لدينا $f(E)$ جزء مستقر من (F,T).

برهان:

$f:(E,*)\to(F,T)$ تشاكل.

لنبين أن $f(E)$ مستقر من (F,T)

*) لدينا $f(E)\subset F$

*) ليكن x' و y' من $f(E)$. لنبين أن: $x'Ty'\in f(E)$.

لدينا x' و y' من $f(E)$. إذن يوجد x و y من E بحيث:

$$x'=f(x)\text{ و }y'=f(y)$$

إذن:

$$x'Ty'=f(x)Tf(y)=f(x*y)$$

ولدينا $x*y\in E$

إذن $f(x*y)\in f(E)$ يعني: $x'Ty'\in f(E)$

إذن $f(E)$ مستقر من (F,T).

ملاحظة:

إذا كان f تشاكل من $(E,*)$ نحو (F,T) فإن T قانون تركيب داخلي في $f(E)$.

خاصية (2):

ليكن $f:(E,*)\to(F,\top)$ تشاكلا.

*) إذا كان $*$ تجميعي في E فإن T تجميعي في $f(E)$.

*) إذا كان $*$ تبادلي في E فإن T تبادلي في $f(E)$.

*) إذا كان ل $*$ عنصر محايد e في E فإن T يقبل مماثلا في $(f(E),\top)$ هو $f(x')$ يعني: $(f(x))'=f(x')$.

برهان:

ليكن $f:(E,*)\to(F,\top)$ تشاكلا.

← نفترض أن $*$ تجميعي في E . لنبين أن T تجميعي في $f(E)$.

ليكن x',y',z' من $f(E)$. لنبين أن $x'\top(y'\top z')=(x'\top y')\top z'$.

لدينا $x',y',z'\in f(E)$. إذن يوجد x,y,z من E بحيث:

$$x'=f(x)\ ;\ y'=f(y)\ ;\ z'=f(z)$$

إذن:

$$\begin{aligned}(x'\top y')\top z' &= (f(x)\top f(y))\top f(z)\\ &= f(x*y)\top f(z)\\ &= f\left[(x*y)*z\right]\\ &= f\left[x*(y*z)\right]=f(x)\top f(y*z)\\ &= f(x)\top(f(y)\top f(z))\end{aligned}$$

إذن: $(x'\top y')\top z'=x'\top(y'\top z')$

ومنه T تجميعي في (E)

+ بنفس الطريقة نبين أن T تبادلي في $f(E)$.

+ نفترض أن e عنصر محايد في $(E,*)$. لنبين أن $f(e)$ عنصر محايد في $f(E)$.

ليكن x' من $f(E)$. لنبين أن: $x'\top f(e)=f(e)\top x'=x'$

لدينا $x'\in f(E)$ إذن يوجد x من E بحيث $x'=f(x)$.

بنفس الطريقة نجد: $f(e)\top x'=x'$

إذن $f(e)$ هو العنصر المحايد في $f(E)$.

← نفترض أن x' هو مماثل x في $(E,*)$. لنبين أن $f(x')$ هو مماثل $f(x)$ في $(f(E),\top)$.

يعني: $f(x)\top f(x')=f(x')\top f(x)=f(e)$

لدينا:

$$f(x)\top f(x')=f(x*x')=f(e)$$

$$f(x')\top f(x)=f(x'*x)=f(e)$$

إذن $f(x')$ هو مماثل $f(x)$ في $(f(E),\top)$.

ملاحظة:

1) إذا كان $f:(E,*)\to(F,\top)$. تشاكلا فإن f ينقل خاصيات $*$ في E إلى T في $f(E)$.

وإذا كان f شمولي فإن $f(E)=F$ وبالتالي f ينقل خاصيات $*$ في E إلى T في F .

2) نقول إن مجموعتين E و F متشاكلتان إذا وفقط إذا وجد تشاكل من E نحو F .

− ونقول إن E و F متشاكلتان تقابليا إذا وفقط إذا وجد تشاكل تقابلي من E نحو F .

IV) الزمرة: Groupe

1- تعريف:

لتكن G مجموعة مزودة بقانون تركيب داخلي $*$ نقول إن $(G,*)$ زمرة إذا وفقط إذا تحققت الشروط التالية:

← " $*$ " تجميعي في G

← " $*$ " يقبل عنصرا محايدا.

← كل عنصرين G يقبل مماثلا.

ملاحظات:

ليكن $(G,*)$ زمرة.

← إذا كان " $*$ " تبادلي، نقول إن $(G,*)$ زمرة تبادلية أو أبيلية (Abelien).

← إذا كانت G منتهية. نقول إن $(G,*)$ زمرة منتهية.

← يمكن أن نرمز للقانون " $*$ " بالجمع " + " (دون أن يكون هو الجمع المعتاد) وفي هذه الحالة نرمز للعنصر المحايد ب " 0 ". ونرمز لمماثل x ب $-x$.

← يمكن أن نرمز للقانون " $*$ " بالضرب " . " (دون أن يكون هو الضرب الاعتيادي). وفي هذه الحالة نرمز للعنصر المحايد ب 1. ولمماثل x ب x^{-1} .

2 – أمثلة:

← كل من $(\mathbb{C},+),(\mathbb{R},+),(\mathbb{Q},+),(\mathbb{Z},+)$ زمرة تبادلية.

← كل من $(\mathbb{C}^*,\times),(\mathbb{R}^*,\times),(\mathbb{Q}^*,\times)$ زمر تبادلية.

← كل من $(V_2,+)$ و $(V_3,+)$ زمرة تبادلية.

← $(F(X,\mathbb{R}),+)$ زمرة تبادلية.

← $(B(E,E),o)$ (مجموعة التقابلات)، زمرة غير تبادلية.

← كل من $(R_o,o),(H_o,o),(T,o)$ زمر تبادلية.

← $(P(E),\cap)$ و $(P(E),\cup)$ ليسا زمرتين.

← $(P(E),\Delta)$ زمرة تبادلية.

3- خاصيات

خاصية (1):

لتكن $(G,*)$ زمرة. لدينا ما يلي:

← " $*$ " تجميعي.

← " $*$ " يقبل عنصرا محايدا.

← كل عنصر x من G يقبل مماثلا x' في G .

← كل عنصر a من G منتظم (لأنه يقبل مماثلا).

← $(\forall(a,x,y)\in G^3)\quad a*x=a*y\Leftrightarrow x=y$

$$x*a=y*a\Leftrightarrow x=y$$

نلخص هذه الخاصية بقولنا: يمكن الاختزال في زمرة وبدون شروط.

خاصية (2):

لتكن $(G,*)$ زمرة. وليكن a و b من G .

كل من المعادلتين: $a*x=b\ (1)$ و $x*a=b\ (2)$ تقبل حلا وحيدا في G .

برهان:

$$(1) \Leftrightarrow a*x=b$$
$$\Leftrightarrow a'*a*x=a'*b$$
$$\Leftrightarrow e*x=a'*b$$
$$\Leftrightarrow x=a'*b$$

إذن (1) تقبل حلا وحيدا في G هو $a'*b$

– بنفس الطريقة نجد أن (2) تقبل حلا وحيدا في G: $b*a'$

استنتاج:

ليكن $(G,*)$ زمرة. وليكن $a\in G$.

نعتبر التطبيق

$$f:G\to G \qquad g:G\to G$$
$$x\to a*x \qquad x\to x*a$$

التطبيقان f و g تقابلان.

4– زمرة جزئية: Sous - groupe

a) تعريف:

لتكن $(G,*)$ زمرة. و H جزء مستقر من $(G,*)$.

نقول إن $(H,*)$ زمرة جزئية ل $(G,*)$ أو H زمرة جزئية ل G:

إذا وفقط إذا كان $(H,*)$ زمرة.

b) أمثلة:

← $(\mathbb{Q},+)$ زمرة جزئية ل $(\mathbb{R},+)$.

← $(\mathbb{R}^*,\times)$ زمرة جزئية ل $(\mathbb{C}^*,\times)$.

← لتكن $B(P,P)$ مجموعة تقابلات المستوى.

كل من $(R_o,o),(H_o,o),(T,o)$ زمرة جزئية ل $(B(P,P),o)$.

← ليكن $(G,*)$ زمرة عنصرها المحايد e.

لدينا $(\{e\},*)$ زمرة جزئية ل $(G,*)$.

و $(G,*)$ زمرة جزئية ل $(G,*)$.

وكل زمرة جزئية H تخالف هتين الزمرتين تسمى زمرة جزئية فعلية (non trivial)

ملاحظة:

يمكن لزمرة G أن تكون غير تبادلية لكن الزمرة الجزئية تبادلية.

– **مثال:** $(B(P,P),o)$ غير تبادلية.

لكن (T,o) تبادلية.

c) خاصيات:

خاصية (1):

لتكن $(G,*)$ زمرة عنصرها المحايد e ولتكن H زمرة جزئية ل $(G,*)$.

لدينا ما يلي:

← $H\neq\varnothing$

← e هو العنصر المحايد في H.

← إذا كان $x\in H$ و x' مماثل x في G، فإن $x'\in H$.

← $\left(\forall(x,y)\in H^2\right): x*y'\in H$

حيث y' مماثل y في G.

برهان:

*) لدينا $H\neq\varnothing$ لأنها تضم العنصر المحايد.

*) لنبين أن e هو العنصر المحايد في H:

ليكن e' العنصر المحايد في H.

لنبين أن $e=e'$:

ليكن $x\in H$

لدينا e' هو العنصر المحايد في H. إذن: $x*e'=x \quad (1)$

ولدينا $H\subset G$ إذن $x\in G$. ولدينا e هو العنصر المحايد في G إذن $(2)\ x*e=x$.

من (1) و (2) نجد: $x*e'=x*e$

إذن: $e'=e$

إذن e هو العنصر المحايد في H.

*) ليكن $x\in H$ و x' مماثل x في G.

لنبين أن x' ينتمي ل H.

ليكن x'' مماثل x في H.

لدينا: $\begin{cases} x*x'=e \\ x*x''=e'=e \end{cases}$ إذن $x*x'=x*x''$

إذن $x'=x''$

ومنه $x'\in H$

*) ليكن x و y من H. و y' مماثل y في G.

لنبين أن $x*y'\in H$.

لدينا $y\in H$. ومن خلال ما سبق $y'\in H$.

إذن: $\begin{cases} x\in H \\ y'\in H \end{cases}$ إذن $x*y'\in H$ لأن H جزء مستقر من G.

خاصية (2):

ليكن $(G,*)$ زمرة. و H جزء من G.

تكون H زمرة جزئية ل $(G,*)$ إذا وفقط إذا كان:

*) $H\neq\varnothing$.

*) $\left(\forall(x,y)\in H^2\right)\ x*y'\in H$

حيث y' مماثل y في G.

برهان:

*) نفترض أن H زمرة جزئية ل $(G,*)$.

من خلال الخاصية السابقة لدينا:

$H\neq\varnothing$

و $\left(\forall(x,y)\in H^2\right)\ x*y'\in H$ مع y' مماثل y في G.

*) نفترض أن

$H\neq\varnothing$ و $\left(\forall(x,y)\in H^2\right)\ x*y'\in H \quad$ (II)

لنبين أن H زمرة جزئية ل $(G,*)$.

1– لدينا $H\neq\varnothing$ إذن يوجد a: $a\in H$.

لدينا $(a,a)\in H^2$

إذن من خلال (II): $a*a'\in H$

يعني: $e\in H$

2– ليكن $x\in H$.

لدينا $(e,x)\in H^2$ إذن: $e*x'\in H$

يعني: $x'\in H$

إذن $(\forall x\in H):\ x'\in H$

حيث x' هو مماثل x في G.

3- ليكن x و y من H

من خلال ما سبق نستنتج أن $y' \in H$.

إذن $(x,y') \in H^2$ ومن (II) نجد: $x*(y')' \in H$

يعني: $x*y \in H$

إذن H جزء مستقر.

ومنه القانون * قانون تركيب داخلي في H.

4- لنبين أن $(H,*)$ زمرة:

- * تجميعي في G إذن * تجميعي في H
- $e \in H$ و $(\forall x \in H): e*x = x*e = x$:

إذن e العنصر المحايد في H.

- ليكن $x \in H$.

لدينا $x \in G$ إذن x يقبل مماثل x' في G. يعني: $x*x' = x'*x = e$ ومن خلال ما سبق لدينا $x' \in H$.

إذن x' هو مماثل x في H. وبالتالي $(H,*)$ زمرة جزئية.

ملاحظة:

1- *) إذا رمزنا للقانون " * " ب " + " فإن الخاصية المميزة تصبح:

- $H \neq \varnothing$
- $(\forall (x,y) \in H^2)\ x-y \in H$

*) إذا رمزنا للقانون * ب " $\times$ " فإن الخاصية المميزة تصبح:

- $H \neq \varnothing$
- $(\forall (x,y) \in H^2)\ x.y^{-1} \in H$

2- لتكن $(G,*)$ زمرة و $H \subset G$

تكون $(H,*)$ زمرة جزئية ل $(G,*)$ إذا وفقط إذا كان:

*) $H \neq \varnothing$

*) $(\forall (x,y) \in H^2)\ x+y \in H$

*) $(\forall x \in H): x' \in H$ (x' مماثل x في G).

تمارين تطبيقية:

تمرين (1):

نعتبر المجموعة: $U=\{z\in\mathbb{C} / |z|=1\}$

بين أن $(U,\times)$ زمرة تبادلية.

*) لنبين أن $(U,\times)$ زمرة تبادلية:

نعلم أن $(\mathbb{C}^*,\times)$ زمرة تبادلية.

إذن يكفي أن نبين أن $(U,\times)$ زمرة جزئية ل $(\mathbb{C}^*,\times)$.

← لدينا:

$$(\forall z\in U): |z|=1$$

إذن: $z\neq 0$

إذن: $z \in \mathbb{C}^*$

إذن: $U \in \mathbb{C}^*$

← لدينا $U\neq\varnothing$ (لأن $1\in U$).

← ليكن z_1 و z_2 من U. لنبين أن: $z_1\times z_2^{-1}\in U$

لدينا: $$|z_1\times z_2^{-1}| = |z_1|\times\left|\frac{1}{z_2}\right|$$

$$= |z_1|\times\frac{1}{|z_2|} = 1$$

لأن $|z_1|=1$

و $|z_2|=1$

إذن: $z_1\times z_2^{-1}\in U$

وبالتالي فإن U زمرة جزئية ل $(\mathbb{C}^*,\times)$.

ومنه فإن $(U,\times)$ زمرة تبادلية.

تمرين (2):

ليكن $n\in\mathbb{N}$. نعتبر المجموعة:

$$n\mathbb{Z}=\{nk / k\in\mathbb{Z}\}$$

بين أن $(n\mathbb{Z},+)$ زمرة تبادلية.

*) لنبين أن: $(n\mathbb{Z},+)$ زمرة تبادلية.

لدينا $n\mathbb{Z}\subset\mathbb{Z}$. ونعلم أن $(\mathbb{Z},+)$ زمرة تبادلية.

إذن يكفي أن نبين أن $(n\mathbb{Z},+)$ زمرة جزئية ل $(\mathbb{Z},+)$:

← لدينا $n\mathbb{Z}\neq\varnothing$ (لأن $0\in n\mathbb{Z}$).

← ليكن x و y من $n\mathbb{Z}$. لنبين أن: $x-y\in n\mathbb{Z}$.

لدينا x و y من $n\mathbb{Z}$ إذن يوجد k_1 و k_2 بحيث:

$x=nk_1$ و $y=nk_2$

إذن:

$$x-y = nk_1-nk_2 = n(k_1-k_2)$$
$$= nk_3$$

مع $k_3=k_1-k_2\in\mathbb{Z}$

إذن: $x-y\in n\mathbb{Z}$

ومنه $(\forall(x,y)\in n\mathbb{Z}^2): x-y\in n\mathbb{Z}$

وبالتالي $(n\mathbb{Z},+)$ زمرة جزئية ل $(\mathbb{Z},+)$.

إذن $(n\mathbb{Z},+)$ زمرة تبادلية.

تمرين (3):

لتكن $(G,.)$ زمرة عنصرها المحايد e.

ليكن $a\in G$.

نضع: $C_a=\{x\in G / a.x=x.a\}$ (centralisateur de a)

$$Z(G)=\{x\in G / (\forall y\in G): x.y=y.x\}$$

(centre de G)

بين أن C_a و $Z(G)$ زمرتان جزئيتان ل $(G,.)$.

*) لنبين أن: C_a زمرة جزئية ل $(G,.)$:

← لدينا: $a.e=e.a=a$

إذن: $e.a=a.e$ إذن $e\in C_a$

ومنه: $C_a\neq\varnothing$.

← ليكن x و y من C_a. لنبين أن: $x.y^{-1}\in C_a$

يعني: $a.(x.y^{-1}) = (x.y^{-1}).a$

لدينا x و y من C_a إذن:

$$\begin{cases} x.a = a.x & (1) \\ y.a = a.y & (2) \end{cases}$$

لدينا من (2): $(y.a)^{-1} = (a.y)^{-1}$

يعني:

$$a^{-1}.y^{-1} = y^{-1}.a^{-1}$$

إذن:

$$\begin{cases} x.a = a.x \\ a^{-1}.y^{-1} = y^{-1}.a^{-1} \end{cases}$$

إذن: $x.a.a^{-1}.y^{-1} = a.x.y^{-1}.a^{-1}$

يعني: $x.e.y^{-1} = a.x.y^{-1}.a^{-1}$

يعني: $x.y^{-1} = a.x.y^{-1}.a^{-1}$

يعني: $x.y^{-1}.a = a.x.y^{-1}.a^{-1}.a$

يعني: $x.y^{-1}.a = a.x.y^{-1}.e$

يعني: $x.y^{-1}.a = a.x.y^{-1}$

إذن: $\left(\forall (x,y) \in C_a^2\right)\ x.y^{-1} \in C_a$

ومنه C_a زمرة جزئية ل $(G,.)$

*) لنبين أن $Z(G)$ زمرة جزئية ل $(G,.)$:

← لدينا $(\forall y \in G): e.y = y.e = y$

إذن $e \in Z(G)$

← ليكن a و b من $Z(G)$. لنبين أن: $a.b^{-1} \in Z(G)$

يعني: $(\forall y \in G):\ (a.b^{-1}).y = y.(a.b^{-1})$

ليكن $y \in G$. لنبين أن: $(a.b^{-1}).y = y.(a.b^{-1})$

– لدينا a و b من $Z(G)$. إذن:

$$\begin{cases} a.y = y.a & (1) \\ b.y = y.b & (2) \end{cases}$$

وبنفس الطريقة السابقة نجد:

$$(a.b^{-1}).y = y.(a.b^{-1})$$

إذن:

$$(\forall y \in G):\ (a.b^{-1}).y = y.(a.b^{-1})$$

إذن $a.b^{-1} \in Z(G)$.

ومنه $Z(G)$ زمرة جزئية ل $(G,.)$.

5– تشاكل زمرة:

خاصية:

لتكن $(G,*)$ زمرة. E مجموعة مزودة بقانون تركيب داخلي T. و $f:(G,*) \to (E,T)$ تشاكل.

لدينا ما يلي:

*) $(f(G),T)$ زمرة.

*) إذا كانت $(G,*)$ زمرة تبادلية فإن $(f(G),T)$ زمرة تبادلية.

*) إذا كان f تشاكل شمولي، فإن: $f(G) = E$ إذن: (E,T) زمرة.

نقول إن التشاكل يحول زمرة إلى زمرة.

تمرين:

لتكن $(G,.)$ زمرة.

نعتبر التطبيق: $f_a : G \to G$

$$x \to a.x.a^{-1}$$

1) بين أن f_a تشاكل تقابلي من $(G,.)$ إلى $(G,.)$

2) نعتبر المجموعة:

$$F = \{ f_a / a \in G \}$$

a) بين أن " o " قانون تركيب داخلي في F.

b) نعتبر التطبيق $h : G \to F$

$$a \to f_a$$

← بين أن h تشاكل شمولي من $(G,.)$ نحو (F,o)

← استنتج أن (F,o) زمرة.

1) *) لنبين أن f_a تشاكل من $(G,.)$ نحو $(G,.)$

ليكن x و y من G.

لنبين أن: $f_a(x.y) = f_a(x).f_a(y)$

لدينا:

$$\begin{aligned} f_a(x.y) &= a.x.y.a^{-1} \\ &= a.x.e.y.a^{-1} \\ &= a.x.a^{-1}.a.y.a^{-1} \\ &= (a.x.a^{-1}).(a.y.a^{-1}) \\ &= f_a(x).f_a(y) \end{aligned}$$

إذن f_a تشاكل.

*) لنبين أن f_a تقابل:

ليكن $y \in G$. لنبحث عن x من G بحيث: $f_a(x) = y$

لدينا:

$$\begin{aligned} f_a(x) = y &\Leftrightarrow a.x.a^{-1} = y \\ &\Leftrightarrow a^{-1}.a.x.a^{-1} = a^{-1}.y.a \\ &\Leftrightarrow e.x.a^{-1}.a = a^{-1}.y.a \\ &\Leftrightarrow x.a^{-1}.a = a^{-1}.y.a \\ &\Leftrightarrow x = a^{-1}.y.a \in G \end{aligned}$$

إذن كل عنصر y من G يقبل سابق وحيد $x = a^{-1}.y.a$

إذن f_a تقابل.

ومنه f_a تشاكل تقابلي من $(G,.)$ نحو $(G,.)$.

2) a) لنبين أن " o " قانون تركيب داخلي في F.

ليكن f_a و f_b من F. لنبين أن $f_a o f_b \in F$

ليكن $x \in G$. لنحسب: $f_a o f_b(x)$:

$$\begin{aligned} f_a o f_b(x) &= f_a(f_b(x)) \\ &= f_a(b.x.b^{-1}) \\ &= a.b.x.b^{-1}.a^{-1} = a.b.x.(a.b)^{-1} = f_{ab}(x) \end{aligned}$$

إذن: $(\forall x \in G):\ f_a o f_b(x)\ f_{ab}(x)$

إذن: $f_a o f_b = f_{ab}$

ولدينا: $\begin{cases} a\in G \\ b\in G \end{cases}$ إذن $a.b\in G$

إذن $f_{ab}\in F$

وبالتالي $\left(\forall (f_a,f_b)\in F^2\right): f_a o f_b \in F$

إذن " o " قانون تركيب داخلي في F.

b) *) لنبين أن h تشاكل شمولي من $(G,.)$ نحو (F,o).

← ليكن a و b من G. لنبين أن: $h(a.b)=h(a)oh(b)$

لدينا: $h(a.b)=f_{ab}=f_a o f_b=h(a)oh(b)$

إذن h تشاكل.

← ولدينا h شمولي لأن كل عنصر f_a من F له سابق على الأقل a من G.

ومنه h تشاكل شمولي من $(G,.)$ نحو (F,o).

*) لنبين أن (F,o) زمرة.

- لدينا $(G,.)$ زمرة.

- و h تشاكل شمولي من $(G,.)$ نحو (F,o).

إذن (F,o) زمرة.

V) الحلقة:

1) توزيعية قانون بالنسبة لآخر.

تعريف:

لتكن E مجموعة مزودة بقانونها تركيب داخليين * و T.
نقول إن T توزيعي بالنسبة ل * إذا وفقط إذا كان:

$$\left(\forall (x,y,z)\in E^3\right) xT(y*z)=(xTy)*(xTz)\ (1)$$
$$(x*y)Tz=(xTz)*(yTz)\ (2)$$

ملاحظة:

*) إذا كان القانون T تبادلي فإن إحدى الخاصيتين (1) أو (2) كافية.
*) إذا تحققت الخاصية (1) نقول إن T توزيعي بالنسبة ل * على اليمين.

أمثلة:

1- الضرب توزيعي بالنسبة للجمع في كل من $\mathbb{N},\mathbb{Q},\mathbb{Z},\mathbb{R},\mathbb{C}$.

2- الجمع ليس توزيعيا بالنسبة للضرب:

$$x+(y\times z)\neq(x+y)\times(x+z)$$

3- الاتحاد توزيعي بالنسبة للتقاطع. والتقاطع توزيعي بالنسبة للاتحاد في $P(E)$.

$$A\cup(B\cap C)=(A\cup B)\cap(A\cup C)$$
$$A\cap(B\cup C)=(A\cap B)\cup(A\cap C)$$

4- الضرب توزيعي بالنسبة للجمع في $F(X,\mathbb{R})$

2) تعريف حلقة:

تعريف:

لتكن A مجموعة مزودة بقانوني تركيب داخليين * و T نقول إن $(A,*,T)$ حلقة إذا وفقط إذا تحققت الشروط التالية:

*) $(A,*)$ زمرة تبادلية.
*) T تجميعي.
*) T توزيعي بالنسبة ل *

ملاحظات:

*) إذا كان القانون T تبادلي. نقول إن الحلقة A تبادلية.
*) إذا كان للقانون T عنصر محايد، نقول إن الحلقة A واحدية.
*) نرمز عادة للقانون * ب " + " وللقانون T ب "×" ونرمز في هذه الحالة للعنصر المحايد ل * ب 0 أو 0_A ويسمى صفر حلقة. ونرمز للعنصر المحايد ل T ب 1 أو 1_A.

3) أمثلة:

1- كل من $(\mathbb{Z},+,\times),(\mathbb{Q},+,\times),(\mathbb{R},+,\times),(\mathbb{C},+,\times)$ حلقة تبادلية وواحدية.

2- $(F(X,\mathbb{R}),+,\times)$ حلقة تبادلية وواحدية.

4) خاصيات:

خاصية (1):

لتكن $(A,*,T)$ حلقة صفرها e
لدينا: $(\forall a\in A): aTe=eTa=e$.

ملاحظة:

إذا رمزنا ل $(A,*,T)$ ب $(A,+,\times)$ الخاصية تصبح:

$$(\forall a\in A): a\times 0=0\times a=0$$

برهان:

لدينا: $aT(e*e)=aTe$ (لأن $e*e=e$)

يعني: $(aTe)*(aTe)=aTe$

يعني: $(aTe)*(aTe)=(aTe)*e$

يعني: $aTe=e$ (لأن $(A,*)$ زمرة)

إذن: $aTe=e$

وبنفس الطريقة نبين أن $eTa=e$

ومنه $eTa=aTe=e$

خاصية (2):

لتكن $(A,*,T)$ صفرها e
نرمز ل a' لمماثل a في $(A,*)$.
لدينا: $\left(\forall (a,b)\in A^2\right): aTb'=a'Tb=(aTb)'$

ملاحظة:

إذا رمزنا ل $(A,*,T)$ ب $(A,+,\times)$ الخاصية تصبح:

$$\left(\forall (a,b)\in A^2\right): a\times(-b)=(-a)\times b=-(a.b)$$

برهان:

لنبين أن: $(aTb)'=aTb'$

يعني: $(aTb)*(aTb')=e$ (لأن * تبادلي).

– لدينا:

$$(a\text{T}b)*(a\text{T}b')=a\text{T}(b*b')$$
$$=a\text{T}e$$
$$=e$$

إذن $(a\text{T}b)'=a\text{T}b'$

بنفس الطريقة نبين أن $(a\text{T}b)'=a'\text{T}b$

5) العناصر القابلة للمماثلة:

تعريف:

لتكن $(A,*,\text{T})$ حلقة واحدية وحدتها ε.
نقول إن عنصرا a من A قابل للمماثلة أو يقبل مقلوبا إذا كان له مماثل بالنسبة للقانون T في A.

خاصية:

لتكن $(A,*,\text{T})$ حلقة واحدية وحدتها ε.
ولتكن U مجموعة العناصر القابلة للمماثلة.
لدينا: (U,T) زمرة.

برهان:

– لدينا $U\neq\varnothing$ لأن $\varepsilon\in U$.

– لنبين أن T قانون تركيب داخلي في U.

ليكن x وy من U لنبين أن $(x\text{T}y)\in U$

لدينا x وy من U إذن يقبلان مماثلين x'' وy'' في (A,T).

إذن $x\text{T}y$ له مماثل هو $y''\text{T}x''$.

إذن $x\text{T}y\in U$

ومنه T قانون تركيب داخلي في U.

– لدينا T تجميعي في A. إذن تجميعي في U.

– لدينا: $(\forall a\in U):\varepsilon\text{T}a=a\text{T}\varepsilon=a$

و $\varepsilon\in U$

إذن ε هو العنصر المحايد في U.

– ليكن $x\in U$ لنبين أنه يقبل مماثلا x'' في (U,T).

لدينا $x\in U$ إذن يقبل مماثلا x'' في (A,T).

ولدينا x'' يقبل مماثلا هو x إذن $x''\in U$

إذن x يقبل مماثلا هو x'' في (U,T).

وبالتالي (U,T) زمرة.

6) قواسم الصفر في حلقة:

مثال:

نعتبر الحلقة $(F(\mathbb{R},\mathbb{R}),+,\times)$ صفرها: $\theta:x\to 0$

ونعتبر الدالتين: $f:x\to|x|-x$

و: $g:x\to|x|+x$

لدينا:

$$(\forall x\in\mathbb{R}):(f.g)(x)=f(x).g(x)$$
$$=(|x|-x)(|x|+x)$$
$$=|x|^2-x^2$$
$$=x^2-x^2=0=\theta(x)$$

إذن: $(\forall x\in\mathbb{R})\quad f.g=\theta$

لدينا إذن $f\neq\theta\ ,\ g\neq\theta\ ,\ f.g=\theta$

نقول إن f وg قاسمين للصفر في الحلقة $(F(\mathbb{R},\mathbb{R}),+,.)$.

تعريف (1):

ليكن $(A,*,\text{T})$ حلقة صفرها 0_A
نقول إن عنصرا a من A قاسم للصفر إذا وفقط إذا كان:
$a\neq 0_A$ ويوجد $b\neq 0_A$ بحيث: $a\text{T}b=0_A$

تعريف (2):

لتكن $(A,*,\text{T})$ حلقة
نقول إن الحلقة $(A,*,\text{T})$ كاملة (intègre) إذا كانت لا تحتوي على قواسم للصفر.

ملاحظة:

نعتبر الحلقة $(A,+,\times)$ صفرها 0_A.

1– يكون a قاسم للصفر إذا كان:

$a\neq 0_A$ ويوجد $b\neq 0_A$ بحيث $a\times b=0_A$

2– تكون $(A,*,\text{T})$ كاملة إذا وفق إذا كان:

$$(\forall(x,y)\in A^2)\begin{cases}x\neq 0_A\\ y\neq 0_A\end{cases}\Rightarrow x.y\neq 0_A$$

يعني:

$$(\forall(x,y)\in A^2)\,x.y=0_A\Rightarrow\begin{cases}x=0_A\\ \text{أو}\\ y=0_A\end{cases}$$

أمثلة:

1– كل من $(\mathbb{C},+,\times);(\mathbb{R},+,\times);(\mathbb{Q},+,\times);(\mathbb{Z},+,\times)$ حلقة كاملة.

2– $(F(\mathbb{R},\mathbb{R}),+,\times)$ حلقة غير كاملة.

7) حلقتان هامتان:

a) حلقة المصفوفات المربعة:

← حلقة المصفوفات المربعة من الرتبة 2:

تعريف:

نسمي مصفوفة مربعة من الرتبة 2 بمعاملات حقيقية كل جدول على شكل:
$\begin{pmatrix}a & c\\ b & d\end{pmatrix}$ حيث a,b,c,d من $\mathbb{R}$.
ونرمز لمجموعة هذه المصفوفات ب $M_2(\mathbb{R})$

– نعرف على $M_2(\mathbb{R})$ الجمع والضرب كما يلي:

$$\leftarrow)\quad \begin{pmatrix}a & c\\ b & d\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}a' & b'\\ c' & d'\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}a+a' & b+b'\\ c+c' & d+d'\end{pmatrix}$$

$$\leftarrow)\quad \begin{pmatrix}a & b\\ c & d\end{pmatrix}.\begin{pmatrix}a' & b'\\ c' & d'\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}aa'+cb' & ac'+cd'\\ ba'+db' & bc'+dd'\end{pmatrix}$$

خاصية:

$(M_2(\mathbb{R}),+,\times)$ حلقة غير تبادلية وواحدية.

صفرها المصفوفة المنعدمة: $0=\begin{pmatrix}0&0\\0&0\end{pmatrix}$

وحدتها المصفوفة الوحدة: $I=\begin{pmatrix}1&0\\0&1\end{pmatrix}$ وغير كاملة.

← حلقة المصفوفات المربعة من الرتبة 3:

تعريف:

نسمي مصفوفة مربعة من الرتبة 3 بمعاملات حقيقية كل جدول على شكل:

$$\begin{pmatrix}a_{11}&a_{12}&a_{13}\\a_{21}&a_{22}&a_{23}\\a_{31}&a_{32}&a_{33}\end{pmatrix}$$ حيث $a_{ij}\in\mathbb{R}$

ونرمز لمجموعة هذه المصفوفات ب $M_3(\mathbb{R})$

– نعرف الجمع والضرب في $M_3(\mathbb{R})$ بما يلي:

$$\begin{pmatrix}a_{11}&a_{12}&a_{13}\\a_{21}&a_{22}&a_{23}\\a_{31}&a_{32}&a_{33}\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}b_{11}&b_{12}&b_{13}\\b_{21}&b_{22}&b_{23}\\b_{31}&b_{32}&b_{33}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}a_{11}+b_{11}&a_{12}+b_{12}&a_{13}+b_{13}\\a_{21}+b_{21}&a_{22}+b_{22}&a_{23}+b_{23}\\a_{31}+b_{31}&a_{32}+b_{32}&a_{33}+b_{33}\end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix}a_{11}&a_{12}&a_{13}\\a_{21}&a_{22}&a_{23}\\a_{31}&a_{32}&a_{33}\end{pmatrix}.\begin{pmatrix}b_{11}&b_{12}&b_{13}\\b_{21}&b_{22}&b_{23}\\b_{31}&b_{32}&b_{33}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}a_{11}b_{11}+a_{12}b_{21}+a_{13}b_{31}&&\\&&\\&&\end{pmatrix}$$

باستعمال الترميز يمكن أن نعرف الجمع والضرب كما يلي:

نعتبر المصفوفة:

$$A=(a_{ij})_{\substack{1\le i\le 3\\1\le j\le 3}} \quad ; \quad B=(b_{ij})_{\substack{1\le i\le 3\\1\le j\le 3}}$$

*) لدينا $A+B$ هي المصفوفة $S=(S_{ij})_{\substack{1\le i\le 3\\1\le j\le 3}}$

حيث: $S_{ij}=a_{ij}+b_{ij}$

*) ولدينا $A.B$ هي المصفوفة $C=(C_{ij})_{\substack{1\le i\le 3\\1\le j\le 3}}$

حيث $C_{ij}=\sum_{k=1}^{3}a_{ik}b_{jk}$

مثال:

$$\begin{pmatrix}1&1&2\\2&-1&1\\-1&1&1\end{pmatrix}.\begin{pmatrix}-1&1&-2\\1&2&-1\\1&2&1\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}2&7&-1\\-2&2&-2\\3&3&2\end{pmatrix}$$

خاصية:

$(M_3(\mathbb{R}),+,\times)$ حلقة غير تبادلية، غير كاملة وواحدية صفرها المصفوفة المنعدمة: $0=\begin{pmatrix}0&0&0\\0&0&0\\0&0&0\end{pmatrix}$ وحدتها $I=\begin{pmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{pmatrix}$

b) الحلقة $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$:

سبق وأن عرفنا الجمع والضرب في $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ كما يلي:

$$\bar{x}+\bar{y}=\overline{x+y}$$
$$\bar{x}.\bar{y}=\overline{x.y}$$

خاصية:

$(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z},+,\times)$ حلقة تبادلية واحدية صفرها $\bar{0}$ ووحدتها $\bar{1}$.

ملاحظة:

*) نعتبر $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z},+,\times)$ لدينا:

$$\bar{2}.\bar{3}=\bar{0}$$

و

$$\bar{2}\neq\bar{0} \text{ و } \bar{3}\neq\bar{0}$$

إذن $\bar{2}$ و $\bar{3}$ قاسمان للصفر.

إذن $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z},+,\times)$ حلقة غير كاملة.

*) نعتبر $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z},+,\times)$ حيث n أولي.

$$(\forall\bar{x},\bar{y}\in\mathbb{Z}/n\mathbb{Z})$$

$$\begin{aligned}\bar{x}.\bar{y}=\bar{0}&\Rightarrow\overline{x.y}=\bar{0}\\&\Rightarrow xy\equiv 0[n]\\&\Rightarrow n/xy\\&\Rightarrow n/x \text{ أو } n/y\\&\Rightarrow x\equiv 0[n] \text{ أو } y\equiv 0[n]\\&\Rightarrow \bar{x}=\bar{0} \text{ أو } \bar{y}=\bar{0}\end{aligned}$$

إذن $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z},+,\times)$ حلقة كاملة.

*) نعتبر الحلقة $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z},+,\times)$ حيث n غير أولي.

إذن n يقبل قاسم فعلي موجب n_1.

يعني: $n=n_1+n_2$

n_1 قاسم فعلي موجب إذن n_2 قاسم فعلي موجب.

لدينا $1<n_1<n$ إذن $n\times n_1$ يعني $n_1\not\equiv 0[n]$

و $1<n_2<n$ و $n\times n_2$ و $n_2\not\equiv 0[n]$

يعني: $\bar{n}_1\neq\bar{0}$ و $\bar{n}_2\neq\bar{0}$

ولدينا: $n_1.n_2=n$

يعني: $\overline{n_1.n_2}=\bar{n}$

يعني: $\bar{n}_1.\bar{n}_2=\bar{0}$

إذن $\bar{n}_1$ و $\bar{n}_2$ قاسمان للصفر.

ومنه: $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z},+,\times)$ حلقة غير كاملة.

خاصية:

الحلقة $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z},+,\times)$ كاملة إذا وفقط إذا كان n أولي.

تمرين:

نعتبر الحلقة $(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z},+,\times)$، $n\in\mathbb{N}^*$

حدد العناصر القابلة للمماثلة.

- لدينا:

$\bar{x}$ قابلة للمماثلة $\Leftrightarrow (\exists \bar{x}' \in \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}) : \bar{x}.\bar{x}' = \bar{1}$

$$\Leftrightarrow (\exists x' \in \mathbb{Z}) : x.x' \equiv 1[n]$$
$$\Leftrightarrow (\exists x', k \in \mathbb{Z}) : xx' = 1 + nk$$
$$\Leftrightarrow (\exists x', k \in \mathbb{Z}) : xx' - nk = 1$$
$$\Leftrightarrow x \wedge n = 1$$

إذن مجموعة العناصر التي تقبل مقلوبا هي:

$$U = \{\bar{x} \in \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} / x \wedge n = 1\}$$

ملاحظة:

لدينا $(U, \times)$ زمرة تبادلية.

VI) الجسم: Corps

1) تعريف:

لتكن k مجموعة مزودة بقانوني تركيب داخليين * و T.
نقول إن $(K, *, \mathrm{T})$ جسم إذا وفقط إذا تحقق ما يلي:
*) $(K, *, \mathrm{T})$ حلقة واحدية.
*) كل عنصر يخالف صفر الحلقة يقبل مماثلا بالنسبة ل T.

ملاحظة:

1- إذا كان القانون T تبادلي نقول إن الجسم K تبادلي.
2- يكون $(K, *, \mathrm{T})$ جسما إذا وفقط إذا كان:
*) $(K, *)$ زمرة.
*) $(K - \{0_k\}, \mathrm{T})$ زمرة.
*) T توزيعي بالنسبة ل *.

2) أمثلة:

1- كل من $(\mathbb{Q}, +, \times), (\mathbb{R}, +, \times), (\mathbb{C}, +, \times)$ جسم تبادلي.
2- نعتبر الحلقة $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}, +, \times)$ حيث p أولي.
لنبين أنها جسم.
- لدينا $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}, +, \times)$ حلقة واحدية.
- ليكن $\bar{x} \neq \bar{0}$
يعني $x \not\equiv 0[p]$ يعني $p \times x$
وبما أن p أولي فإن $p \wedge x = 1$
إذن حسب Bezout يوجد U و V بحيث:
$$pu + xv = 1$$
يعني: $\bar{p}.\bar{u} + \bar{x}.\bar{v} = \bar{1}$
يعني: $\bar{x}.\bar{v} = \bar{1}$ $\quad (\bar{0} = \bar{p})$
إذن $\bar{x}$ يقبل مماثلا هو $\bar{v}$.
إذن كل عنصر $\bar{x} \neq \bar{0}$ يقبل مقلوبا.
ومنه $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}, +, \times)$ جسم.

خاصية:

إذا كان p أولي فإن $(\mathbb{Z}/p\mathbb{Z}, +, \times)$ جسم تبادلي.

3- نعتبر الحلقة $(M_2(\mathbb{R}), +, \times)$
- لدينا $(M_2(\mathbb{R}), +, \times)$ حلقة واحدية.
- نعتبر المصفوفة $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$
لنتحقق هل A تقبل مقلوبا.
لنبحث عن $A' = \begin{pmatrix} a & c \\ b & d \end{pmatrix}$ بحيث: $A.A' = A'.A = I$
لدينا:

$$A.A' = I \Leftrightarrow \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} a & c \\ b & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$
$$\Leftrightarrow \begin{pmatrix} a+b & c+d \\ a+b & c+d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$
$$\Leftrightarrow \begin{cases} a+b=1 \\ c+d=0 \\ a+b=0 \\ c+d=0 \end{cases}$$

وهذا مستحيل.
إذن A لا تقبل مقلوبا A'.
ومنه $(M_2(\mathbb{R}), +, \times)$ ليس جسما.
وبنفس نجد أن $(M_3(\mathbb{R}), +, \times)$ ليس جسما.

3) خاصيات:

خاصية (1):

ليكن $(K, +, \times)$ جسما.
لدينا كل عنصر من $K - \{0_k\}$ منتظم بالنسبة للضرب.
يعني: $(\forall a \in K - \{0_k\})(\forall (x, y) \in K^2) :$
$$\begin{cases} a.x = a.y \Rightarrow x = y \\ x.a = y.a \Rightarrow x = y \end{cases}$$

خاصية (2):

ليكن $(K, +, \times)$ جسما.
لدينا:
$(\forall (x, y) \in K^2) : x.y = 0_k \Rightarrow x = 0_k$ أو $y = 0_k$
استنتاج: كل جسم هو حلقة كاملة.

خاصية (3):

ليكن $(K, +, \times)$ جسما.
نعتبر المعادلة $a \times x = b$
*) إذا كان $a \neq 0_k$ فإن المعادلة تقبل حلا وحيدا $x = a^{-1}b$.
*) إذا كان $a = 0_k$ و $b \neq 0_k$ فإن المعادلة ليس لها حل.
*) إذا كان $a = 0_k$ و $b = 0_k$ فإن $S = K$
نفس الشيء بالنسبة للمعادلة $x \times a = b$.

تمارين تطبيقية:

تمرين (1):

نعتبر: $L=\left\{\begin{array}{l} f_a:\mathbb{R}\to\mathbb{R} \\ \quad x\to ax\,/\,a\in\mathbb{R}\end{array}\right\}$

بين أن: $\left(L,+,o\right)$ جسم تبادلي.

تمرين (2):

نعتبر $E=\left\{M_{(a,b)}=\begin{pmatrix} a & b \\ -b & a+b\end{pmatrix}/\,a,b\in\mathbb{R}\right\}$

بين أن $\left(E,+,\times\right)$ جسم تبادلي.

الفضاءات المتجهية الحقيقية

I – تعريف و أمثلة :

1 – قانون تركيب خرجي :

a – تعريف :

لتكن A و E مجموعتين غير فارغتين

كل تطبيق f من $A\times E$ نحو E يسمى قانون تركيب خارجي معرف على E ذو المعاملات في A

بتعبير أخر :

f قانون تركيب خارجي معرف على E ذو المعاملات في A $\Leftrightarrow$	$\begin{aligned} f :& A\times E \to E \\ &(\alpha,x)\to f(\alpha,x)\end{aligned}$

يرمز عادة للصورة $f(\alpha,x)$ بالرمز $\alpha\bullet x$ أو αx

b – أمثلة :

1 – لكل α من IR و M من $M_2(IR)$ حيث $M=\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12}\\ a_{21} & a_{22}\end{pmatrix}$ لدينا : $\alpha M=\begin{pmatrix} \alpha a_{11} & \alpha a_{12}\\ \alpha a_{21} & \alpha a_{22}\end{pmatrix}\in M_2(IR)$

إذن :التطبيق : $\begin{aligned} f :& IR\times M_2(IR)\to M_2(IR)\\ &(\alpha,M)\to\alpha M\end{aligned}$ قانون تركيب خارجي معرف على $M_2(IR)$ و معاملاته في IR

2 – لكل α من IR و f من $F(I,IR)$ (مجموعة الدوال العددية المعرفة على مجال I ضمن IR نحو IR)

لدينا : $\alpha f\in F(I,IR)$

إذن : التطبيق $\begin{aligned} g :& IR\times F(I,IR)\to F(I,IR)\\ &(\alpha,f)\to\alpha f\end{aligned}$ قانون تركيب خارجي معرف على $F(I,IR)$ و معاملاته في IR

2 – تعريف الفضاء المتجهي :

a – تعريف :

لتكن E مجموعة مزودة بقانون تركيب داخلي $*$ و بقانون تركيب خارجي معاملاته في IR : $\begin{aligned} f :& IR\times E\to E\\ &(\alpha,x)\to\alpha\bullet x\end{aligned}$

نقول أن : $(E,*,\bullet)$ فضاء متجهي على IR أو فضاء متجهي حقيقي إذا وفقط إذا تحققت الشروط التالية :

1 – $(E,*)$ زمرة تبادلية

2 – $(\alpha+\beta)\bullet x=\alpha\bullet x+\beta\bullet x \qquad (\forall(\alpha,\beta)\in IR^2)(\forall x\in E)$

3 – $(\alpha\beta)\bullet x=\alpha\bullet(\beta\bullet x) \qquad (\forall(\alpha,\beta)\in IR^2)(\forall x\in E)$

4 – $\alpha\bullet(x*y)=\alpha\bullet x*\alpha\bullet y \qquad (\forall\alpha\in IR)(\forall(x,y)\in E^2)$

$5-\quad 1\bullet x=x \qquad (\forall x\in E)$

في ما تبقى من هذا الدرس نرمز للقانون الداخلي * بالرمز + و لكل عنصر x من E بالرمز $\vec{x}$ و نسميه متجهة منه التعريف التالي للفضاء المتجهي $(E,+,\times)$

نقول أن : $(E,+,\bullet)$ فضاء متجهي على IR أو فضاء متجهي حقيقي إذا وفقط إذا تحققت الشروط التالية :
$1-$ $(E,+)$ زمرة تبادلية
$2-\quad (\alpha+\beta)\vec{x}=\alpha\vec{x}+\beta\vec{y} \qquad (\forall(\alpha,\beta)\in IR^2)(\forall\vec{x}\in E)$
$3-\quad (\alpha\beta)\vec{x}=\alpha(\beta\vec{x}) \qquad (\forall(\alpha,\beta)\in IR^2)(\forall\vec{x}\in E)$
$4-\quad \alpha(\vec{x}+\vec{y})=\alpha\vec{x}+\alpha\vec{y} \qquad (\forall\alpha\in IR)(\forall(\vec{x},\vec{y})\in E^2)$
$5-\quad 1\bullet\vec{x}=\vec{x} \qquad (\forall x\in E)$

b – قواعد الحساب في فضاء متجهي :

ليكن $(E,+,\bullet)$ فضاء متجهي حقيقي لدينا الخاصيات التالية

1	$\vec{a}+\vec{x}=\vec{b}\Leftrightarrow\vec{x}=\vec{b}+(-\vec{a})$ المتجهة $\vec{b}+(-\vec{a})$ تسمى فرق المتجهتين $\vec{a}$ و $\vec{b}$ وتكتب كذلك $\vec{b}-\vec{a}$
2	$\alpha\vec{x}=\vec{0}\Leftrightarrow\alpha=0$ أو $\vec{x}=\vec{0} \qquad (\alpha\in IR)(\forall x\in E)$
3	$(-\alpha)\vec{x}=\alpha(-\vec{x})=-(\alpha\vec{x}) \qquad (\alpha\in IR)(\forall x\in E)$
4	$\alpha(\vec{y}-\vec{x})=\alpha\vec{y}-\alpha\vec{x} \qquad (\alpha\in IR)(\forall(\vec{x},\vec{y})\in E^2)$
5	$(\alpha-\beta)\vec{x}=\alpha\vec{x}-\beta\vec{y} \qquad (\forall(\alpha,\beta)\in IR^2)(\forall\vec{x}\in E)$

c – أمثلة و تمارين تطبيقية : (أنظر سلسلة التمارين)

II – الفضاء المتجهي الجزئي :

1 – تعريف :

ليكن $(E,+,\times)$ فضاء متجهي حقيقي و F جزء غير فارغ من E
نقول أن F فضاء متجهي جزئي من الفضاء E إذا وفقط إذا تحقق ما يلي :
$1-$ F مستقر بالنسبة للقانون الداخلي + أي : $\vec{x}+\vec{y}\in F \qquad (\forall(\vec{x},\vec{y})\in F^2)$
$2-$ F مستقر بالنسبة للقانون الخارجي × أي : $\lambda\vec{x}\in F \qquad (\forall\vec{x}\in F)(\forall\lambda\in IR)$

بتعبير أخر :

F فضاء متجهيا جزئيا من E $\Leftrightarrow \begin{cases} F\neq\varnothing \\ F\subset E \\ (\forall(\vec{x},\vec{y})\in F^2) \quad \vec{x}+\vec{y}\in F \\ (\forall\lambda\in IR)(\forall x\in F) \quad \lambda\vec{x}\in F \end{cases}$

2 – أمثلة :

1	$\{\vec{0}\}$ و E فضائين متجهيين جزئيين من الفضاء المتجهي $(E,+,\times)$
2	P_n مجموعة الحدوديات التي درجتها أصغر من تساوي n فضاء متجهي جزئي من الفضاء المتجهي

$\left(F\left(IR,IR\right),+,\times\right)$	
$\left\{(x,y)\in IR^2 \;/ y=2x\right\}$ فضاء متجهي جزئي من الفضاء المتجهي $\left(\mathrm{IR}^2,+,\times\right)$ (تحقق من ذلك)	3

3 – الخاصية المميزة لفضاء متجهي جزئي :

ليكن $(E,+,\times)$ فضاء متجهي حقيقي و F جزء من E

F فضاء متجهيا جزئيا من E $\Leftrightarrow$	$\begin{cases} F\neq\varnothing \\ \left(\forall(\lambda,\beta)\in IR^2\right)\left(\forall(\vec{x},\vec{y})\in F^2\right) \quad \beta\vec{x}+\lambda\vec{y}\in F \end{cases}$

III – التأليفات الخطية :

1 – تعريف :

لتكن $\vec{x}_1$ و $\vec{x}_2$ و $\cdots$ و $\vec{x}_n$ متجهات من الفضاء المتجهي E و α_1 و α_2 و $\cdots$ و α_n أعدادا حقيقية .

المتجهة $\vec{x}=\sum_{i=1}^{n}\alpha_i\vec{x}_i$ تسمى تأليفة خطية للمتجهات $\vec{x}_1$ و $\vec{x}_2$ و $\cdots$ و $\vec{x}_n$ ذات المعاملات α_1 و α_2 و $\cdots$ و α_n

ونقول كذلك أن الأسرة $B=\left(\vec{x}_1,\vec{x}_2,\dots,\vec{x}_n\right)$ تولد المتجهة $\vec{x}$ أو المتجهة $\vec{x}$ مولدة بالأسرة $B=\left(\vec{x}_1,\vec{x}_2,\dots,\vec{x}_n\right)$

و نقول عن أسرة $B=\left(\vec{x}_1,\vec{x}_2,\dots,\vec{x}_n\right)$ أنها تولد الفضاء المتجهي E إ وفقط إذا كانت كل متجهة $\vec{x}$ من E تكتب على شكل تأليفة خطية للمتجهات $\vec{x}_1$ و $\vec{x}_2$ و $\cdots$ و $\vec{x}_n$

بتعبير اخر:

$\vec{x}$ مولدة بالأسرة $B=\left(\vec{x}_1,\vec{x}_2,\dots,\vec{x}_n\right) \Leftrightarrow \left(\exists(\alpha_1,\alpha_2,\dots,\alpha_n)\in IR^n\right) \Big/ \vec{x}=\sum_{i=1}^{n}\alpha_i\vec{x}_i$

الفضاء E مولد بالأسرة $B=\left(\vec{x}_1,\vec{x}_2,\dots,\vec{x}_n\right) \Leftrightarrow \left(\forall\vec{x}\in E\right)\left(\exists(\alpha_1,\alpha_2,\dots,\alpha_n)\in IR^n\right) \Big/ \vec{x}=\sum_{i=1}^{n}\alpha_i\vec{x}_i$

2 – تمرين تطبيقي:

نعتبر المجموعة E المعرفة بالصيغة التالية : $E=\left\{(x,y,z)\in IR^3 / x-y+3z=0\right\}$

1 – بين أن $(E,+,\bullet)$ فضاء متجهي حقيقي

2 – لتكن $\vec{e}_1=(1,1,0)$ و $\vec{e}_2=(0,3,1)$ متجهتين من E

بين أن الأسرة $(\vec{e}_1,\vec{e}_2)$ تولد الفضاء المتجهي $(E,+,\bullet)$

3 – الارتباط و الاستقلال الخطي:

a – تعريف

لتكن $B=\left(\vec{x}_1,\vec{x}_2,\dots,\vec{x}_n\right)$ أسرة من متجهات الفضاء المتجهي $(E,+,\bullet)$

نقول أن:

الأسرة B مرتبطة خطيا أو مقيدة

$\Leftrightarrow \left(\exists(\alpha_1,\alpha_2,\dots,\alpha_n)\in IR^n\right) \Big/ (\alpha_1,\alpha_2,\dots,\alpha_n)\neq(0,0,\dots,0)$ و $\sum_{i=1}^{n}\alpha_i x_i = o$

الأسرة B مستقلة خطيا أو حرة $\Leftrightarrow \left(\forall(\alpha_1,\alpha_2,\dots,\alpha_n)\in IR^n\ ;\ \sum_{i=1}^{n}\alpha_i x_i=0\Rightarrow \alpha_1=\alpha_1=\cdots=\alpha_n=0\right)$

b – مثال :

في الفضاء المتجهي $\left(M_2(IR),+,\bullet\right)$ نعتبر الأسرتين $B_1=(L,J)$ و $B_2=(L,J,K)$ بحيث :

$$L=\begin{pmatrix}1&0\\0&2\end{pmatrix} \text{ و } J=\begin{pmatrix}0&2\\1&0\end{pmatrix} \text{ و } K=\begin{pmatrix}2&6\\3&4\end{pmatrix}$$

لدينا : $2L+3J=2\begin{pmatrix}1&0\\0&2\end{pmatrix}+3\begin{pmatrix}0&2\\1&0\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}2&0\\0&4\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}0&6\\3&0\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}2&6\\3&4\end{pmatrix}=K$

إذن : $2L+3J-K=0$

ومنه ألأسرة $B_2=(L,J,K)$ مقيدة لأن : $2L+3J-K=0$ و $(2,3,-1)\neq(0,0,0)$

من جهة أخرى لدينا :

$$\alpha L+\beta J=0\Rightarrow\begin{pmatrix}\alpha&0\\0&2\alpha\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}0&2\beta\\\beta&0\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0&0\\0&0\end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow\begin{pmatrix}\alpha&2\alpha\\\beta&2\beta\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0&0\\0&0\end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow\alpha=\beta=0$$

إذن الأسرة $B_1=(L,J)$ حرة

c – خاصيات :

إذا كانت B أسرة مقيدة فإن كل أسرة تتضمنB تكون كذلك مقيدة

إذا كانتB أسرة ضمن أسرة حرة فإن B تكون كذلك حرة

بتعبير أخر :

B أسرة مقيدة و $B\subset B'$ $\Leftarrow$ B' أسرة مقيدة
B أسرة حرة و $B'\subset B$ $\Leftarrow$ B' أسرة حرة

1 – إذا كانت في أسرة B متجهتان متساويتان فإن B تكون مقيدة
2 – إذا كانت أحدى متجهات أسرة B على شكل تأليفة خطية للعناصر الأخرى فإن B تكون مقيدة
3– إذا كانت أسرة Bحرة فإن جميع عناصرها غير منعدمة و مختلفة مثنى مثنى

4 – أساس فضاء متجهي حقيقي:

a – تعريف :

ليكن $(E,+,\bullet)$ فضاء متجهي حقيقي

نقول أن أسرة $B=(\vec{x}_1,\vec{x}_2,\dots,\vec{x}_n)$ من متجهات E أساس للفضاء المتجهي $(E,+,\bullet)$ إذا وفقط إذا كانت كل متجهة من E تكتب بكيفية **وحيدة** على شكل تأليفة خطية لمتجهات الأسرة B

بتعبير أخر :

$B=(\vec{x}_1,\vec{x}_2,\dots,\vec{x}_n)$ أساس للفضاء E $\Leftrightarrow (\forall\vec{x}\in E)\left(\exists!(\alpha_1,\alpha_2,\dots,\alpha_n)\in IR^n\right)\big/\ \vec{x}=\sum_{i=1}^{n}\alpha_i x_i$

الأعداد الحقيقية α_1 و α_2 و $\cdots$ و α_n تسمى إحداثيات المتجهة $\vec{x}$ بالنسبة للأساس $B=(\vec{x}_1,\vec{x}_2,\dots,\vec{x}_n)$

b – مثال :

في $(IR^3,+,\bullet)$ نعتبر المتجهات التالية : $\vec{e}_1=(1,0,0)$ و $\vec{e}_2=(0,1,0)$ و $\vec{e}_3=(0,0,1)$

لنبين أن الأسرة $B=(\vec{e}_1,\vec{e}_2,\vec{e}_3)$ أساس للفضاء المتجهي $(IR^3,+,\bullet)$

لتكن $\vec{x}=(a,b,c)\in IR^3$

$$\vec{x}=(a,b,c)=(a,0,0)+(0,b,0)+(0,0,c)$$

لدينا : $=a(1,0,0)+b(0,1,0)+c(0,0,1)$

$$=a\vec{e}_1+b\vec{e}_2+c\vec{e}_3$$

نفترض أنه توجد أعداد حقيقية أخرى a' و b' و c' بحيث : $\vec{x}=a'\vec{e}_1+b'\vec{e}_2+c'\vec{e}_3$

لدينا إذن $a\vec{e}_1+b\vec{e}_2+c\vec{e}_3=a'\vec{e}_1+b'\vec{e}_2+c'\vec{e}_3 \Rightarrow (a-a')\vec{e}_1+(b-b')\vec{e}_2+(c-c')\vec{e}_3=(0,0,0)$

ومنه: $(a-a')(1,0,0)+(b-b')(0,1,0)+(c-c')(0,0,1)=(0,0,0)$

$$\Rightarrow (a-a',0,0)+(0,b-b',0)+(0,0,c-c')=(0,0,0)$$

$$\Rightarrow (a-a',b-b',c-c')=(0,0,0)$$

$\Rightarrow a=a'$ و $b=b'$ و $c=c'$

إذن كل متجهة من $(IR^3,+,\bullet)$ تكتب بكيفية ***وحيدة*** على شكل تأليفة خطية لمتجهات الأسرة $B=(\vec{e}_1,\vec{e}_2,\vec{e}_3)$

و بالتالي $B=(\vec{e}_1,\vec{e}_2,\vec{e}_3)$ أساس للفضاء المتجهي $(IR^3,+,\bullet)$

c – خاصيات :

ليكن $(E,+,\bullet)$ فضاء متجهي حقيقي

1	$B=(\vec{x}_1,\vec{x}_2,\dots,\vec{x}_n)$ أساس للفضاء E $\Leftrightarrow$ B أسرة مولدة وحرة للفضاء المتجهي E عدد متجهات الأساس B يسمى بعد الفضاء التجهي E ونرمز له ب $\dim E$ ($\dim E=card(B)$)
2	إذا كانت α_1 و α_2 و $\cdots$ و α_n إحداثيات متجهة $\vec{x}$ و β_1 و β_2 و $\cdots$ و β_n إحداثيات متجهة $\vec{y}$ فإن $\alpha_1+\beta_1$ و $\alpha_2+\beta_2$ و $\cdots$ و $\alpha_n+\beta_n$ إحداثيات المتجهة $(\vec{x}+\vec{y})$
3	إذا كانت α_1 و α_2 و $\cdots$ و α_n إحداثيات متجهة $\vec{x}$ فإن إحداثيات المتجهة $\lambda\vec{x}$ هي : $\lambda\alpha_1$ و $\lambda\alpha_2$ و $\cdots$ و $\lambda\alpha_n$
4	جميع أساسات E مكونة من n متجهة $\Rightarrow \dim E=n$
5	$(\vec{e}_1,\vec{e}_2)$ أساس للفضاء E ($\dim E=2$) $(\vec{e}_1,\vec{e}_2)$ $\Leftrightarrow$ حرة $\Leftrightarrow \det(\vec{e}_1,\vec{e}_2)\neq 0$
6	$(\vec{e}_1,\vec{e}_2,\vec{e}_3)$ أساس للفضاء E ($\dim E=3$) $(\vec{e}_1,\vec{e}_2,\vec{e}_3)$ $\Leftrightarrow$ حرة $\Leftrightarrow \det(\vec{e}_1,\vec{e}_2,\vec{e}_3)\neq 0$
7	B و B' أساسين للفضاء E $\Rightarrow card(B)=card(B')$