

Notas de Clase en

Teoría Clásica de Campos

Borja Diez
borjadiez1014@gmail.com

Índice

| | |
|---|-----------|
| 1. Clase 1 | 3 |
| 1.1. Mecánica de Newton | 3 |
| 1.2. Acerca de la matriz Hessiana de las ecuaciones de Euler-Lagrange | 3 |
| 2. Clase 2 | 3 |
| 2.1. Acerca de la matriz Hessiana | 4 |
| 2.2. Formalismo de Hamilton | 5 |
| 2.3. *Transformaciones canónicas | 6 |
| 3. Clase 3 | 6 |
| 3.1. Simetrías y leyes de conservación | 6 |
| 4. Clase 4 | 8 |
| 4.1. Teorema de Noether | 8 |
| 4.2. Transformaciones de simetría | 9 |
| 5. Clase 5 | 11 |
| 5.1. Relación entre y | 11 |
| 5.2. Prueba del teorema de Noether | 12 |
| 6. Clase 6 | 15 |
| 6.1. Continuación prueba del teorema de Noether | 15 |
| 6.2. Grupos y álgebras de Lie | 18 |
| 7. Clase 7 | 19 |
| 7.1. Espacio lineal o espacio vectorial | 20 |
| 7.2. Álgebra y álgebra de Lie | 20 |
| 7.3. Grupos, álgebras y simetrías | 21 |
| 8. Clase 8 | 23 |
| 8.1. Generadores de grupos de Lie | 23 |
| 8.2. Grupos matriciales | 28 |
| 9. Clase 9 | 28 |
| 9.1. Ejemplo: Generadores y álgebra de $SO(3)$ | 29 |

1. Clase 1

1.1. Mecánica de Newton

Posición, velocidad, aceleración, fuerza.

Si consideramos un sistema de partículas de masa m

$$\vec{p}_\alpha = m_\alpha \vec{x}_\alpha, \quad \vec{p} = \sum_\alpha \vec{p}_\alpha, \quad \alpha = 1, \dots, k \quad (1.1)$$

$$T = \frac{1}{2} \sum_\alpha m_\alpha \dot{x}_\alpha^2, \quad \vec{L} = \sum_\alpha \vec{x}_\alpha \times \vec{p}_\alpha \quad (1.2)$$

Newton estableció que a dinámica de un sistema mecánico queda determinada por tres leyes fundamentales.

1.2. Acerca de la matriz Hessiana de las ecuaciones de Euler-Lagrange

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L'}{\partial \dot{q}'_k} = \frac{\partial L'}{\partial q'_k} - [L]_k \frac{\partial q_l}{\partial \dot{q}'_k} \quad (1.3)$$

$$\Rightarrow \frac{\partial L'}{\partial q'_k} = \frac{d}{dt} \frac{\partial L'}{\partial \dot{q}'_k} = [L]_l \frac{\partial q_l}{\partial \dot{q}'_k} \quad (1.4)$$

$$\boxed{[L']_k = [L]_l \frac{\partial q_l}{\partial \dot{q}'_k}} \quad (1.5)$$

La derivada de Euler-Lagrange transforma como un vector covariante bajo una transformación de coordenadas

$$\text{Si } [L]_l = 0 \Rightarrow [L']_k = 0 \quad (1.6)$$

2. Clase 2

1. Las ecuaciones de Newton son invariantes en forma bajo las transformaciones de Galileo.
2. Las ecuaciones de Newton son ecuaciones de segundo orden en \mathbf{x}_α . Es bueno recalcar que *todas las ecuaciones dinámicas de la física fundamental son de segundo orden*. Las ecuaciones de orden mayor al segundo, tienden a tener inestabilidades [1].
3. Si $L = L(q_i, \dot{q}_i, t)$ es la función de Lagrange para un sistema mecánico, entonces la dinámica del sistema es gobernada por las ecuaciones de Euler-Lagrange,

$$[L]_i = \frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} = 0 \quad (2.1)$$

Estas ecuaciones no cambian si la función de Lagrange es modificada a la forma

$$\tilde{L} = L + \frac{d}{dt} B(q, t) \quad (2.2)$$

con $L = L(q_i, \dot{q}_i, t)$ y $\tilde{L} = \tilde{L}(q_i, \dot{q}_i, t)$

4. La libertad en la elección de las coordenadas generalizadas implica que las ecuaciones de Euler-Lagrange son estructuralmente invariantes bajo un cambio de coordenadas:

$$q_i \rightarrow q'_i = q'_i(q_l) \quad (2.3)$$

lo cual implica que

$$\boxed{[L']_k = [L]_l \frac{\partial q_l}{\partial q'_k}} \quad (2.4)$$

que muestra que la derivada de Euler transforma como un vector covariante bajo la transformación 2.3

$$\text{Si } [L]_l = 0 \Rightarrow [L']_k = 0. \quad (2.5)$$

Es importante recalcar que la invariancia estructural es distinto a la invariancia en forma (covariancia).

Todos los observadores observan la misma forma de las ecuaciones de los modelos de la naturaleza.

Ejemplo 2.1. La ecuación de Newton en el SRI K toma la forma $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ mientras que en el SRI K' toma la forma $\mathbf{F}' = m'\mathbf{a}'$.

Ejemplo 2.2. Las ecuaciones de Maxwell tendrán la misma forma en todos los SRI.

Notemos son embargo, que en la mecánica de Newton las transformaciones son las transformaciones de Galileo y que en la electrodinámica de Maxwell son las transformaciones de Lorentz.

La covariancia de las ecuaciones del movimiento bajo una transformación de coordenadas es la propiedad que define una **simetría de Lie**.

2.1. Acerca de la matriz Hessiana

Una característica básica de las ecuaciones de Newton $m\ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{F}(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, t)$ es que es posible expresar la aceleración $\ddot{\mathbf{r}}$ en función de la posición \mathbf{r} , de la velocidad $\dot{\mathbf{r}}$ y de t ,

$$\ddot{\mathbf{r}}(t) = \frac{1}{m} \mathbf{F}(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}(t)) \quad (2.6)$$

Esta es una formulación vectorial de la mecánica es basada en el concepto d partícula material. Esto llevó a pensar que la naturaleza podría no ser continua, sino que podría ser atómica (cuántica). Esto condujo a la formulación escalar de la mecánica representado de la introducción del concepto de energía.

La formulación de Lagrange y de Hamilton fue el resultado de esta búsqueda. Sin embargo, de las ecuaciones de Euler-Lagrange (2.1) no es evidente cómo expresar la aceleración $\ddot{q}(t)$ en función de $q(t)$, $\dot{q}(t)$ y t .

Consideremos

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_n}, \quad L = L(q_n, \dot{q}_n, t) \quad (2.7)$$

notemos que

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_n} = \frac{\partial^2 L}{\partial \dot{q}_n \partial \dot{q}_m} \ddot{q}^m + \frac{\partial^2 L}{\partial \dot{q}_n \partial q_m} \dot{q}^m \quad (2.8)$$

luego

$$[L]_n = \frac{\partial L}{\partial q_n} - \frac{\partial^2 L}{\partial \dot{q}_n \partial q_m} \dot{q}^m - \frac{\partial^2 L}{\partial \dot{q}_n \partial \dot{q}_m} \ddot{q}^m = 0 \quad (2.9)$$

así

$$\boxed{\left(\frac{\partial^2 L}{\partial \dot{q}_n \partial \dot{q}_m} \right) \ddot{q}^m = \frac{\partial L}{\partial q_n} - \frac{\partial^2 L}{\partial \dot{q}_n \partial q_m} \dot{q}^m} \quad (2.10)$$

Notemos que para poder expresar \ddot{q} como función de q y \dot{q} es necesario que la matriz $W_{nm} = \partial^2 L / \partial \dot{q}_n \partial \dot{q}_m$ sea invertible, es decir, $\det W_{nm} \neq 0$.

Llamando

$$V_n = \frac{\partial L}{\partial q_n} - \frac{\partial^2 L}{\partial \dot{q}_n \partial q_m} \dot{q}^m \quad (2.11)$$

tenemos

$$W_{nm} \ddot{q}^m - V_n = 0 \quad (2.12)$$

Si $\det W_{nm} \neq 0$ entonces existe una matriz inversa $W^{kn} \equiv (W_{kn})^{-1}$ tal que $W^{kn} W_{nm} = \delta_m^k$. Luego, multiplicando (2.12) por W^{km} , tenemos

$$W^{kn} W_{nm} \ddot{q}^m - W^{kn} V_n = 0 \quad (2.13)$$

$$\Rightarrow \ddot{q}^k = W^{kn} V_n = F(q, \dot{q}, t) \quad (2.14)$$

En la física fundamental, las teorías de gauge tales como la teoría electromagnética o las teorías de Yang-Mills (teoría electrodébil, cromodinámica cuántica), las correspondientes funciones de Lagrange tienen sus matrices Hessianas singulares, es decir, $\det W_{nm} \neq 0$.

2.2. Formalismo de Hamilton

Consiste en pasarse de las coordenadas $\{q_i, \dot{q}_i, t\}$ a $\{q_i, p_i, t\}$, donde

$$p_i = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} = f_i(q_i, \dot{q}_i, t) \quad (2.15)$$

es el momentum generalizado.

Para escribir explícitamente la función de Hamilton es necesario expresar por medio de (2.15) $\dot{q}_i = \tilde{f}(q_i, p_i)$. Esto implica que la función f_i sea invertible,

$$\dot{q}_n \rightarrow p_n = f_n(q_m, \dot{q}_m, t) \quad (2.16)$$

es decir, tenemos una transformación de coordenadas. Esta transformación tiene como matriz Jacobiana a

$$J_{nm} = \frac{\partial f_n}{\partial \dot{q}_m} = \frac{\partial p_n}{\partial \dot{q}_m} = \frac{\partial}{\partial \dot{q}_m} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_n} \right) \quad (2.17)$$

esto es

$$\boxed{J_{nm} = \frac{\partial^2 L}{\partial \dot{q}_n \partial \dot{q}_m} \equiv W_{nm}} \quad (2.18)$$

Para clarificar esto calculemos dp_n recordando que $p_n = f_n(q_m, \dot{q}_m, t)$,

$$dp_n = \frac{\partial f_n}{\partial t} dt + \frac{\partial f_n}{\partial q_m} dq_m + \frac{\partial f_n}{\partial \dot{q}_m} d\dot{q}_m \quad (2.19)$$

$$= \frac{\partial f_n}{\partial t} dt + \frac{\partial f_n}{\partial q_m} dq_m + \frac{\partial^2 L}{\partial \dot{q}_n \partial q_m} d\dot{q}_m \quad (2.20)$$

esto implica que

$$\left(\frac{\partial^2 L}{\partial \dot{q}_n \partial q_m} \right) d\dot{q}_m = dp_n - \frac{\partial p_n}{\partial t} dt - \frac{\partial p_n}{\partial q_m} dq_m \quad (2.21)$$

De aquí vemos que para expresar $\dot{q} = \bar{f}(q, p, t)$ es necesario que

$$\det W_{nm} = \det \left(\frac{\partial^2 L}{\partial \dot{q}_n \partial q_m} \right) \neq 0 \quad (2.22)$$

2.3. *Transformaciones canónicas

Son transformaciones invertibles de la forma (Ref. [2]) ¹

$$\hat{q}^j = \hat{q}^j(q, p), \quad \hat{p}^j = \hat{p}^j(q, p) \quad (2.23)$$

que dejan los corchetes fundamentales invariantes.

Antes de continuar, introduzcamos una notación más compacta en la cual colectamos las $2N$ variables del espacio de fase en un único conjunto $(x^\alpha) = (q^1, \dots, q^N, p_1, \dots, p_N)$. En esta notación los corchetes fundamentales pueden ser escritos como

$$\{x^\alpha, x^\beta\} = \Gamma^{\alpha\beta}, \quad \text{con} \quad \Gamma \equiv \begin{pmatrix} 0_N & 1_N \\ -1_N & 0_N \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

en términos de la matriz Γ , el corchete de Poisson para dos funciones del espacio de fase A y B queda

$$\{A, B\} = \Gamma^{\alpha\beta} \frac{\partial A}{\partial x^\alpha} \frac{\partial B}{\partial x^\beta} \quad (2.25)$$

La condición para que $\hat{x}(x)$ sea una transformación canónica se simplifica a $\{\hat{x}^\alpha, \hat{x}^\beta\} = \Gamma^{\alpha\beta}$

3. Clase 3

3.1. Simetrías y leyes de conservación

La homogeneidad del tiempo nos lleva a la conservación de la energía. Que el tiempo sea homogéneo significa que no hay instantes privilegiados. Los resultados de un experimento nno dependen del instantes en que se lleven a cabo, es decir, si llevamos a cabo un experimento para $t = t$ será también el mismo en $t' = t + t_0$. La función de Lagrange (que describe un sistema físico) debe ser invariante bajo un desplazamiento temporal, es decir, $L = L(q_i, \dot{q}_i, t)$

¹Ver también el libro Arnold. y [3]

es invariante bajo la transformación $t \rightarrow t' = t + t_o$ o $\delta t = t' - t = t_o$. Esto se cumplirá sólo si $L = L(q_i, \dot{q}_i, t)$ no depende explicitamente del tiempo, es decir,

$$\frac{\partial L}{\partial t} = 0 \quad (3.1)$$

Así,

$$\frac{dL}{dt} = \frac{\partial L}{\partial q_i} \dot{q}_i + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \ddot{q}_i \quad (3.2)$$

De la derivada de Euler-Lagrange, sabemos

$$[L]_i = \frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \Rightarrow \frac{\partial L}{\partial q_i} = [L]_i + \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \quad (3.3)$$

Reemplazando en (3.2)

$$\frac{dL}{dt} = \left([L]_i + \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) \dot{q}_i + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \ddot{q}_i \quad (3.4)$$

$$= [L]_i \dot{q}_i + \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \dot{q}_i + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \ddot{q}_i \quad (3.5)$$

de donde se obtiene

$$[L]_i \dot{q}_i = \frac{dL}{dt} - \frac{d}{dt} \dot{q}_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \quad (3.6)$$

$$= -\frac{d}{dt} \left(\dot{q}_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - L \right) \quad (3.7)$$

Para trayectorias on-shell, es decir, para el espacio de soluciones de la ecuación de Euler-Lagrange $[L]_i = 0$, se tiene

$$\frac{d}{dt} \left(\dot{q}_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - L \right) = 0 \quad (3.8)$$

Pero sabemos que la función de Hamilton es dada por

$$H = \dot{q}_i p_i - L = E \quad (3.9)$$

Luego,

$$\frac{dH}{dt} = \frac{dE}{dt} = 0 \quad (3.10)$$

es decir, **la homogeneidad del tiempo implica la conservación de la energía.**

Por otra parte, la homogeneidad del espacio conduce a la conservación del momentum lineal. Que el espacio sea homogéneo nos dice que todos los puntos son equivalentes y no hay posiciones privilegiadas en el espacio. Esto implica que la función de Lagrange $L = L(q_i, \dot{q}_i, t)$ debe ser invariante bajo una traslación espacial de la forma

$$q_i \rightarrow q'_i = q_i + a_i \quad \text{ó} \quad \delta q_i = q'_i - q_i = a_i \quad (3.11)$$

Así

$$\delta_q L = \frac{\partial L}{\partial q_i} \delta q_i = 0 \quad (3.12)$$

4. Clase 4

4.1. Teorema de Noether

Teorema 4.1. Si las ecuaciones del movimiento son invariantes bajo una transformación de coordenadas tales como

$$t \rightarrow t' = t'(t) \quad (4.1)$$

$$q_i \rightarrow q'_i = q'_i(q_j, t) \quad (4.2)$$

entonces existe una cantidad conservada.

Análisis y prueba

Sea $L = L(q_i, \dot{q}_i, t)$ la función de Lagrange de un sistema mecánico, donde $i = 1, 2, \dots, f$. q_i son las coordenadas del espacio de configuraciones. Sean q'_i y t' nuevas coordenadas relacionadas a las antiguas por medio de la transformación de coordenadas invertibles

$$t \rightarrow t' = t'(t) = t + \delta t \quad (4.3)$$

$$q_i \rightarrow q'_i = q'_i(q_i, t) = q_i + \delta q_i \quad (4.4)$$

Las correspondientes velocidades generalizadas \dot{q}_i y \dot{q}'_i definidas como

$$\dot{q}_i = \frac{d}{dt} q_i, \quad \dot{q}'_i = \frac{d}{dt'} q'_i \quad (4.5)$$

$$\Rightarrow \dot{q}'_i = \frac{d}{dt} q'_i \frac{dt}{dt'} = \frac{d}{dt} (q_i + \delta q_i) \frac{dt}{dt'} \quad (4.6)$$

$$\Rightarrow \dot{q}'_i = \left(\dot{q}_i + \frac{d\delta q_i}{dt} \right) \frac{dt}{dt'} \quad (4.7)$$

pero,

$$t' = t + \delta t \Rightarrow \frac{dt'}{dt} = 1 + \frac{d\delta t}{dt} \quad (4.8)$$

$$\Rightarrow \frac{dt}{dt'} = \frac{1}{1 + d\delta t/dt} \quad (4.9)$$

Así,

$$\dot{q}'_i = \left(\dot{q}_i + \frac{d\delta q_i}{dt} \right) \frac{1}{1 + d\delta t/dt} \quad (4.10)$$

$$\Rightarrow \boxed{\dot{q}'_i = \frac{\dot{q}_i + d\delta q_i/dt}{1 + d\delta t/dt}} \quad (4.11)$$

$$\delta \dot{q}_i = \dot{q}'_i(t') - \dot{q}_i(t) \quad (4.12)$$

$$= \frac{d}{dt'} \dot{q}'_i(t') - \dot{q}_i(t) \quad (4.13)$$

$$= \frac{d}{dt} \dot{q}'_i(t') \frac{dt}{dt'} - \dot{q}_i(t) \quad (4.14)$$

$$= \frac{d}{dt} (\dot{q}_i + \delta q_i) \frac{dt}{dt'} - \dot{q}_i(t) \quad (4.15)$$

$$= \left(\dot{q}_i + \frac{d\delta q_i}{dt} \right) \frac{dt}{dt'} - \dot{q}_i(t) \quad (4.16)$$

pero

$$\frac{dt}{dt'} = \frac{1}{1 + d\delta t/dt} = 1 - \frac{d\delta t}{dt} + \dots \quad (4.17)$$

$$\delta \dot{q}_i = \left(\dot{q}_i + \frac{d\delta q_i}{dt} \right) \left(1 - \frac{d\delta t}{dt} \right) - \dot{q}_i \quad (4.18)$$

$$= \dot{q}_i + \frac{d\delta q_i}{dt} - \dot{q}_i \frac{d\delta t}{dt} - \frac{d\delta q_i}{dt} \frac{d\delta t}{dt} - \dot{q}_i \quad (4.19)$$

$$\implies \boxed{\delta \dot{q}_i = \frac{d}{dt} \delta q_i - \dot{q}_i \frac{d\delta t}{dt}} \quad (4.20)$$

4.2. Transformaciones de simetría

Sabemos que las ecuaciones de Euler-Lagrange se obtienen al aplicar el principio de Hamilton a la acción

$$S(q_i, \dot{q}_i, t) = \int_{t_q}^{t_2} dt L(q_i, \dot{q}_i, t) \quad (4.21)$$

Sean ahora q'_i y t' otro sistema coordenado relacionado con q_i y t por medio de la transformación

$$q_i \rightarrow q'_i = q'_i(q_i, t) \quad (4.22)$$

$$t \rightarrow t' = t'(t) \implies t = t(t') \quad (4.23)$$

Escribimos (4.21) en términos de las nuevas coordenadas

$$dt = \frac{dt}{dt'} dt', \quad q_i = q_i(q'_i, t') \quad (4.24)$$

luego,

$$S(q_i, \dot{q}_i, t) = \int_{t_1'=t'(t_1)}^{t_2'=t'(t_2)} dt' \frac{dt}{dt'} L[q_i(q', t), \dot{q}_i(q, \dot{q}', t'), t(t')] \quad (4.25)$$

Por otro lado la acción $S'(q', \dot{q}', t')$ es dada por

$$S'(q', \dot{q}', t') = \int_{t'_1}^{t'_2} dt' L'(q'_i, \dot{q}'_i, t') \quad (4.26)$$

Dado que la física no puede ser alterada por un cambio de coordenadas, tenemos

$$S'(q', \dot{q}', t') = S(q, \dot{q}, t) \quad (4.27)$$

$$\int_{t_1'}^{t_2'} dt' L'(q', \dot{q}', t') = \int_{t_1}^{t_2} dt \frac{dt}{dt'} L[q_i(q', t), \dot{q}_i(q, \dot{q}', t'), t(t')] \quad (4.28)$$

$$\implies L'(q', \dot{q}', t') = L[q_i(q', t), \dot{q}_i(q, \dot{q}', t'), t(t')] \frac{dt}{dt'} \quad (4.29)$$

Una transformación de coordenadas que deja invariante en forma a las EOM es llamada una transformación de simetría.

Por lo tanto, si q son las coordenadas de un sistema físico descrito por las EOM,

$$\ddot{q} = G(q, \dot{q}, t) \quad (4.30)$$

entonces

$$t' = t'(t) \quad (4.31)$$

$$q' = q'(q, t) \quad (4.32)$$

será una transformación de simetría si las EOM transformadas es dada por

$$\boxed{\ddot{q}' = G(q', \dot{q}', t')} \quad (4.33)$$

Teorema 4.2. Si las EOM expresadas en términos de las nuevas variables tiene exactamente la misma forma funcional que las EOM expresadas en las variables antiguas y si ellas deben ser obtenidas a partir del principio de Hamilton, entonces las respectivas funciones de Lagrange deben diferir a lo más en una derivada total.

$$L'(q', \dot{q}', t') = L(q', \dot{q}', t') + \frac{d}{dt'} \Omega(q', t') \quad (4.34)$$

Prueba

Dado que las EOM se obtienen a partir del principio de Hamilton

$$\delta S = \delta \int_{t_1}^{t_2} dt L(q, \dot{q}, t) = 0 \quad (4.35)$$

$$\implies \delta \int_{(q_1', t_1')}^{(q_2', t_2')} dt' L'(q', \dot{q}', t') = \delta \int_{(q_1', t_1')}^{(q_2', t_2')} dt' L(q', \dot{q}', t') + \delta \int_{(q_1', t_1')}^{(q_2', t_2')} dt' \frac{d}{dt'} \Omega(q', t') \quad (4.36)$$

Dado que (4.27) es válida, tenemos

$$\int_{(q_1', t_1')}^{(q_2', t_2')} dt' L'(q', \dot{q}', t') = \delta \int_{(q_1', t_1')}^{(q_2', t_2')} dt L(q, \dot{q}, t) \quad (4.37)$$

$$\Rightarrow \delta \int_{(q'_1, t'_1)}^{(q'_2, t'_2)} L(q, \dot{q}, t) = \delta \int_{(q'_1, t'_1)}^{(q'_2, t'_2)} dt' L(q, \dot{q}', t') + \cancel{\delta \Omega(q', t') \Big|_{(q'_1, t'_1)}^{(q'_2, t'_2)}} \quad (4.38)$$

el último término se cancela debido a que los puntos extremos son fijos,

$$\Rightarrow \delta \int_{(q'_1, t'_1)}^{(q'_2, t'_2)} dt L(q, \dot{q}, t) = \delta \int_{(q'_1, t'_1)}^{(q'_2, t'_2)} dt' L(q', \dot{q}', t') \quad (4.39)$$

Si queremos tener una simetría, entonces debemos imponer dos condiciones

1. $L'(q', \dot{q}', t') = L(q, \dot{q}, t) + \frac{d}{dt'} \Omega(q', t')$
2. $S'(q', \dot{q}', t') = S(q, \dot{q}, t)$

Estas dos condiciones son el punto de partida para probar el teorema de Noether².

5. Clase 5

Distinguiamos entre dos tipos de variaciones. La primera es la **variación** δ la cual compara dos coordenadas distintas en tiempos distintos. Es decir, compara las coordenadas q y q' en los tiempos t y t' ,

$$\delta q = q'(t') - q(t), \quad t' = t + \delta t \quad (5.1)$$

$$q'(t') = q(t) + \delta t \quad (5.2)$$

Por otro lado la **variación** $\bar{\delta}$ compara dos coordenadas distintas en el mismo instante. Es decir, compara las coordenadas q y q' en el mismo instante,

$$\bar{\delta} q = q'(t) - q(t) \quad (5.3)$$

$$q'(t) = q(t) + \bar{\delta} q \quad (5.4)$$

5.1. Relación entre y

$$\bar{\delta} q = q'(t) - q(t) + q'(t') - q'(t') \quad (5.5)$$

$$= (q'(t') - q(t)) + q'(t) - q'(t') \quad (5.6)$$

$$\Rightarrow \bar{\delta} q = \delta q - [q'(t') - q'(t)] \quad (5.7)$$

Pero

$$q'(t') = q'(t + \delta t) = q'(t) + \delta t \frac{dq'(t)}{dt} \quad (5.8)$$

$$\Rightarrow q'(t') - q'(t) = \delta t \frac{d}{dt} (q(t) + \bar{\delta} q) \quad (5.9)$$

$$= \delta t \frac{d}{dt} q(t) + \cancel{\delta t \frac{d}{dt} \bar{\delta} q} \quad (5.10)$$

²https://es.wikipedia.org/wiki/Emmy_Noether

el ultimo término es despreciable por que es de segundo orden.

$$\implies q'(t') - q'(t) = \delta t \dot{q} \quad (5.11)$$

$$\implies \boxed{\bar{\delta}q = \delta q(t) - \delta t \dot{q}(t)} \quad (5.12)$$

Propiedad 5.1. Los operadores $\bar{\delta}$ y d/dt conmutan.

$$\bar{\delta}\dot{q} = \dot{q}'(t) - \dot{q}(t) = \frac{d}{dt}q'(t) - \dot{q}(t) \quad (5.13)$$

$$= \frac{d}{dt}(q(t) - \bar{\delta}q) - \dot{q}(t) \quad (5.14)$$

$$= \cancel{\dot{q}(t)} + \frac{d}{dt}\bar{\delta}q - \cancel{\dot{q}(t)} \quad (5.15)$$

$$\implies \boxed{\bar{\delta}\dot{q} = \frac{d}{dt}\bar{\delta}q}, \quad \implies \boxed{\left[\bar{\delta}, \frac{d}{dt}\right] = 0} \quad (5.16)$$

Propiedad 5.2. Los operadores δ y d/dt no conmutan.

5.2. Prueba del teorema de Noether

Hemos visto que

▪

$$S'(q', \dot{q}', t') = S(q, \dot{q}, t) \quad (5.17)$$

▪

$$L'(q', \dot{q}', t') = L[q_i(q', t), \dot{q}_i(q, \dot{q}', t'), t(t')] \frac{dt}{dt'} \quad (5.18)$$

▪

$$L'(q', \dot{q}', t') = L(q', \dot{q}', t') + \frac{d}{dt'}\Omega(q', t') \quad (5.19)$$

De (5.18) y (5.19) vemos

$$L[q(q', t'), \dot{q}(q' \dot{q}', t'), t(t')] \frac{dt}{dt'} = L(q', \dot{q}', t') \frac{d}{dt'}\Omega(q', t') \quad (5.20)$$

cambiando a las coordenadas antiguas,

$$L(q, \dot{q}, t) = L[q'(q, t), \dot{q}'(q \dot{q}, t), t'(t)] \frac{dt'}{dt} + \frac{d}{dt}\Omega(q'(q, t), t'(t)) \frac{dt'}{dt} \quad (5.21)$$

$$L(q, \dot{q}, t) = L(q' \dot{q}', t') \frac{dt'}{dt} + \frac{d}{dt}\Omega(q', t') \quad (5.22)$$

en el entendido que

$$q' = q'(q, t), \quad \dot{q}' = \dot{q}'(q, \dot{q}, t), \quad t' = t'(t) \quad (5.23)$$

Dado que $t' = t + \delta t$,

$$\frac{dt'}{dt} = 1 + \frac{d}{dt}\delta t \quad (5.24)$$

$$L(q, \dot{q}, t) = L(q', \dot{q}', t') \left(1 + \frac{d}{dt}\delta t\right) + \frac{d}{dt}\Omega(q', t') \quad (5.25)$$

$$\implies L(q, \dot{q}, t) - L(q', \dot{q}', t') = L(q', \dot{q}', t') \frac{d}{dt}\delta t + \frac{d}{dt}\Omega(q', t') \quad (5.26)$$

Dado que las transformaciones son continuas, basta estudiar el caso infinitesimal.

De (5.26),

$$-\delta L = L(q, \dot{q}, t) - L(q + \delta q, \dot{q} + \delta \dot{q}, t + \delta t) \quad (5.27)$$

$$= L(q + \delta q, \dot{q} + \delta \dot{q}, t + \delta t) \frac{d}{dt}\delta t + \frac{d}{dt}\Omega(q + \delta q, t + \delta t) \quad (5.28)$$

Expandiendo el primer término hasta primer orden

$$-\delta L = L(q, \dot{q}, t) \frac{d}{dt}\delta t + \frac{d}{dt}\Omega(q + \delta q, t + \delta t) \quad (5.29)$$

Si consideramos el caso límite donde $\delta q = 0, \delta t = 0$

$$\delta L = 0, \quad \frac{d}{dt}\Omega(q, t) = 0 \quad (5.30)$$

Esto nos permite escribir

$$-\delta L = L(q, \dot{q}, t) \frac{d}{dt}\delta t + \frac{d}{dt}\Omega(q + \delta q, t + \delta t) - \frac{d}{dt}\Omega(q, t) \quad (5.31)$$

$$= L(q, \dot{q}, t) \frac{d}{dt}\delta t + \delta t \frac{d}{dt}[\Omega(q + \delta q, t + \delta t) - \Omega(q, t)] \quad (5.32)$$

$$\implies \boxed{-\delta L = L(q, \dot{q}, t) \frac{d}{dt}\delta t + \frac{d}{dt}\delta\Omega(q, t)} \quad (5.33)$$

Reemplazando $L = L(q_i, \dot{q}_i, t)$, tenemos

$$\delta L = \sum_i \left(\frac{\partial L}{\partial q_i} \delta q_i + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \delta \dot{q}_i \right) + \frac{\partial L}{\partial t} \delta t \quad (5.34)$$

Reemplazando (5.34) en (5.33),

$$-\sum_i \left(\frac{\partial L}{\partial q_i} \delta q_i + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \delta \dot{q}_i \right) - \frac{\partial L}{\partial t} \delta t = L(q, \dot{q}, t) \frac{d}{dt}\delta t + \frac{d}{dt}\delta\Omega(q, t) \quad (5.35)$$

Estudiaremos ahora el primer término del lado izquierdo. Dado que $\delta \dot{q}_i = d/dt \delta q_i - \dot{q}_i d/dt \delta t$ (ecuación (4.20)),

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \delta \dot{q}_i = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \left(\frac{d}{dt} \delta q_i - \dot{q}_i \frac{d}{dt} \delta t \right) \quad (5.36)$$

$$= \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \frac{d}{dt} \delta q_i - \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \dot{q}_i \frac{d}{dt} \delta t \quad (5.37)$$

$$\Rightarrow \sum_i \frac{\partial L}{\partial q_i} \delta q_i + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \delta \dot{q}_i = \sum_i \frac{\partial L}{\partial q_i} \delta q_i + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \frac{d}{dt} \delta q_i - \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \dot{q}_i \frac{d}{dt} \delta t \quad (5.38)$$

$$= \sum_i \left(\frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \frac{d}{dt} \right) \delta q_i - \sum_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \dot{q}_i \frac{d}{dt} \delta t \quad (5.39)$$

Introduciendo en (5.35),

$$\sum_i \left(\frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \frac{d}{dt} \right) \delta q_i - \sum_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \dot{q}_i \frac{d}{dt} \delta t + \frac{\partial L}{\partial t} \delta t = -L(q, \dot{q}, t) \frac{d}{dt} \delta t - \frac{d}{dt} \delta \Omega(q, t) \quad (5.40)$$

$$\sum_i \left(\frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \frac{d}{dt} \right) \delta q_i + \left(L(q, \dot{q}, t) - \sum_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \dot{q}_i \right) \frac{d}{dt} \delta t + \frac{\partial L}{\partial t} \delta t = -\frac{d}{dt} \delta \Omega(q, t) \quad (5.41)$$

despues de algo d cálculo se llega a

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[\sum_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \delta q_i + L \delta t - \sum_i \frac{\partial L}{\partial q_i} \dot{q}_i \delta t + \delta \Omega \right] &= - \sum_i \left(\frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) \delta q_i \\ &+ \left(\frac{dL}{dt} - \frac{\partial L}{\partial t} \right) \delta t - \sum_i \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \dot{q}_i \right) \delta t \end{aligned} \quad (5.42)$$

Analicemos los dos últimos términos de (5.42). Dado que $L = L(q_i, \dot{q}_i, t)$, se tiene que

$$\frac{dL}{dt} = \sum_i \left(\frac{\partial L}{\partial q_i} \dot{q}_i + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \ddot{q}_i \right) + \frac{\partial L}{\partial t} \quad (5.43)$$

$$\Rightarrow \frac{dL}{dt} - \frac{\partial L}{\partial t} = \sum_i \left(\frac{\partial L}{\partial q_i} \dot{q}_i + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \ddot{q}_i \right) \quad (5.44)$$

y además

$$\sum_i \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \dot{q}_i \right) = \sum_i \left(\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) \dot{q}_i + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \ddot{q}_i \quad (5.45)$$

$$\left(\frac{dL}{dt} - \frac{\partial L}{\partial t} \right) - \sum_i \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \dot{q}_i \right) = \sum_i \left(\frac{\partial L}{\partial q_i} \dot{q}_i + \cancel{\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \ddot{q}_i} - \left(\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) \dot{q}_i - \cancel{\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \ddot{q}_i} \right) \quad (5.46)$$

$$= \sum_i \left(\frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) \dot{q}_i \quad (5.47)$$

Así, (5.42) toma la forma

$$\frac{d}{dt} \left[\sum_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} (\delta q_i - \dot{q}_i \delta t) + L \delta t + \delta \Omega \right] = - \sum_i \left(\frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) (\delta q_i - \dot{q}_i \delta t) \quad (5.48)$$

Dado que

$$\bar{\delta} q_i = \delta q_i - \dot{q}_i \delta t \quad (5.49)$$

y que

$$[L]_i = \sum_i \left(\frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) \quad (5.50)$$

tenemos

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} (\delta q_i - \dot{q}_i \delta t) + L \delta t + \delta \Omega \right] = -[L]_i \bar{\delta} q_i \quad (5.51)$$

luego,

$$[L]_i \bar{\delta} q_i + \frac{d}{dt} \left[\sum_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \bar{\delta} q_i + L \delta t + \delta \Omega \right] = 0 \quad (5.52)$$

esto implica, que en el espacio de soluciones de las ecuaciones de Euler-Lagrange, se tiene

$$\frac{d}{dt} \left[\sum_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \bar{\delta} q_i + L \delta t + \delta \Omega \right] = 0 \quad (5.53)$$

Definiendo la cantidad,

$$J \equiv \sum_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \bar{\delta} q_i + L \delta t + \delta \Omega \quad (5.54)$$

$$\implies \frac{dJ}{dt} = 0, \implies J = \text{constante} \quad (5.55)$$

Luego, J es una cantidad conservada,

$$\boxed{[L]_i \bar{\delta} q_i + \frac{dJ}{dt} = 0} \quad (5.56)$$

6. Clase 6

6.1. Continuación prueba del teorema de Noether

De la clase 5 vimos que

$$\boxed{[L]_i \bar{\delta} q_i + \frac{dJ}{dt} = 0}, \quad [L]_i = 0 \quad (6.1)$$

donde

$$J \equiv \sum_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \bar{\delta} q_i + L \delta t + \delta \Omega \quad (6.2)$$

con

$$\bar{\delta} q_i = \delta q_i - \dot{q}_i \delta t \quad (6.3)$$

$$J = \sum_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} (\delta q_i - \dot{q}_i \delta t) + L \delta t + \delta \Omega \quad (6.4)$$

$$= \sum_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \delta q_i - \sum_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \dot{q}_i \delta t + L \delta t + \delta \Omega \quad (6.5)$$

pero sabemos que

$$p_i = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}^i}, \quad H_c = \sum_i p_i \dot{q}^i - L \quad (6.6)$$

así,

$$\boxed{J = \sum_i p_i \delta q^i - H_c \delta t + \delta \Omega} \quad (6.7)$$

donde H_c es el usual Hamiltoniano en el caso de que la función de Lagrange sea regular, y es el llamado **Hamiltoniano canónico** en el caso de que la función de Lagrange L sea de naturaleza singular. En (6.1) tenemos que

$$[L]_i = \frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \quad (6.8)$$

$$= \frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{\partial^2 L}{\partial \dot{q}_i \partial q_j} \dot{q}_j - \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i \dot{q}_j} \ddot{q}_j = 0 \quad (6.9)$$

Definiendo

$$V_i = \frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{\partial^2 L}{\partial \dot{q}_i \partial q_j} \dot{q}_j \quad (6.10)$$

$$W_{ij} = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i \dot{q}_j} \quad (6.11)$$

se tiene³

$$\implies [L]_i = V_i - W_{ij} \ddot{q}^j \quad (6.12)$$

En el caso de que L sea regular, podemos escribir

$$V_i - W_{ij} \ddot{q}^j = 0 \quad / W^{ki} \quad (6.13)$$

$$W^{ki} V_i - W^{ki} W_{ij} \ddot{q}^j = 0 \quad (6.14)$$

$$W^{ki} V_i - \delta_j^k \ddot{q}^j = 0 \quad (6.15)$$

$$\implies \boxed{\ddot{q}^k = W^{ki} V_i} \quad (6.16)$$

Dado que la derivada de Euler-Lagrange es

$$[L]_i = V_i - W_{ij} \ddot{q}^j \quad (6.17)$$

tenemos que (6.1) toma la forma

$$(V_i - W_{ij} \ddot{q}^j) \bar{\delta} q^i + \frac{dJ}{dt} = 0 \quad (6.18)$$

$$V_i \bar{\delta} q^i - W_{ij} \ddot{q}^j \bar{\delta} q^i + \frac{dJ}{dt} = 0 \quad (6.19)$$

³Abusando un poco de la posición de los índices, que para efecto de este cálculo no es tan relevante.

pero $J = J(q, \dot{q}, t)$,

$$\frac{dJ}{dt} = \frac{\partial J}{\partial q_i} \dot{q}_i + \frac{\partial J}{\partial \dot{q}_i} \ddot{q}_i + \frac{\partial J}{\partial t} \quad (6.20)$$

$$\implies V_i \bar{\delta} q^i - W_{ij} \ddot{q}^j \bar{\delta} q^i + \frac{\partial J}{\partial q_i} \dot{q}_i + \frac{\partial J}{\partial \dot{q}_i} \ddot{q}_i + \frac{\partial J}{\partial t} = 0 \quad (6.21)$$

$$V_i \bar{\delta} q^i + \frac{\partial J}{\partial q_i} \dot{q}_i + \frac{\partial J}{\partial t} + \frac{\partial J}{\partial \dot{q}_i} \ddot{q}_i - W_{ji} \ddot{q}^j \bar{\delta} q^i = 0 \quad (6.22)$$

$$V_i \bar{\delta} q^i + \frac{\partial J}{\partial q_i} \dot{q}_i + \frac{\partial J}{\partial t} + \left(\frac{\partial J}{\partial \dot{q}_i} - W_{ij} \bar{\delta} q^j \right) \ddot{q}^i = 0 \quad (6.23)$$

donde renombramos índices mudos y usado el hecho de que $W_{ij} = W_{ji}$ por como fue definido.

Teniendo en cuenta que $J = J(q, \dot{q}, t)$,

$$V_i \bar{\delta} q^i + \frac{\partial J}{\partial q_i} \dot{q}^i + \frac{\partial J}{\partial t} = 0 \quad (6.24)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \dot{q}_i} - W_{ij} \bar{\delta} q^j = 0 \quad (6.25)$$

Multiplicando (6.25) por W^{ki} , se tiene,

$$\bar{\delta} q^k = W^{ki} \frac{\partial J}{\partial \dot{q}^i} \quad (6.26)$$

Introduciendo (6.26) en (6.24), tenemos

$$V_i W^{ij} \frac{\partial J}{\partial \dot{q}^j} + \frac{\partial J}{\partial q_i} \dot{q}_i + \frac{\partial J}{\partial t} = 0 \quad (6.27)$$

De (6.16)

$$\ddot{q}^k = W^{ji} V_i = W^{ij} V_i \quad (6.28)$$

reemplazando (6.27),

$$\ddot{q}^j \frac{\partial J}{\partial \dot{q}^j} + \frac{\partial J}{\partial q_i} \dot{q}_i + \frac{\partial J}{\partial t} = 0 \quad (6.29)$$

$$\frac{\partial J}{\partial q_i} \dot{q}_i + \ddot{q}^j \frac{\partial J}{\partial \dot{q}^j} + \frac{\partial J}{\partial t} = 0 \quad (6.30)$$

$$\implies \boxed{\frac{dJ}{dt} = 0}, \quad J = \text{constante} \quad (6.31)$$

$$J = \sum_i p_i \delta q^i - H_c \delta t + \delta \Omega = \text{constante} \quad (6.32)$$

6.2. Grupos y álgebras de Lie

Sea A un conjunto de elementos $\{a, b, \dots\}$ dotado de una operación binaria interna \square tal que $\forall a, b, c \in A \square b = c \in A$ la operación \square es cerrada (en este caso tenemos un **magma**).

Si la operación binaria interna tiene solo la propiedad asociativa entonces estamos en presencia de un **semigrupo**.

Definición 6.1. Un **semigrupo** es una estructura algebraica dotada de una sola operación binaria interna que satisface la propiedad asociativa.

Ejemplo 6.1. Sea $A = \{a, b\}$ dotado de la operación \diamond . Una tabla de multiplicación es la siguiente.

$$\begin{array}{c|cc} \diamond & a & b \\ \hline a & a & b \\ b & a & b \end{array} \quad (6.33)$$

$$(a \diamond b) \diamond a = b \diamond a = a \quad (6.34)$$

$$a \diamond (b \diamond a) = a \diamond a = a \quad (6.35)$$

Luego, la operación \diamond es asociativa. Notemos que $a \diamond a = a$ y $a \diamond b = b$ pero $b \diamond a = a$ lo que implica que $a \diamond b \neq b \diamond a$. Luego el conjunto A con la operación \diamond dada en (6.33) no tiene elemento unidad y corresponde a un semigrupo.

Si la operación binaria interna además de ser asociativa admite un elemento unidad, entonces estamos en presencia de un **monoide**.

Definición 6.2. Un **monoide** es una estructura algebraica dotada de una operación binaria interna que admite la propiedad asociativa y de elemento unidad.

Si sucediera que cada elemento del monoide admitiera un elemento neutro, entonces estaríamos en presencia de un grupo.

Definición 6.3. Un **grupo** es una estructura algebraica dotada de una operación binaria interna que satisface

1. asociatividad
2. tiene elemento unidad
3. cada elemento de la estructura admite un elemento inverso.

Hasta ahora hemos visto estructuras con solo una ley de composición interna. Una estructura que tiene dos leyes de composición interna es el **anillo**.

Definición 6.4. Un **anillo** es una estructura algebraica dotada denotada por $(A, \square, *)$ donde

1. A con respecto a la operación \square es un grupo abeliano (conmutativo)

2. A con respecto de $*$ es un semigrupo.

Normalmente la operación \square se denota por $+$ y se le llama adición, y $*$ se denota por \cdot o solo por yuxtaposición.

Así entonces una estructura $(A, +, \cdot)$ se llama anillo si:

1. $\forall a, b, c \in A, (a + b) + c = a + (b + c)$
2. $\forall a \in A, \exists 0 \in A / a + 0 = 0 + a = a$
3. $\forall a \in A, \exists (-a) \in A, / a + (-a) = (-a) + a = 0$
4. $\forall a, b \in A, a + b = b + a$
5. $\forall a, b, c \in A, a(bc) = (ab)c$

Su sucediera que $\forall a, b \in A, ab = ba$ el anillo se llamará **anillo conmutativo**.

Si ocurriera que $\forall a \in A, \exists 1 \in A / a1 = 1a = a$ el anillo se llamará **anillo con unidad**.

Definición 6.5. Sea $(A, +, \cdot)$ un anillo. Si ocurriera que $\forall a \in A$, existiera un a^{-1} , solo para el elemento 0, entonces la estructura algebraica se llama un **campo**.

7. Clase 7

Definición 7.1. Una estructura $(A, +, \cdot)$ es un anillo si

- $(A, +)$ es un grupo abeliano
- (A, \cdot) es un semigrupo

En el caso que la operación de multiplicación admita un elemento unidad, entonces $(A, +, \cdot)$ será un anillo con unidad, i.e. $\forall x \in A, \exists x \in A / ex = xe = x$.

En el caso que la operación multiplicativa del anillo sea conmutativa, el anillo es un anillo conmutativo.

Definición 7.2. Un campo denotado por K , es una estructura que además de tener las propiedades del anillo con unidad, cada elemento A , excepto el cero, tiene un inverso. Por lo tanto un campo $(K, +, \cdot)$ es una estructura tal que

- $(K, +)$ es un grupo abeliano aditivo.
- $(K - 0, \cdot)$ es un grupo abeliano multiplicativo.

Hasta ahora hemos estudiado estructuras que tienen una ó dos operaciones binarias internas. Consideremos ahora una estructura dotada de una operación binaria interna y una operación binaria externa.

7.1. Espacio lineal o espacio vectorial

Definición 7.3. Una estructura (M, K, \bullet) es llamado un espacio vectorial, si

- M es un grupo abeliano,
- K es un campo conmutativo,
- \bullet es una operación binaria externa que define la acción del campo K sobre el grupo M ,

$$\bullet : K \times M \rightarrow M \quad (7.1)$$

$$(\alpha, x) \rightarrow \alpha \bullet x, \quad \forall x \in M, \forall \alpha \in K \quad (7.2)$$

- La operación binaria interna de M está relacionada con la operación binaria externa \bullet a través de una operación distributiva mixta.

$$\bullet \alpha \bullet (x + y) = \alpha \bullet x + \alpha \bullet y$$

$$\bullet (\alpha + \beta) \bullet x = \alpha \bullet x + \beta \bullet x$$

$$\forall \alpha, \beta \in K, \forall x, y \in M.$$

Normalmente los elementos $x \in M$ se llaman **vectores** y los elementos $\alpha \in K$ se llaman **escalares** y la operación \bullet se llama producto por escalar.

7.2. Álgebra y álgebra de Lie

Definición 7.4. Una estructura algebraica (A, K, \bullet) es llamada un álgebra, si

- A es un anillo,
- K es un campo conmutativo,
- \bullet es una operación binaria externa que define la acción del campo K sobre el anillo,

$$\bullet : K \times A \rightarrow A \quad (7.3)$$

- La operación binaria interna aditiva del anillo $(+)$ está relacionada con la operación binaria externa a través de la propiedad distributiva mixta

$$\bullet \alpha \bullet (x + y) = \alpha \bullet x + \alpha \bullet y, \quad \forall \alpha, \beta \in K, \forall x, y \in A$$

$$\bullet (\alpha + \beta) \bullet x = \alpha \bullet x + \beta \bullet x$$

- La operación binaria interna multiplicativa del anillo (denotada por \diamond) está relacionada con la operación binaria externa \bullet por medio de la propiedad asociativa mixta

$$\alpha \bullet (x \diamond y) = (\alpha \bullet x) \diamond y = x \diamond (\alpha \bullet y), \quad \forall x, y \in A, \forall \alpha \in K \quad (7.4)$$

1. La operación binaria interna del anillo \diamond se le llama producto algebraico.

En el caso que la multiplicación algebraica \diamond sea asociativa, i.e., $\forall x, y, z \in A$,

$$(x \diamond y) \diamond z = x \diamond (y \diamond z) \quad (7.5)$$

entonces el álgebra se llama **álgebra asociativa**.

2. Si la multiplicación algebraica tiene además de la propiedad asociativa, al elemento unidad entonces el álgebra es llamada **álgebra asociativa unital**.

3. Si la operación multiplicación algebraica es una operación antisimétrica, i.e., si

- 4.

$$x \diamond y = [x, y] = xy - yx \quad (7.6)$$

entonces el álgebra se llama **álgebra de Lie** y la operación \diamond antisimétrica satisface la propiedad derivativa conocida como identidad de Jacobi.

7.3. Grupos, álgebras y simetrías

El concepto de grupo está muy relacionado con el concepto de invariancia o de simetría de objetos tales como superficies, funciones, ecuaciones algebraicas, ecuaciones diferenciales, entre otros.

Nota histórica:

- El estudio de las simetrías de las ecuaciones algebraicas se hace en el contexto de la teoría de Galois ⁴.
- El estudio de las simetrías de las ecuaciones diferenciales se hacen en el contexto de la teoría de Lie ⁵.

Los grupos de Lie son grupos continuos que tienen la propiedad que es suficiente estudiarlos en su forma infinitesimal. En física, los grupos de Lie se introducen como grupos de transformaciones de coordenadas, i.e., como actuando sobre los elementos de una variedad.

Ejemplo 7.1. Consideremos la típica rotación en un plano de los ejes coordenados en un ángulo θ , La relación entre las coordenadas primadas y las sin primar viene dada por

$$x'_1 = \cos \theta x_1 - \sin \theta x_2 \quad (7.7)$$

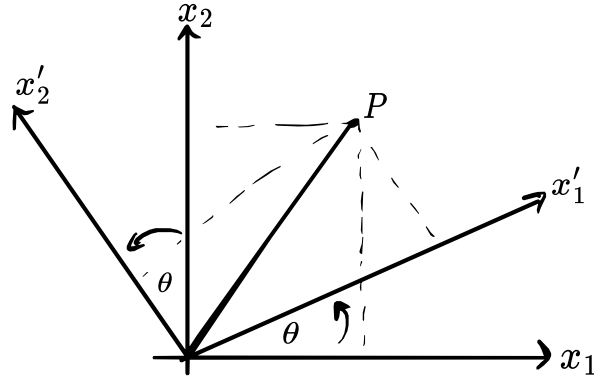
$$x'_2 = \sin \theta x_1 + \cos \theta x_2 \quad (7.8)$$

o de manera equivalente

$$\underbrace{\begin{pmatrix} x'_1 \\ x'_2 \end{pmatrix}}_{x'} = \underbrace{\begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}}_{R(\theta)} \underbrace{\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}}_x \quad (7.9)$$

⁴https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%89variste_Galois

⁵https://es.wikipedia.org/wiki/Sophus_Lie



Así, tenemos una transformación de la forma

$$x' = f(x, \theta) \quad (7.10)$$

además, notemos que

- $\{R(\theta)\}$ tiene unidad $\forall \theta$, dada por

$$R(0) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7.11)$$

- tiene inverso, $\forall \theta, \exists (-\theta)$.
- es asociativo,
- es conmutativo

Si la transformación $x' = f(x, \theta)$, entonces la unidad es dada por $x' = f(x, 0) = f(x, e) = x$.

Definición 7.5. Un conjunto de transformaciones

$$x'^i = f^i(x', \dots, x^n; g^1, \dots, g^r) \equiv f(x, g) \quad (7.12)$$

es llamado un **grupo de transformaciones r -paramétrico** si

1. admite el elemento unidad

$$x' = f(x, e) = x \quad (7.13)$$

2. admite elemento inverso

3. tiene definida una ley de composición interna,

$$x' = f(x, g), \quad x'' = f(x', g') = f[f(x, g), g'] = f(x, g'') \quad (7.14)$$

entonces

$$\boxed{g'' = g''(g, g')} \quad (7.15)$$

Definición 7.6. Un conjunto de transformaciones es un **grupo de simetría** de una ecuación diferencial

$$F(x, x^{(1)}, \dots, x^{(n)}) = 0, \quad \text{con } x = (x^1, \dots, x^n) \quad (7.16)$$

si la ecuación (7.16) permanece invariante en forma bajo la acción del grupo,

$$F(x', x'^{(1)}, \dots, x'^{(n)}) = 0 \quad (7.17)$$

Lo interesante de los grupos de Lie es que basta estudiar sus versiones infinitesimales.

$$x' = f(x, g) \rightarrow x' = f(x, \delta g) \quad (7.18)$$

$$x'^i = f^i(x, \delta g) = f^i(x, e) + \left. \frac{\partial f^i(x, \delta g)}{\partial g^k} \right|_{g=e} \delta g^k + \dots \quad (7.19)$$

donde $x' = f(x, e) = x$

$$x'^i = x^i + \left. \frac{\partial f^i(x, \delta g)}{\partial g^k} \right|_{g=e} \delta g^k + \dots \quad (7.20)$$

$$\Rightarrow \delta x^i = x'^i - x^i = \left. \frac{\partial f^i(x, \delta g)}{\partial g^k} \right|_{g=e} \delta g^k \quad (7.21)$$

Esto significa que un cambio infinitesimal en los parámetros implica un cambio infinitesimal en las coordenadas de la variedad sobre la cual actúa el grupo.

8. Clase 8

8.1. Generadores de grupos de Lie

Sea \mathcal{M} una variedad dotada de sistemas de coordenadas $\{x_i\}_{i=1}^n, \{x'_i\}_{i=1}^n$ y sea G un grupo r -paramétrico $a_\nu, \nu = 1, \dots, r$. La acción del grupo G sobre la variedad \mathcal{M} es dada por el grupo de transformaciones

$$x' = f(x, a) x'_i = f_i(x_j, a_\nu) \quad (8.1)$$

$$x'_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n; a_1, a_2, \dots, a_r) \quad (8.2)$$

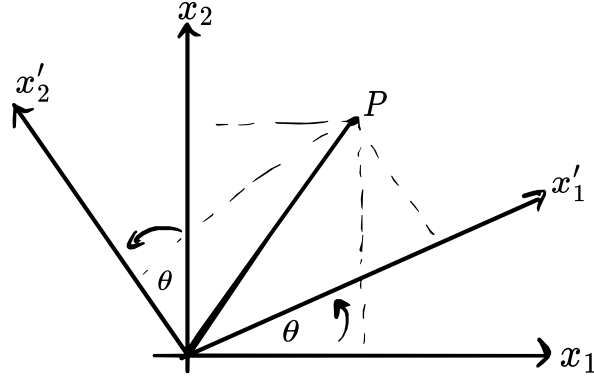
Para clarificar ideas consideremos el ejemplo de una variedad \mathcal{M} de 2 dimensiones que admite las coordenadas $x : (x_1, x_2)$ y $x' : (x'_1, x'_2)$ y un grupo uni-paramétrico $G = SO(2)$ de rotaciones en el plano,

$$x'_1 = \cos \theta x_1 - \sin \theta x_2 \quad (8.3)$$

$$x'_2 = \sin \theta x_1 + \cos \theta x_2 \quad (8.4)$$

o de manera equivalente

$$\underbrace{\begin{pmatrix} x'_1 \\ x'_2 \end{pmatrix}}_{x'} = \underbrace{\begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}}_{R(\theta)} \underbrace{\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}}_x \quad (8.5)$$



$$\implies x' = R(\theta)x \longleftrightarrow x' = f(x, \theta)x \quad (8.6)$$

o en general

$$\implies x' = R(a)x \longleftrightarrow x' = f(x, a)x \quad (8.7)$$

De aquí vemos:

1. La acción de $G = SO(2)$ es rotar las coordenadas de \mathcal{M} .
2. Si el ángulo de rotación es pequeño, entonces el cambio experimentado por las coordenadas es también pequeño. Esto implica que en general, un pequeño cambio en los parámetros del grupo induce cambios pequeños en las coordenadas de \mathcal{M} .

Notemos que cuando $\theta = 0$,

$$R(0) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \implies \begin{pmatrix} x'_1 \\ x'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \quad (8.8)$$

es decir,

$$x'_1 = x_1 \quad x'_2 = x_2 \quad (8.9)$$

$$x' = R(0)x = x, \quad x' = f(x, 0) = x \quad (8.10)$$

Teniendo en cuenta que en el estudio de los grupos de Lie basta con estudiar su comportamiento infinitesimal, consideremos la expansión infinitesimal de la transformación $x' = f(x, a)$ alrededor de $a = 0$.

$$x' = f(x, a) = f(x, 0) + \left. \frac{\partial f(x, a)}{\partial a} \right|_{a=0} da + \dots \quad (8.11)$$

$$x'_i = f_i(x_j, a_\nu) = f_i(x_j, 0) + \frac{\partial f_i(x_j, 0)}{\partial a_\nu} da_\nu \quad (8.12)$$

$$x' = x + \frac{\partial f(x, a)}{\partial a} da \quad (8.13)$$

$$x'_i = x_i + \frac{\partial f_i(x, 0)}{\partial a_\nu} da_\nu \quad (8.14)$$

Esto implica que

$$dx' = \frac{\partial f(x, 0)}{\partial a} da, \quad dx'_i = \frac{\partial f_i(x, 0)}{\partial a_\nu} da_\nu \quad (8.15)$$

Definiendo por comodidad

$$u(x) = \frac{\partial f(x, 0)}{\partial a}, \quad u_{i\nu}(x) = \frac{\partial f_i(x, 0)}{\partial a_\nu} \quad (8.16)$$

Así,

$$dx = u(x)da, \quad dx_i = u_{i\nu}da_\nu \quad (8.17)$$

Notar que, de lo anterior⁶

$$\boxed{\frac{dx_i}{da_\nu} = u_{i\nu}(x)} \quad (8.18)$$

También podemos escribir

$$dx_i = \sum_{\nu} u_{i\nu}(x) da_\nu \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad \nu = 1, 2, \dots, r \quad (8.19)$$

Definición 8.1. Sea $F(x) = F(x_1, \dots, x_n)$ una función definida sobre la variedad \mathcal{M} . La función $F(x)$ es **invariante** bajo el grupo de transformaciones

$$x' = f(x, a) \quad (8.20)$$

si

$$F(x') = F[f(x, a)] = F(x).$$

Consideremos ahora el cambio experimentado por la función $F(x)$ cuando cambian las coordenadas x debido a un cambio en los parámetros del grupo.

Bajo un cambio en x se tiene que $F(x)$ cambia como⁷

$$dF = \frac{\partial F}{\partial x} dx = \frac{\partial F}{\partial x} u(x) da \quad (8.21)$$

$$dF = da \left(u(x) \frac{\partial}{\partial x} \right) F \quad (8.22)$$

$$dF = da_\nu \left(u_{i\nu}(x) \frac{\partial}{\partial x_i} \right) F \quad (8.23)$$

donde hemos usado (8.17).

Definición 8.2. Se define el **generador** del grupo como el operador dado por

$$\boxed{X_\nu = \sum_i u_{i\nu} \frac{\partial}{\partial x_i}}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad \nu = 1, 2, \dots, r \quad (8.24)$$

⁶No estamos siendo estrictos con la posición de los índices coordenados de momento.

⁷El cambio en el parámetro genera un cambio en las coordenadas, y el cambio en las coordenadas genera un cambio en la función $F(x)$.

Así, existe un generador por cada parámetro del grupo.
Esto implica que

$$dF = da_\nu X_\nu F \equiv XF \quad (8.25)$$

donde

$$X = da_\nu X_\nu \equiv da^\nu X_\nu \quad (8.26)$$

Observación 8.1. Los generadores X_ν son operadores que pueden o no ser operadores hermíticos. En el caso que ellos no sean hermíticos, pueden ser convertidos en hermíticos en general, multiplicándolos por i .

Teorema 8.1. A partir de un conjunto de operadores hermíticos X_ν podemos obtener una representación del grupo por medio de operadores unitarios

$$U(a_\nu) = e^{ia_\nu X_\nu} \quad (8.27)$$

Teorema 8.2. Si X_ν y X_μ son generadores de un grupo de Lie, entonces su conmutador es una combinación lineal de dichos generadores:

$$[X_\nu, X_\mu] = C_{\nu\mu}^\lambda X_\lambda \equiv C_{\mu\nu\lambda} X_\lambda \quad (8.28)$$

donde

$$C_{\nu\mu}^\lambda = -C_{\mu\nu}^\lambda \quad (8.29)$$

Dado que este producto es antisimétrico, satisface la **identidad de Jacobi**,

$$[[X_\mu, X_\nu], X_\lambda] + [[X_\lambda, X_\mu], X_\nu] + [[X_\nu, X_\lambda], X_\mu] = 0 \quad (8.30)$$

Ejemplo 8.1. Consideremos el siguiente grupo de transformaciones

$$x' = \alpha_1 x + \alpha_2, \quad \alpha = (\alpha_1, \alpha_2) \quad (8.31)$$

- Encuentre los generadores del grupo
- Determine sus relaciones de conmutación

Solución 8.1. De (8.31) vemos que la identidad del grupo es dada por $\alpha_1 = 1$ y $\alpha_2 = 0$ ya que $x' = 1x + 0 = x$, lo que implica que $a_0 = (\alpha_1^0, \alpha_2^0) = (1, 0)$. Con el objeto de tener una identidad nula, definimos

$$a_1 = \alpha_1 - 1, \quad a_2 = \alpha_2 \quad (8.32)$$

Es decir,

$$a_1^0 = \alpha_1^0 - 1, \quad a_2^0 = \alpha_2^0 \quad (8.33)$$

$$\implies a_1^0 = 1 - 1 = 0, \quad a_2^0 = 0 \quad (8.34)$$

$$\implies a_0 = (a_1^0, a_2^0) = (0, 0) \quad (8.35)$$

Así, el grupo de transformaciones toma la forma

$$x' = (1 + a_1)x + a_2 \quad (8.36)$$

$$\implies \boxed{x' = f(x, a) = x + a_1x + a_2} \quad (8.37)$$

$$\implies dx_i = \frac{\partial f_i(x, 0)}{\partial a_\nu} da_\nu = u(x)_{i\nu} da_\nu \quad (8.38)$$

$$dx_i = \sum_\nu \frac{\partial f_i}{\partial a_\nu} da_\nu \quad (8.39)$$

$$dx_1 \equiv dx = \frac{\partial f}{\partial a_1} da_1 + \frac{\partial f}{\partial a_2} da_2 \quad (8.40)$$

$$dx = x da_1 + 1 da_2 \quad (8.41)$$

$$\boxed{dx = x da_1 + da_2} \quad (8.42)$$

pero

$$dx = u_{11} da_1 + u_{12} da_2 \quad (8.43)$$

$$\implies u_{11} = x, \quad u_{12} = 1 \quad (8.44)$$

de manera que

$$X_\nu = \sum_i u(x)_{i\nu} \frac{\partial}{\partial x_i} \quad (8.45)$$

$$X_1 = u_{11} \frac{\partial}{\partial x_1} = u_{11} \frac{\partial}{\partial x} = x \frac{\partial}{\partial x} \quad (8.46)$$

$$X_2 = u_{12} \frac{\partial}{\partial x_1} = u_{12} \frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \quad (8.47)$$

Así, los generadores del grupo son

$$X_1 = x \frac{\partial}{\partial x}, \quad X_2 = \frac{\partial}{\partial x} \quad (8.48)$$

El conmutador es

$$[X_1, X_2]f = X_1 X_2 f - X_2 X_1 f \quad (8.49)$$

$$= x \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(x \frac{\partial f}{\partial x} \right) \quad (8.50)$$

$$= x \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} - \frac{\partial f}{\partial x} - x \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \quad (8.51)$$

$$= -\frac{\partial f}{\partial x} \quad (8.52)$$

$$= -X_2 f \quad (8.53)$$

$$\implies [X_1, X_2] = -X_2 \quad (8.54)$$

Dado que

$$[X_1, X_2] = C_{12}^1 X_1 + C_{12}^2 X_2 \quad (8.55)$$

se tiene que las constantes de estructura son

$$C_{12}^1 = 0, \quad C_{12}^2 = -1 \quad (8.56)$$

8.2. Grupos matriciales

Sea \mathcal{M} una variedad que admite las bases⁸ $\{\hat{e}_i\}_{i=1}^n, \{\hat{e}'_i\}_{i=1}^n$ y $\{\hat{e}''_i\}_{i=1}^n$ asociadas a las coordenadas $\{x_i\}_{i=1}^n, \{x'_i\}_{i=1}^n$ y $\{x''_i\}_{i=1}^n$. Un cambio de base es dado por

$$\hat{e}'_j = B_j^i \hat{e}_i, \quad \hat{e}''_k = A_k^j \hat{e}'_j, \quad \hat{e}''_k = C_k^i \hat{e}_i \quad (8.57)$$

es decir,

$$\hat{e}''_k = A_k^j B_j^i \hat{e}_i = C_k^i \hat{e}_i \quad (8.58)$$

$$\implies \boxed{C_k^i = A_k^j B_j^i} \quad (8.59)$$

Todas las bases de un espacio vectorial están relacionadas por medio de matrices. El conjunto de estas matrices constituyen un grupo.

Definición 8.3. El conjunto de matrices $n \times n$ invertible que definen un cambio de base constituyen un grupo conocido como **grupo lineal general** definido sobre los espacios $\mathbb{R}^n, \mathbb{C}^n, \mathbb{Q}^n$. Estos grupos son denotados por $GL(n, \mathbb{R}), GL(n, \mathbb{C}), GL(n, \mathbb{Q})$.

Grupo general lineal $GL(n, \mathbb{C})$

Grupo compuesto por todas las matrices complejas invertibles $n \times n$.

Toda matriz $A \in GL(n, \mathbb{C}^n)$ tiene $2n^2$ elementos (n^2 elementos reales y n^2 elementos imaginarios).

Este grupo tiene $2n^2$ parámetros reales, por lo cual tiene dimensión $2n^2$.

Grupo general lineal real $GL(n, \mathbb{R})$

Si exigimos que las matrices de $GL(n, \mathbb{C}^n)$ sean todas con elemento reales, obtenemos el grupo lineal general real $GL(n, \mathbb{R}^n)$, el cual tiene n^2 parámetros reales.

Grupo general lineal especial $SL(n, \mathbb{C})$

Si exigimos que todas las matrices de $GL(n, \mathbb{C})$ satisfagan las condiciones que tengan determinante $+1$, entonces obtenemos el grupo lineal especial $SL(n, \mathbb{C})$. Así, si $A \in SL(n, \mathbb{C})$, entonces $\det A = 1$.

Grupo general lineal especial real $SL(n, \mathbb{R})$

Si exigimos que todas las matrices de $GL(n, \mathbb{R})$ tengan determinante $+1$ entonces obtenemos el grupo especial lineal real $SL(n, \mathbb{R})$.

9. Clase 9

Grupo unitario $U(n)$

Es el grupo de todas las matrices complejas unitarias de $n \times n$. Esto significa que si $A \in U(n)$, entonces $A^\dagger A = 1 \implies A^\dagger = A^{-1}$.

⁸Ver Ref. [4]

Grupo especial unitario $SU(n)$

Si exigimos a las matrices del grupo $U(n)$ que tengan determinante 1, entonces obtenemos el grupo especial unitario $SU(n)$. Esto significa que si $A \in SU(n)$, entonces $A^\dagger A = 1$ y $\det A = 1$.

Ejemplos importantes en física son el grupo $SU(2)$ y el grupo $SU(3)$.

También son de gran importantes los grupos $SU(4)$, $SU(5)$ y $SU(6)$.

Nota: El grupo $SU(2) \times U(1)$ está relacionado con las fuerzas electrodébiles (unificación del electromagnetismo con las fuerzas nucleares débiles). El grupo $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ está relacionado con la gran-unificación (unificación del electromagnetismo con las fuerzas nucleares débiles y fuertes).

Grupo ortogonal $O(n, \mathbb{C})$

Es el grupo de todas las matrices complejas ortogonales de $n \times n$. Esto significa que si $A \in O(n, \mathbb{C})$ entonces $A^T A = 1 \implies A^T = A^{-1}$.

Grupo ortogonal especial $SO(n, \mathbb{C})$

Si exigimos que las matrices del grupo $O(n, \mathbb{C})$ tengan determinante 1, entonces obtenemos el grupo ortogonal especial $SO(n, \mathbb{C})$. Es decir, si $A \in SO(n)$ ⁹ entonces $A^T A = 1$ y $\det A = 1$

9.1. Ejemplo: Generadores y álgebra de $SO(3)$

Ejemplo 9.1. Determine los generadores del grupo ortogonal especial 3-dimensional $SO(3)$ así como también su álgebra de Lie.

Solución 9.1. El grupo $SO(3)$ es el grupo de matrices ortogonales de 3×3 y de determinante igual a 1. La acción de $SO(3)$ sobre E_3 (o \mathbb{R}^3) es dada por el grupo de transformaciones

$$x' = Ax \quad (9.1)$$

de aquí vemos que el elemento unidad es dado por $A_0 = 1 \implies x' = A_0 x = x$. Para lograr tener un elemento unidad nulo definimos

$$a = A - 1 \implies a_0 = A_0 - 1 = 1 - 1 = 0 \quad (9.2)$$

así, la transformación (9.1) toma la forma

$$x' = f(x, a) = (1 + a)x = x + ax \quad (9.3)$$

$$dx = da \frac{\partial f(x, 0)}{\partial a} \quad (9.4)$$

$$= dax \quad (9.5)$$

y recordamos que

$$dx_i = \sum_{\nu} u_{i\nu} da_{\nu} \quad (9.6)$$

⁹Por notación se puede omitir la \mathbb{C} .

Dado que $A^T A = 1$, tenemos que en el caso infinitesimal (a primer orden)

$$(1 + da^T)(1 + da) = 1 \quad (9.7)$$

$$1 + da + da^T + \cancel{da^T da} = 1 \quad (9.8)$$

es decir,

$$da = -da^T \quad (9.9)$$

explícitamente tenemos

$$\begin{pmatrix} da_{11} & da_{12} & da_{13} \\ da_{21} & da_{22} & da_{23} \\ da_{31} & da_{32} & da_{33} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} da_{11} & da_{21} & da_{31} \\ da_{12} & da_{22} & da_{32} \\ da_{13} & da_{23} & da_{33} \end{pmatrix} \quad (9.10)$$

luego,

$$da = \begin{pmatrix} 0 & da_{12} & da_{13} \\ -da_{12} & 0 & da_{23} \\ -da_{13} & -da_{23} & 0 \end{pmatrix} \quad (9.11)$$

Definimos

$$da_{12} = da_3, \quad da_{13} = -da_2, \quad da_{23} = da_1 \quad (9.12)$$

así

$$da = \begin{pmatrix} 0 & da_3 & -da_2 \\ -da_3 & 0 & da_1 \\ da_2 & -da_1 & 0 \end{pmatrix} \quad (9.13)$$

de (9.5)

$$\begin{pmatrix} dx_1 \\ dx_2 \\ dx_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & da_3 & -da_2 \\ -da_3 & 0 & da_1 \\ da_2 & -da_1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \quad (9.14)$$

obteniendo

$$\begin{aligned} dx_1 &= x_2 da_3 - x_3 da_2 \\ dx_2 &= -x_1 da_3 + x_3 da_1 \\ dx_3 &= x_1 da_2 - x_2 da_1 \end{aligned} \quad (9.15)$$

De (9.6)

$$dx_1 = u_{11} da_1 + u_{12} da_2 + u_{13} da_3 \quad (9.16)$$

$$dx_2 = u_{21} da_1 + u_{22} da_2 + u_{23} da_3 \quad (9.17)$$

$$dx_3 = u_{31} da_1 + u_{32} da_2 + u_{33} da_3 \quad (9.18)$$

comparando

$$u_{11} = 0, \quad u_{12} = -x_3, \quad u_{13} = x_2 \quad (9.19)$$

$$u_{21} = x_3, \quad u_{22} = 0, \quad u_{23} = -x_1 \quad (9.20)$$

$$u_{31} = -x_2, \quad u_{32} = x_1, \quad u_{33} = 0 \quad (9.21)$$

Los generadores vienen dados por

$$X_\nu = \sum_i u(x)_{i\nu} \frac{\partial}{\partial x_i} \quad (9.22)$$

$$X_1 = u_{11} \frac{\partial}{\partial x_1} + u_{21} \frac{\partial}{\partial x_2} + u_{31} \frac{\partial}{\partial x_3} \quad (9.23)$$

$$= x_3 \frac{\partial}{\partial x_2} - x_2 \frac{\partial}{\partial x_3} \quad (9.24)$$

$$X_2 = u_{12} \frac{\partial}{\partial x_1} + u_{22} \frac{\partial}{\partial x_2} + u_{32} \frac{\partial}{\partial x_3} \quad (9.25)$$

$$= -x_3 \frac{\partial}{\partial x_1} + x_1 \frac{\partial}{\partial x_3} \quad (9.26)$$

$$X_3 = u_{13} \frac{\partial}{\partial x_1} + u_{23} \frac{\partial}{\partial x_2} + u_{33} \frac{\partial}{\partial x_3} \quad (9.27)$$

$$= x_2 \frac{\partial}{\partial x_1} - x_1 \frac{\partial}{\partial x_2} \quad (9.28)$$

$$(9.29)$$

en resumen,

$$X_1 = x_3 \frac{\partial}{\partial x_2} - x_2 \frac{\partial}{\partial x_3} \quad (9.30)$$

$$X_2 = x_1 \frac{\partial}{\partial x_3} - x_3 \frac{\partial}{\partial x_1} \quad (9.31)$$

$$X_3 = x_2 \frac{\partial}{\partial x_1} - x_1 \frac{\partial}{\partial x_2} \quad (9.32)$$

$$(9.33)$$

El conmutador

$$\begin{aligned}
[X_1, X_2]F &= X_1 X_2 F - X_2 X_1 F \\
&= \left(x_3 \frac{\partial}{\partial x_2} - x_2 \frac{\partial}{\partial x_3} \right) \left(x_1 \frac{\partial F}{\partial x_3} - x_3 \frac{\partial F}{\partial x_1} \right) - \left(x_1 \frac{\partial}{\partial x_3} - x_3 \frac{\partial}{\partial x_1} \right) \left(x_3 \frac{\partial F}{\partial x_2} - x_2 \frac{\partial F}{\partial x_3} \right) \\
&= x_3 \frac{\partial}{\partial x_2} \left(x_1 \frac{\partial F}{\partial x_3} \right) - x_3 \frac{\partial}{\partial x_2} \left(x_3 \frac{\partial F}{\partial x_1} \right) - x_2 \frac{\partial}{\partial x_3} \left(x_1 \frac{\partial F}{\partial x_3} \right) + x_2 \frac{\partial}{\partial x_3} \left(x_3 \frac{\partial F}{\partial x_1} \right) \\
&\quad - \left[x_1 \frac{\partial}{\partial x_3} \left(x_3 \frac{\partial F}{\partial x_2} \right) - x_1 \frac{\partial}{\partial x_3} \left(x_2 \frac{\partial F}{\partial x_3} \right) - x_3 \frac{\partial}{\partial x_1} \left(x_3 \frac{\partial F}{\partial x_2} \right) + x_3 \frac{\partial}{\partial x_1} \left(x_2 \frac{\partial F}{\partial x_3} \right) \right] \\
&= \left(x_2 \frac{\partial}{\partial x_1} - x_1 \frac{\partial}{\partial x_2} \right) F \\
&= X_3 F
\end{aligned}$$

El cálculo para los demás conmutadores es análogo y se obtiene,

$$[X_1, X_2] = X_3 \tag{9.34}$$

$$[X_3, X_1] = X_2 \tag{9.35}$$

$$[X_2, X_3] = X_1 \tag{9.36}$$

o de manera compacta

$$\boxed{[X_i, X_j] = \epsilon_{ijk} X_k} \tag{9.37}$$

Referencias

- [1] M. Ostrogradsky, *Mémoires sur les équations différentielles, relatives au problème des isopérimètres*, *Mem. Acad. St. Petersbourg* **6** (1850) 385.
- [2] J. Schwichtenberg, *Physics from Symmetry*, Undergraduate Lecture Notes in Physics, Springer International Publishing, Cham (2018), [10.1007/978-3-319-66631-0](https://doi.org/10.1007/978-3-319-66631-0).
- [3] A.W. Harald J. W. Muller-Kirsten, *Introduction to Supersymmetry*, World Scientific Lecture Notes in Physics, World Scientific Publishing Company, 2 ed. (2010).
- [4] H.R. David Lovelock, *Tensors, differential forms, and variational principles*, Dover (1989).