# Transformaciones Canónicas y Paréntesis de Poisson

**Luis A. Núñez**

*Escuela de Física, Facultad de Ciencias,*
*Universidad Industrial de Santander, Santander, Colombia*

20 de mayo de 2025

# Agenda

1. Transformaciones Canónicas
   - Transformaciones Puntuales
   - Transformaciones Canónicas
   - Transformacion Canónica y Principio de Mínima Acción
   - Función Generadora
   - Ejemplo de Función Generadora
   - Algunos Tipos de funciones generadoras
   - Ejemplo: $Q = q + e^p \quad \& \quad P = p$
2. Paréntesis de Poisson
   - Definición
   - Propiedades
   - Dos ejemplos
   - Paréntesis de Poisson y Transformaciones Canónicas
3. Recapitulando

# Transformaciones Puntuales

- Las posiciones en el espacio pueden ser descritas por diferentes sistemas de coordenadas $\{q_i\}$: cartesianas, esféricas, cilíndricas, etc.

# Transformaciones Puntuales

- Las posiciones en el espacio pueden ser descritas por diferentes sistemas de coordenadas $\{q_i\}$: cartesianas, esféricas, cilíndricas, etc.
- La forma de las ecuaciones de Lagrange no depende del conjunto de coordenadas $\{q_i\} \leftrightarrow \{Q_i\}$: $\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \leftrightarrow \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{Q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial Q_i} = 0$

# Transformaciones Puntuales

- Las posiciones en el espacio pueden ser descritas por diferentes sistemas de coordenadas $\{q_i\}$: cartesianas, esféricas, cilíndricas, etc.
- La forma de las ecuaciones de Lagrange no depende del conjunto de coordenadas $\{q_i\} \leftrightarrow \{Q_i\}$: $\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \leftrightarrow \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{Q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial Q_i} = 0$
- En el espacio de fase podemos realizar una **transformación puntual de coordenadas** $\{q_i, p_i\} \leftrightarrow \{Q_i, P_i\} \Rightarrow \mathcal{H}(q_i, p_i, t) \leftrightarrow \tilde{\mathcal{H}}(Q_i, P_i, t)$

# Transformaciones Puntuales

- Las posiciones en el espacio pueden ser descritas por diferentes sistemas de coordenadas $\{q_i\}$: cartesianas, esféricas, cilíndricas, etc.
- La forma de las ecuaciones de Lagrange no depende del conjunto de coordenadas $\{q_i\} \leftrightarrow \{Q_i\}$: $\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \leftrightarrow \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{Q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial Q_i} = 0$
- En el espacio de fase podemos realizar una **transformación puntual de coordenadas** $\{q_i, p_i\} \leftrightarrow \{Q_i, P_i\} \Rightarrow \mathcal{H}(q_i, p_i, t) \leftrightarrow \tilde{\mathcal{H}}(Q_i, P_i, t)$
- En general, la forma de las ecuaciones de Hamilton no se preserva en las nuevas coordenadas y momentos $\{Q_i, P_i\}$.

- Las posiciones en el espacio pueden ser descritas por diferentes sistemas de coordenadas $\{q_i\}$: cartesianas, esféricas, cilíndricas, etc.
- La forma de las ecuaciones de Lagrange no depende del conjunto de coordenadas $\{q_i\} \leftrightarrow \{Q_i\}$: $\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \leftrightarrow \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{Q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial Q_i} = 0$
- En el espacio de fase podemos realizar una **transformación puntual de coordenadas** $\{q_i, p_i\} \leftrightarrow \{Q_i, P_i\} \Rightarrow \mathcal{H}(q_i, p_i, t) \leftrightarrow \tilde{\mathcal{H}}(Q_i, P_i, t)$
- En general, la forma de las ecuaciones de Hamilton no se preserva en las nuevas coordenadas y momentos $\{Q_i, P_i\}$.
- Consideremos la siguiente transformacion puntual $\{q_i, p_i\} \rightarrow \{Q_i, P_i\}$ en el espacio de fase, $Q_i = -p_i, \quad P_i = q_i$

# Transformaciones Puntuales

- Las posiciones en el espacio pueden ser descritas por diferentes sistemas de coordenadas $\{q_i\}$: cartesianas, esféricas, cilíndricas, etc.
- La forma de las ecuaciones de Lagrange no depende del conjunto de coordenadas $\{q_i\} \leftrightarrow \{Q_i\}$: $\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \leftrightarrow \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{Q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial Q_i} = 0$
- En el espacio de fase podemos realizar una **transformación puntual de coordenadas** $\{q_i, p_i\} \leftrightarrow \{Q_i, P_i\} \Rightarrow \mathcal{H}(q_i, p_i, t) \leftrightarrow \tilde{\mathcal{H}}(Q_i, P_i, t)$
- En general, la forma de las ecuaciones de Hamilton no se preserva en las nuevas coordenadas y momentos $\{Q_i, P_i\}$.
- Consideremos la siguiente transformacion puntual $\{q_i, p_i\} \rightarrow \{Q_i, P_i\}$ en el espacio de fase, $Q_i = -p_i, \quad P_i = q_i$
- Entonces $\dot{q}_i = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p_i} \Rightarrow \dot{P}_i = \frac{\partial \tilde{\mathcal{H}}}{\partial p_i} = \sum_{k=1}^{s}\left(\frac{\partial \tilde{\mathcal{H}}}{\partial Q_k}\frac{\partial Q_k}{\partial p_i} + \frac{\partial \tilde{\mathcal{H}}}{\partial P_k}\frac{\partial P_k}{\partial p_i}\right) =$
  $\sum_k \frac{\partial \tilde{\mathcal{H}}}{\partial Q_k}(-\delta_{ik}) = -\frac{\partial \tilde{\mathcal{H}}}{\partial Q_i}$
  $\dot{p}_i = -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial q_i} \Rightarrow \dot{Q}_i = -\frac{\partial \tilde{\mathcal{H}}}{\partial q_i} = -\sum_{k=1}^{s}\left(\frac{\partial \tilde{\mathcal{H}}}{\partial Q_k}\frac{\partial Q_k}{\partial q_i} + \frac{\partial \tilde{\mathcal{H}}}{\partial P_k}\frac{\partial P_k}{\partial q_i}\right) =$
  $\sum_k \frac{\partial \tilde{\mathcal{H}}}{\partial P_k}(-\delta_{ik}) = -\frac{\partial \tilde{\mathcal{H}}}{\partial P_i}$ Claramente no se cumplen

# Transformaciones Canónicas

- Una **transformación canónica** es una transformación puntual que mantiene invariante la forma de las ecuaciones de Hamilton.

$$
\left.\begin{array}{r}
\mathcal{H}\left(q_i, p_i, t\right) \\
\dot{q}_i = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p_i} \\
\dot{p}_i = -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial q_i}
\end{array}\right|
\begin{array}{c}
\rightarrow \text{ Transformación canónica } \rightarrow \\
P_i = P_i\left(q_j, p_j, t\right) \\
Q_i\left(q_j, p_j, t\right)
\end{array}
\left|\begin{array}{l}
\tilde{\mathcal{H}}\left(Q_i, P_i, t\right) \\
\dot{Q}_i = \frac{\partial \tilde{\mathcal{H}}}{\partial P_i} \\
\dot{P}_i = -\frac{\partial \tilde{\mathcal{H}}}{\partial Q_i}
\end{array}\right.
$$

- Una **transformación canónica** es una transformación puntual que mantiene invariante la forma de las ecuaciones de Hamilton.

$$
\left.\begin{array}{r}
\mathcal{H}\left(q_i, p_i, t\right) \\
\dot{q}_i = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p_i} \\
\dot{p}_i = -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial q_i}
\end{array}\right| \begin{array}{c}
\rightarrow \text{ Transformación canónica } \rightarrow \\
P_i = P_i\left(q_j, p_j, t\right) \\
Q_i\left(q_j, p_j, t\right)
\end{array} \left| \begin{array}{l}
\tilde{\mathcal{H}}\left(Q_i, P_i, t\right) \\
\dot{Q}_i = \frac{\partial \tilde{\mathcal{H}}}{\partial P_i} \\
\dot{P}_i = -\frac{\partial \tilde{\mathcal{H}}}{\partial Q_i}
\end{array}\right.
$$

- Las transformaciones canónicas son particularmente útiles cuando el Hamiltoniano transformado $\tilde{\mathcal{H}}\left(Q_i, P_i, t\right)$ no depende explícitamente de alguna coordenada $Q_j$ o momento $P_j$. Es decir, son cíclicas.

# Principio de Mínima Acción 1/2

- La condición para que una transformación $\{q_i, p_i\} \rightarrow \{Q_i, P_i\}$ sea canónica se deriva del *Principio de Mínima Acción* en ambos conjuntos de variables del espacio de fase.

# Principio de Mínima Acción 1/2

- La condición para que una transformación $\{q_i, p_i\} \to \{Q_i, P_i\}$ sea canónica se deriva del *Principio de Mínima Acción* en ambos conjuntos de variables del espacio de fase.
- El Principio de Mínima Acción para las variables $\{q_i, p_i\}$, implica $S = \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{L} dt \Rightarrow \delta S = 0 \Rightarrow \delta \left( \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{L} dt \right) = 0$

# Principio de Mínima Acción 1/2

- La condición para que una transformación $\{q_i, p_i\} \to \{Q_i, P_i\}$ sea canónica se deriva del *Principio de Mínima Acción* en ambos conjuntos de variables del espacio de fase.
- El Principio de Mínima Acción para las variables $\{q_i, p_i\}$, implica $S = \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{L} dt \Rightarrow \delta S = 0 \Rightarrow \delta \left( \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{L} dt \right) = 0$
- Como el Hamiltoniano $\mathcal{H}(q_i, p_i, t) = \sum_{i=1}^{s} p_i \dot{q}_i - \mathcal{L}$

# Principio de Mínima Acción 1/2

- La condición para que una transformación $\{q_i, p_i\} \to \{Q_i, P_i\}$ sea canónica se deriva del *Principio de Mínima Acción* en ambos conjuntos de variables del espacio de fase.
- El Principio de Mínima Acción para las variables $\{q_i, p_i\}$, implica $S = \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{L} dt \Rightarrow \delta S = 0 \Rightarrow \delta \left( \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{L} dt \right) = 0$
- Como el Hamiltoniano $\mathcal{H}(q_i, p_i, t) = \sum_{i=1}^{s} p_i \dot{q}_i - \mathcal{L}$
- Tendremos $\delta S = \delta \left( \int_{t_1}^{t_2} \sum_{i=1}^{s} p_i \dot{q}_i - \mathcal{H} \right) dt = 0 \Leftrightarrow$ genera las ecuaciones $\dot{q}_i = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p_i}, \quad \dot{p}_i = -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial q_i}, \quad i = 1, \ldots, n$

# Principio de Mínima Acción 1/2

- La condición para que una transformación $\{q_i, p_i\} \to \{Q_i, P_i\}$ sea canónica se deriva del *Principio de Mínima Acción* en ambos conjuntos de variables del espacio de fase.
- El Principio de Mínima Acción para las variables $\{q_i, p_i\}$, implica $S = \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{L} dt \Rightarrow \delta S = 0 \Rightarrow \delta \left( \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{L} dt \right) = 0$
- Como el Hamiltoniano $\mathcal{H}(q_i, p_i, t) = \sum_{i=1}^{s} p_i \dot{q}_i - \mathcal{L}$
- Tendremos $\delta S = \delta \left( \int_{t_1}^{t_2} \sum_{i=1}^{s} p_i \dot{q}_i - \mathcal{H} \right) dt = 0 \Leftrightarrow$ genera las ecuaciones $\dot{q}_i = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p_i}, \quad \dot{p}_i = -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial q_i}, \quad i = 1, \ldots, n$
- Por su parte $\delta \tilde{S} = \delta \left( \int_{t_1}^{t_2} \sum_{i=1}^{s} P_i \dot{Q}_i - \tilde{\mathcal{H}} \right) dt = 0$ genera $\dot{Q}_i = \frac{\partial \tilde{\mathcal{H}}}{\partial P_i}, \quad \dot{P}_i = -\frac{\partial \tilde{\mathcal{H}}}{\partial Q_i}, \quad i = 1, \ldots, n$

# Principio de Mínima Acción 2/2

- Como las variaciones $\delta S = 0$ y $\delta \tilde{S} = 0$ de forma independiente generan las correspondientes ecuaciones de Hamilton para las variables $\{q_i, p_i\}$ y $\{Q_i, P_i\}$ .

# Principio de Mínima Acción 2/2

- Como las variaciones $\delta S = 0$ y $\delta \tilde{S} = 0$ de forma independiente generan las correspondientes ecuaciones de Hamilton para las variables $\{q_i, p_i\}$ y $\{Q_i, P_i\}$ .
- Ambas formulaciones del Principio de Mínima Acción conducen a ecuaciones equivalentes si los integrandos difieren, en una derivada total $\sum_{i=1}^{s} p_i \dot{q}_i - \mathcal{H} = \sum_{i=1}^{s} P_i \dot{Q}_i - \tilde{\mathcal{H}} + \frac{d\mathcal{F}}{dt}$

# Principio de Mínima Acción 2/2

- Como las variaciones $\delta S = 0$ y $\delta \tilde{S} = 0$ de forma independiente generan las correspondientes ecuaciones de Hamilton para las variables $\{q_i, p_i\}$ y $\{Q_i, P_i\}$ .
- Ambas formulaciones del Principio de Mínima Acción conducen a ecuaciones equivalentes si los integrandos difieren, en una derivada total $\sum_{i=1}^{s} p_i \dot{q}_i - \mathcal{H} = \sum_{i=1}^{s} P_i \dot{Q}_i - \tilde{\mathcal{H}} + \frac{d\mathcal{F}}{dt}$
- Con lo cual $\frac{d\mathcal{F}}{dt} = \sum_{i=1}^{s} p_i \dot{q}_i - \sum_{i=1}^{s} P_i \dot{Q}_i + \left(\tilde{\mathcal{H}} - \mathcal{H}\right)$

# Principio de Mínima Acción 2/2

- Como las variaciones $\delta S = 0$ y $\delta \tilde{S} = 0$ de forma independiente generan las correspondientes ecuaciones de Hamilton para las variables $\{q_i, p_i\}$ y $\{Q_i, P_i\}$ .
- Ambas formulaciones del Principio de Mínima Acción conducen a ecuaciones equivalentes si los integrandos difieren, en una derivada total $\sum_{i=1}^{s} p_i \dot{q}_i - \mathcal{H} = \sum_{i=1}^{s} P_i \dot{Q}_i - \tilde{\mathcal{H}} + \frac{d\mathcal{F}}{dt}$
- Con lo cual $\frac{d\mathcal{F}}{dt} = \sum_{i=1}^{s} p_i \dot{q}_i - \sum_{i=1}^{s} P_i \dot{Q}_i + \left(\tilde{\mathcal{H}} - \mathcal{H}\right)$
- La función $\mathcal{F}$ se llama función generadora de la transformación canónica $\{q_i, p_i\} \to \{Q_i, P_i\}$.

# Función Generadora

- Dada una $\mathcal{F}(q_i, p_i, Q_i, P_i, t)$, su derivada total $\frac{d\mathcal{F}}{dt}$ debe satisfacer la condición $\frac{d\mathcal{F}}{dt} = \sum_{i=1}^{s} p_i \dot{q}_i - \sum_{i=1}^{s} P_i \dot{Q}_i + \left(\tilde{\mathcal{H}} - \mathcal{H}\right)$ para que la transformación $\{q_i, p_i\} \to \{Q_i, P_i\}$ sea canónica.

# Función Generadora

- Dada una $\mathcal{F}(q_i, p_i, Q_i, P_i, t)$, su derivada total $\frac{d\mathcal{F}}{dt}$ debe satisfacer la condición $\frac{d\mathcal{F}}{dt} = \sum_{i=1}^{s} p_i \dot{q}_i - \sum_{i=1}^{s} P_i \dot{Q}_i + \left(\tilde{\mathcal{H}} - \mathcal{H}\right)$ para que la transformación $\{q_i, p_i\} \to \{Q_i, P_i\}$ sea canónica.
- Las derivadas parciales de $\mathcal{F}$ con respecto a sus argumentos, contenidas en la expresión de $\frac{d\mathcal{F}}{dt}$, permiten establecer la relación entre las variables $\{Q_i, P_i\}$ y $\{q_i, p_i\}$ y los tipos de función generadora.

# Función Generadora

- Dada una $\mathcal{F}(q_i, p_i, Q_i, P_i, t)$, su derivada total $\frac{d\mathcal{F}}{dt}$ debe satisfacer la condición $\frac{d\mathcal{F}}{dt} = \sum_{i=1}^{s} p_i \dot{q}_i - \sum_{i=1}^{s} P_i \dot{Q}_i + \left(\tilde{\mathcal{H}} - \mathcal{H}\right)$ para que la transformación $\{q_i, p_i\} \to \{Q_i, P_i\}$ sea canónica.
- Las derivadas parciales de $\mathcal{F}$ con respecto a sus argumentos, contenidas en la expresión de $\frac{d\mathcal{F}}{dt}$, permiten establecer la relación entre las variables $\{Q_i, P_i\}$ y $\{q_i, p_i\}$ y los tipos de función generadora.
- La transformación canónica asociada a una función generadora $\mathcal{F}$ es una propiedad característica de la función $\mathcal{F}$ y no depende del Hamiltoniano de un sistema específico.

# Función Generadora

- Dada una $\mathcal{F}(q_i, p_i, Q_i, P_i, t)$, su derivada total $\frac{d\mathcal{F}}{dt}$ debe satisfacer la condición $\frac{d\mathcal{F}}{dt} = \sum_{i=1}^{s} p_i \dot{q}_i - \sum_{i=1}^{s} P_i \dot{Q}_i + \left(\tilde{\mathcal{H}} - \mathcal{H}\right)$ para que la transformación $\{q_i, p_i\} \to \{Q_i, P_i\}$ sea canónica.
- Las derivadas parciales de $\mathcal{F}$ con respecto a sus argumentos, contenidas en la expresión de $\frac{d\mathcal{F}}{dt}$, permiten establecer la relación entre las variables $\{Q_i, P_i\}$ y $\{q_i, p_i\}$ y los tipos de función generadora.
- La transformación canónica asociada a una función generadora $\mathcal{F}$ es una propiedad característica de la función $\mathcal{F}$ y no depende del Hamiltoniano de un sistema específico.
- Dada una función generadora $\mathcal{F}$, es posible encontrar una transformación canónica asociada a $\mathcal{F}$.

# Función Generadora

- Dada una $\mathcal{F}(q_i, p_i, Q_i, P_i, t)$, su derivada total $\frac{d\mathcal{F}}{dt}$ debe satisfacer la condición $\frac{d\mathcal{F}}{dt} = \sum_{i=1}^{s} p_i \dot{q}_i - \sum_{i=1}^{s} P_i \dot{Q}_i + (\tilde{\mathcal{H}} - \mathcal{H})$ para que la transformación $\{q_i, p_i\} \to \{Q_i, P_i\}$ sea canónica.
- Las derivadas parciales de $\mathcal{F}$ con respecto a sus argumentos, contenidas en la expresión de $\frac{d\mathcal{F}}{dt}$, permiten establecer la relación entre las variables $\{Q_i, P_i\}$ y $\{q_i, p_i\}$ y los tipos de función generadora.
- La transformación canónica asociada a una función generadora $\mathcal{F}$ es una propiedad característica de la función $\mathcal{F}$ y no depende del Hamiltoniano de un sistema específico.
- Dada una función generadora $\mathcal{F}$, es posible encontrar una transformación canónica asociada a $\mathcal{F}$.
- Dada una transformación canónica, en principio es posible obtener la función generadora, $\mathcal{F}$, que produce esa transformación.

# Función Generadora

- Dada una $\mathcal{F}(q_i, p_i, Q_i, P_i, t)$, su derivada total $\frac{d\mathcal{F}}{dt}$ debe satisfacer la condición $\frac{d\mathcal{F}}{dt} = \sum_{i=1}^{s} p_i \dot{q}_i - \sum_{i=1}^{s} P_i \dot{Q}_i + \left(\tilde{\mathcal{H}} - \mathcal{H}\right)$ para que la transformación $\{q_i, p_i\} \to \{Q_i, P_i\}$ sea canónica.
- Las derivadas parciales de $\mathcal{F}$ con respecto a sus argumentos, contenidas en la expresión de $\frac{d\mathcal{F}}{dt}$, permiten establecer la relación entre las variables $\{Q_i, P_i\}$ y $\{q_i, p_i\}$ y los tipos de función generadora.
- La transformación canónica asociada a una función generadora $\mathcal{F}$ es una propiedad característica de la función $\mathcal{F}$ y no depende del Hamiltoniano de un sistema específico.
- Dada una función generadora $\mathcal{F}$, es posible encontrar una transformación canónica asociada a $\mathcal{F}$.
- Dada una transformación canónica, en principio es posible obtener la función generadora, $\mathcal{F}$, que produce esa transformación.
- La relación entre el Hamiltoniano $\mathcal{H}(q_i, p_i, t)$ y el Hamiltoniano transformado $\tilde{\mathcal{H}}(Q_i, P_i, t)$ resultante de la transformación canónica $\{q_i, p_i, t\} \to \{Q_i, P_i, t\}$ generada por una $\mathcal{F}$ siempre es $\tilde{\mathcal{H}} = \mathcal{H} + \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial t}$

# Ejemplo de Función Generadora 1/2

Encontrar la transformación canónica $\{q_i, p_i\} \to \{Q_i, P_i\}$ , $i = 1, 2$, generada por la función $\mathcal{G} = q_1 (P_1 + 2p_2) + p_2 P_2$.

- $\mathcal{G}(q_1, P_1, p_2, P_2) \Rightarrow \frac{d\mathcal{G}}{dt} = \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial q_1}\dot{q}_1 + \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial P_1}\dot{P}_1 + \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial p_2}\dot{p}_2 + \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial P_2}\dot{P}_2 \Rightarrow$ $\frac{d\mathcal{G}}{dt} = (P_1 + 2p_2)\dot{q}_1 + q_1\dot{P}_1 + (2q_1 + P_2)\dot{p}_2 + p_2\dot{P}_2$

# Ejemplo de Función Generadora 1/2

Encontrar la transformación canónica $\{q_i, p_i\} \rightarrow \{Q_i, P_i\}$, $i = 1, 2$, generada por la función $\mathcal{G} = q_1 (P_1 + 2p_2) + p_2 P_2$.

- $\mathcal{G}(q_1, P_1, p_2, P_2) \Rightarrow \frac{d\mathcal{G}}{dt} = \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial q_1}\dot{q}_1 + \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial P_1}\dot{P}_1 + \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial p_2}\dot{p}_2 + \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial P_2}\dot{P}_2 \Rightarrow$
  $\frac{d\mathcal{G}}{dt} = (P_1 + 2p_2)\dot{q}_1 + q_1 \dot{P}_1 + (2q_1 + P_2)\dot{p}_2 + p_2 \dot{P}_2$
- Comparando con $\frac{d\mathcal{F}}{dt} = \sum_{i=1}^{2} p_i \dot{q}_i - \sum_{i=1}^{2} P_i \dot{Q}_i + \left(\tilde{\mathcal{H}} - \mathcal{H}\right) \Rightarrow$
  $\frac{d\mathcal{F}}{dt} = p_1 \dot{q}_1 + p_2 \dot{q}_2 - P_1 \dot{Q}_1 - P_2 \dot{Q}_2 + \left(\tilde{\mathcal{H}} - \mathcal{H}\right)$

Encontrar la transformación canónica $\{q_i, p_i\} \rightarrow \{Q_i, P_i\}$, $i = 1, 2$, generada por la función $\mathcal{G} = q_1 (P_1 + 2p_2) + p_2 P_2$.

- $\mathcal{G}(q_1, P_1, p_2, P_2) \Rightarrow \frac{d\mathcal{G}}{dt} = \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial q_1}\dot{q}_1 + \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial P_1}\dot{P}_1 + \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial p_2}\dot{p}_2 + \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial P_2}\dot{P}_2 \Rightarrow$ $\frac{d\mathcal{G}}{dt} = (P_1 + 2p_2)\dot{q}_1 + q_1\dot{P}_1 + (2q_1 + P_2)\dot{p}_2 + p_2\dot{P}_2$
- Comparando con $\frac{d\mathcal{F}}{dt} = \sum_{i=1}^{2} p_i\dot{q}_i - \sum_{i=1}^{2} P_i\dot{Q}_i + \left(\tilde{\mathcal{H}} - \mathcal{H}\right) \Rightarrow$ $\frac{d\mathcal{F}}{dt} = p_1\dot{q}_1 + p_2\dot{q}_2 - P_1\dot{Q}_1 - P_2\dot{Q}_2 + \left(\tilde{\mathcal{H}} - \mathcal{H}\right)$
- Para llevarlo a esa forma hacemos $p_2\dot{q}_2 = \frac{d}{dt}(p_2 q_2) - q_2\dot{p}_2$; $P_1\dot{Q}_1 = \frac{d}{dt}(P_1 Q_1) - Q_1\dot{P}_1$; $\quad P_2\dot{Q}_2 = \frac{d}{dt}(P_2 Q_2) - Q_2\dot{P}_2$

# Ejemplo de Función Generadora 1/2

Encontrar la transformación canónica $\{q_i, p_i\} \to \{Q_i, P_i\}$, $i = 1, 2$, generada por la función $\mathcal{G} = q_1 (P_1 + 2p_2) + p_2 P_2$.

- $\mathcal{G}(q_1, P_1, p_2, P_2) \Rightarrow \frac{d\mathcal{G}}{dt} = \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial q_1}\dot{q}_1 + \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial P_1}\dot{P}_1 + \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial p_2}\dot{p}_2 + \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial P_2}\dot{P}_2 \Rightarrow$
  $\frac{d\mathcal{G}}{dt} = (P_1 + 2p_2)\dot{q}_1 + q_1 \dot{P}_1 + (2q_1 + P_2)\dot{p}_2 + p_2 \dot{P}_2$
- Comparando con $\frac{d\mathcal{F}}{dt} = \sum_{i=1}^{2} p_i \dot{q}_i - \sum_{i=1}^{2} P_i \dot{Q}_i + \left(\tilde{\mathcal{H}} - \mathcal{H}\right) \Rightarrow$
  $\frac{d\mathcal{F}}{dt} = p_1 \dot{q}_1 + p_2 \dot{q}_2 - P_1 \dot{Q}_1 - P_2 \dot{Q}_2 + \left(\tilde{\mathcal{H}} - \mathcal{H}\right)$
- Para llevarlo a esa forma hacemos $p_2 \dot{q}_2 = \frac{d}{dt}(p_2 q_2) - q_2 \dot{p}_2$;
  $P_1 \dot{Q}_1 = \frac{d}{dt}(P_1 Q_1) - Q_1 \dot{P}_1$; $\quad P_2 \dot{Q}_2 = \frac{d}{dt}(P_2 Q_2) - Q_2 \dot{P}_2$
- Con lo cual $\frac{d\mathcal{F}}{dt} =$
  $p_1 \dot{q}_1 - q_2 \dot{p}_2 + Q_1 \dot{P}_1 + Q_2 \dot{P}_2 + \frac{d}{dt}(p_2 q_2 - P_1 Q_1 - P_2 Q_2) + \left(\tilde{\mathcal{H}} - \mathcal{H}\right)$

# Ejemplo de Función Generadora 2/2

- Es decir $\frac{d}{dt}\left(\mathcal{F} + P_1 Q_1 + P_2 Q_2 - p_2 q_2\right) = p_1 \dot{q}_1 - q_2 \dot{p}_2 + Q_1 \dot{P}_1 + Q_2 \dot{P}_2 + \left(\tilde{\mathcal{H}} - \mathcal{H}\right)$

# Ejemplo de Función Generadora 2/2

- Es decir $\frac{d}{dt}\left(\mathcal{F} + P_1 Q_1 + P_2 Q_2 - p_2 q_2\right) =$
$p_1 \dot{q}_1 - q_2 \dot{p}_2 + Q_1 \dot{P}_1 + Q_2 \dot{P}_2 + \left(\tilde{\mathcal{H}} - \mathcal{H}\right)$
- El lado izquierdo es la derivada total de una función que depende de las variables $\left(q_i, p_i, Q_i, P_i\right), i = 1, 2,$

# Ejemplo de Función Generadora 2/2

- Es decir $\frac{d}{dt}\left(\mathcal{F} + P_1 Q_1 + P_2 Q_2 - p_2 q_2\right) = p_1 \dot{q}_1 - q_2 \dot{p}_2 + Q_1 \dot{P}_1 + Q_2 \dot{P}_2 + \left(\tilde{\mathcal{H}} - \mathcal{H}\right)$
- El lado izquierdo es la derivada total de una función que depende de las variables $(q_i, p_i, Q_i, P_i)$, $i = 1, 2$,
- Comparando con $\frac{d\mathcal{G}}{dt} = (P_1 + 2p_2)\, \dot{q}_1 + q_1 \dot{P}_1 + (2q_1 + P_2)\, \dot{p}_2 + p_2 \dot{P}_2$

- Es decir $\frac{d}{dt}\left(\mathcal{F}+P_1Q_1+P_2Q_2-p_2q_2\right)=$
  $p_1\dot{q}_1-q_2\dot{p}_2+Q_1\dot{P}_1+Q_2\dot{P}_2+\left(\tilde{\mathcal{H}}-\mathcal{H}\right)$
- El lado izquierdo es la derivada total de una función que depende de las variables $\left(q_i,p_i,Q_i,P_i\right),i=1,2,$
- Comparando con $\frac{d\mathcal{G}}{dt}=\left(P_1+2p_2\right)\dot{q}_1+q_1\dot{P}_1+\left(2q_1+P_2\right)\dot{p}_2+p_2\dot{P}_2$
- Tenemos $\mathcal{G}=\mathcal{F}+P_1Q_1+P_2Q_2-p_2q_2; \quad p_1=P_1+2p_2;$
  $Q_1=q_1; \quad -q_2=2q_1+P_2; \quad Q_2=p_2$

Universidad Industrial de Santander
CONSTRUIMOS FUTURO

- Es decir $\frac{d}{dt}\left(\mathcal{F} + P_1 Q_1 + P_2 Q_2 - p_2 q_2\right) = p_1 \dot{q}_1 - q_2 \dot{p}_2 + Q_1 \dot{P}_1 + Q_2 \dot{P}_2 + \left(\tilde{\mathcal{H}} - \mathcal{H}\right)$
- El lado izquierdo es la derivada total de una función que depende de las variables $(q_i, p_i, Q_i, P_i)$ , $i = 1, 2$,
- Comparando con $\frac{d\mathcal{G}}{dt} = (P_1 + 2p_2)\,\dot{q}_1 + q_1 \dot{P}_1 + (2q_1 + P_2)\,\dot{p}_2 + p_2 \dot{P}_2$
- Tenemos $\mathcal{G} = \mathcal{F} + P_1 Q_1 + P_2 Q_2 - p_2 q_2; \quad p_1 = P_1 + 2p_2;$ $Q_1 = q_1; \quad -q_2 = 2q_1 + P_2; \quad Q_2 = p_2$
- La transformación canónica $\{q_i, p_i\} \to \{Q_i, P_i\}$ generada por $G$ es $P_1 = p_1 - 2p_2 \quad Q_1 = q_1; \quad P_2 = -2q_1 - q_2 \quad Q_2 = p_2.$

# Tipos de Funciones Generadoras

| Funciones Generadoras | Funciones Generadadoras y derivadas | Un ejemplo sencillo |
|---|---|---|
| $\mathcal{F} = \mathcal{F}_1(q, Q, t)$ | $p_i = \frac{\partial \mathcal{F}_1}{\partial q_i}; \quad P_i = -\frac{\partial \mathcal{F}_1}{\partial Q_i}$ | $\mathcal{F}_1 = q_i Q_i, \quad Q_i = p_i, \quad P_i = -q_i$ |
| $\mathcal{F} = \mathcal{F}_2(q, P, t) - Q_i P_i$ | $p_i = \frac{\partial \mathcal{F}_2}{\partial q_i}; \quad Q_i = \frac{\partial \mathcal{F}_2}{\partial P_i}$ | $\mathcal{F}_2 = q_i P_i, \quad Q_i = q_i, \quad P_i = p_i$ |
| $\mathcal{F} = \mathcal{F}_3(p, Q, t) + q_i p_i$ | $q_i = -\frac{\partial \mathcal{F}_3}{\partial p_i}; \quad P_i = -\frac{\partial \mathcal{F}_3}{\partial Q_i}$ | $\mathcal{F}_3 = p_i Q_i, \quad Q_i = -q_i, \quad P_i = -p_i$ |
| $\mathcal{F} = \mathcal{F}_4(p, P, t) + q_i p_i - Q_i P_i$ | $q_i = -\frac{\partial \mathcal{F}_4}{\partial p_i}; \quad Q_i = \frac{\partial \mathcal{F}_4}{\partial P_i}$ | $\mathcal{F}_4 = p_i P_i, \quad Q_i = p_i, \quad P_i = -q_i$ |

# Ejemplo: $Q = q + e^p \quad \& \quad P = p$

Dada una transformación $Q = q + e^p \quad \& \quad P = p$, encontrar sus función generadora

- Para encontrar la función generadora $F$ supondremos una función generadora del tipo $F_2(q, P)$, que depende de $q$ y $P$

# Ejemplo: $Q = q + e^p \quad \& \quad P = p$

Dada una transformación $Q = q + e^p \quad \& \quad P = p$, encontrar sus función generadora

- Para encontrar la función generadora $F$ supondremos una función generadora del tipo $F_2(q, P)$, que depende de $q$ y $P$
- Las relaciones para $F_2(q, P)$ son: $p = \frac{\partial F_2}{\partial q}$ y $Q = \frac{\partial F_2}{\partial P}$

Dada una transformación $Q = q + e^p \quad \& \quad P = p$, encontrar sus función generadora

- Para encontrar la función generadora $F$ supondremos una función generadora del tipo $F_2(q, P)$, que depende de $q$ y $P$
- Las relaciones para $F_2(q, P)$ son: $p = \frac{\partial F_2}{\partial q}$ y $Q = \frac{\partial F_2}{\partial P}$
- Sustituyendo $p = P$ en $Q = q + e^P$, como $Q = \frac{\partial F_2}{\partial P} \Rightarrow$, $F_2(q, P) = qP + \int e^P \, dP \Rightarrow F_2(q, P) = qP + e^P + C$ y $C = 0$

# Ejemplo: $Q = q + e^p \quad \& \quad P = p$

Dada una transformación $Q = q + e^p \quad \& \quad P = p$, encontrar sus función generadora

- Para encontrar la función generadora $F$ supondremos una función generadora del tipo $F_2(q, P)$, que depende de $q$ y $P$
- Las relaciones para $F_2(q, P)$ son: $p = \frac{\partial F_2}{\partial q}$ y $Q = \frac{\partial F_2}{\partial P}$
- Sustituyendo $p = P$ en $Q = q + e^P$, como $Q = \frac{\partial F_2}{\partial P} \Rightarrow$, $F_2(q, P) = qP + \int e^P \, dP \Rightarrow F_2(q, P) = qP + e^P + C$ y $\quad C = 0$
- La función generadora es $F_2(q, P) = qP + e^P$

# Paréntesis de Poisson: Definición

- Sea una función $f\left(q_i, p_i, t\right)$ en el espacio de fase $\left(q_i, p_i\right)$, $i = 1, \ldots, s$, de un sistema mecánico con un Hamiltoniano $\mathcal{H}\left(q_i, p_i, t\right)$.

# Paréntesis de Poisson: Definición

- Sea una función $f\left(q_i, p_i, t\right)$ en el espacio de fase $\left(q_i, p_i\right)$, $i = 1, \ldots, s$, de un sistema mecánico con un Hamiltoniano $\mathcal{H}\left(q_i, p_i, t\right)$.
- La derivada total de $f$ es $\frac{df}{dt} = \sum_{i=1}^{s}\left(\frac{\partial f}{\partial q_i}\dot{q}_i + \frac{\partial f}{\partial p_i}\dot{p}_i\right) + \frac{\partial f}{\partial t}$.

# Paréntesis de Poisson: Definición

- Sea una función $f\left(q_i, p_i, t\right)$ en el espacio de fase $\left(q_i, p_i\right)$, $i = 1, \ldots, s$, de un sistema mecánico con un Hamiltoniano $\mathcal{H}\left(q_i, p_i, t\right)$.
- La derivada total de $f$ es $\frac{df}{dt} = \sum_{i=1}^{s}\left(\frac{\partial f}{\partial q_i}\dot{q}_i + \frac{\partial f}{\partial p_i}\dot{p}_i\right) + \frac{\partial f}{\partial t}$.
- Sus ecuaciones de Hamilton son $\dot{q}_i = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p_i}, \quad \dot{p}_i = -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial q_i}$

# Paréntesis de Poisson: Definición

- Sea una función $f(q_i, p_i, t)$ en el espacio de fase $(q_i, p_i)$, $i = 1, \ldots, s$, de un sistema mecánico con un Hamiltoniano $\mathcal{H}(q_i, p_i, t)$.
- La derivada total de $f$ es $\frac{df}{dt} = \sum_{i=1}^{s} \left( \frac{\partial f}{\partial q_i} \dot{q}_i + \frac{\partial f}{\partial p_i} \dot{p}_i \right) + \frac{\partial f}{\partial t}$.
- Sus ecuaciones de Hamilton son $\dot{q}_i = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p_i}, \quad \dot{p}_i = -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial q_i}$
- Sustituyendo, tenemos $\frac{df}{dt} = \sum_{i=1}^{s} \left( \frac{\partial f}{\partial q_i} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p_i} - \frac{\partial f}{\partial p_i} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial q_i} \right) + \frac{\partial f}{\partial t}$

# Paréntesis de Poisson: Definición

- Sea una función $f(q_i, p_i, t)$ en el espacio de fase $(q_i, p_i)$, $i = 1, \ldots, s$, de un sistema mecánico con un Hamiltoniano $\mathcal{H}(q_i, p_i, t)$.
- La derivada total de $f$ es $\frac{df}{dt} = \sum_{i=1}^{s} \left( \frac{\partial f}{\partial q_i} \dot{q}_i + \frac{\partial f}{\partial p_i} \dot{p}_i \right) + \frac{\partial f}{\partial t}$.
- Sus ecuaciones de Hamilton son $\dot{q}_i = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p_i}, \quad \dot{p}_i = -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial q_i}$
- Sustituyendo, tenemos $\frac{df}{dt} = \sum_{i=1}^{s} \left( \frac{\partial f}{\partial q_i} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p_i} - \frac{\partial f}{\partial p_i} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial q_i} \right) + \frac{\partial f}{\partial t}$
- Entonces el paréntesis de Poisson de la función $f$ para un sistema con hamiltoniano $\mathcal{H}$ es $\{f, \mathcal{H}\} \equiv \sum_{i=1}^{s} \left( \frac{\partial f}{\partial q_i} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p_i} - \frac{\partial f}{\partial p_i} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial q_i} \right)$.

# Paréntesis de Poisson: Definición

- Sea una función $f(q_i, p_i, t)$ en el espacio de fase $(q_i, p_i)$, $i = 1, \ldots, s$, de un sistema mecánico con un Hamiltoniano $\mathcal{H}(q_i, p_i, t)$.
- La derivada total de $f$ es $\frac{df}{dt} = \sum_{i=1}^{s}\left(\frac{\partial f}{\partial q_i}\dot{q}_i + \frac{\partial f}{\partial p_i}\dot{p}_i\right) + \frac{\partial f}{\partial t}$.
- Sus ecuaciones de Hamilton son $\dot{q}_i = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p_i}, \quad \dot{p}_i = -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial q_i}$
- Sustituyendo, tenemos $\frac{df}{dt} = \sum_{i=1}^{s}\left(\frac{\partial f}{\partial q_i}\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p_i} - \frac{\partial f}{\partial p_i}\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial q_i}\right) + \frac{\partial f}{\partial t}$
- Entonces el paréntesis de Poisson de la función $f$ para un sistema con hamiltoniano $\mathcal{H}$ es $\{f, \mathcal{H}\} \equiv \sum_{i=1}^{s}\left(\frac{\partial f}{\partial q_i}\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p_i} - \frac{\partial f}{\partial p_i}\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial q_i}\right)$.
- Con lo cual $\frac{df}{dt} = \{f, \mathcal{H}\} + \frac{\partial f}{\partial t}$

# Paréntesis de Poisson: Definición

- Sea una función $f(q_i, p_i, t)$ en el espacio de fase $(q_i, p_i)$, $i = 1, \ldots, s$, de un sistema mecánico con un Hamiltoniano $\mathcal{H}(q_i, p_i, t)$.
- La derivada total de $f$ es $\frac{df}{dt} = \sum_{i=1}^{s} \left( \frac{\partial f}{\partial q_i} \dot{q}_i + \frac{\partial f}{\partial p_i} \dot{p}_i \right) + \frac{\partial f}{\partial t}$.
- Sus ecuaciones de Hamilton son $\dot{q}_i = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p_i}, \quad \dot{p}_i = -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial q_i}$
- Sustituyendo, tenemos $\frac{df}{dt} = \sum_{i=1}^{s} \left( \frac{\partial f}{\partial q_i} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p_i} - \frac{\partial f}{\partial p_i} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial q_i} \right) + \frac{\partial f}{\partial t}$
- Entonces el paréntesis de Poisson de la función $f$ para un sistema con hamiltoniano $\mathcal{H}$ es $\{f, \mathcal{H}\} \equiv \sum_{i=1}^{s} \left( \frac{\partial f}{\partial q_i} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p_i} - \frac{\partial f}{\partial p_i} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial q_i} \right)$.
- Con lo cual $\frac{df}{dt} = \{f, \mathcal{H}\} + \frac{\partial f}{\partial t}$
- Si $f$ no depende explícitamente del tiempo (cantidad conservada), tenemos $\{f, \mathcal{H}\} = 0$

# Paréntesis de Poisson: Definición

- Sea una función $f(q_i, p_i, t)$ en el espacio de fase $(q_i, p_i)$, $i = 1, \ldots, s$, de un sistema mecánico con un Hamiltoniano $\mathcal{H}(q_i, p_i, t)$.
- La derivada total de $f$ es $\frac{df}{dt} = \sum_{i=1}^{s} \left( \frac{\partial f}{\partial q_i} \dot{q}_i + \frac{\partial f}{\partial p_i} \dot{p}_i \right) + \frac{\partial f}{\partial t}$.
- Sus ecuaciones de Hamilton son $\dot{q}_i = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p_i}, \quad \dot{p}_i = -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial q_i}$
- Sustituyendo, tenemos $\frac{df}{dt} = \sum_{i=1}^{s} \left( \frac{\partial f}{\partial q_i} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p_i} - \frac{\partial f}{\partial p_i} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial q_i} \right) + \frac{\partial f}{\partial t}$
- Entonces el paréntesis de Poisson de la función $f$ para un sistema con hamiltoniano $\mathcal{H}$ es $\{f, \mathcal{H}\} \equiv \sum_{i=1}^{s} \left( \frac{\partial f}{\partial q_i} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p_i} - \frac{\partial f}{\partial p_i} \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial q_i} \right)$.
- Con lo cual $\frac{df}{dt} = \{f, \mathcal{H}\} + \frac{\partial f}{\partial t}$
- Si $f$ no depende explícitamente del tiempo (cantidad conservada), tenemos $\{f, \mathcal{H}\} = 0$
- Para $f(q_i, p_i, t)$ y $g(q_i, p_i, t)$ podemos definir el paréntesis de Poisson de $f$ y $g$ como $\{f, g\} \equiv \sum_{i=1}^{s} \left( \frac{\partial f}{\partial q_i} \frac{\partial g}{\partial p_i} - \frac{\partial f}{\partial p_i} \frac{\partial g}{\partial q_i} \right)$.

# Paréntesis de Poisson: Propiedades 1/2

- El paréntesis de Poisson puede ser considerado como una operación entre dos funciones definidas en un espacio algebraico que asigna otra función en ese espacio.

- El paréntesis de Poisson puede ser considerado como una operación entre dos funciones definidas en un espacio algebraico que asigna otra función en ese espacio.
- El paréntesis de Poisson, como operación algebraica, posee las siguientes propiedades (características de un álgebra de Lie):
  - $\{f, g\} = -\{g, f\}, \quad \{f, f\} = 0 \quad$ (antisimetría).
  - $\{f, c\} = 0, \quad$ si $c =$ cte.
  - $\{af_1 + bf_2, g\} = a\{f_1, g\} + b\{f_2, g\}, \quad a, b =$ ctes, un operador lineal.
  - $\{f_1 f_2, g\} = f_1\{f_2, g\} + f_2\{f_1, g\}, \quad$ (no asociativo).
  - $\{f, \{g, \mathcal{H}\}\} + \{g, \{h, f\}\} + \{h, \{f, g\}\} = 0 \quad$ la identidad de Jacobi.

# Paréntesis de Poisson: Propiedades 2/2

- Como $p_i$ y $q_i$ representan coordenadas independientes tenemos

$$\{q_i, f\} = \sum_{k=1}^{s} \left( \frac{\partial q_i}{\partial q_k} \frac{\partial f}{\partial p_k} - \cancelto{0}{\frac{\partial q_k}{\partial p_k}} \frac{\partial f}{\partial q_k} \right) = \sum_{k=1}^{s} \delta_{ik} \frac{\partial f}{\partial p_k} = \frac{\partial f}{\partial p_i}$$

$$\{p_i, f\} = \sum_{k=1}^{s} \left( \cancelto{0}{\frac{\partial p_i}{\partial q_k}} \frac{\partial f}{\partial p_k} - \frac{\partial p_i}{\partial p_k} \frac{\partial f}{\partial q_k} \right) = -\sum_{k=1}^{s} \delta_{ik} \frac{\partial f}{\partial q_k} = -\frac{\partial f}{\partial q_i}.$$

- Como $p_i$ y $q_i$ representan coordenadas independientes tenemos

$$\{q_i, f\} = \sum_{k=1}^{s} \left( \frac{\partial q_i}{\partial q_k}\frac{\partial f}{\partial p_k} - \cancelto{0}{\frac{\partial q_k}{\partial p_k}}\frac{\partial f}{\partial q_k} \right) = \sum_{k=1}^{s} \delta_{ik}\frac{\partial f}{\partial p_k} = \frac{\partial f}{\partial p_i}$$

$$\{p_i, f\} = \sum_{k=1}^{s} \left( \cancelto{0}{\frac{\partial p'}{\partial q_k}}\frac{\partial f}{\partial p_k} - \frac{\partial p_i}{\partial p_k}\frac{\partial f}{\partial q_k} \right) = -\sum_{k=1}^{s} \delta_{ik}\frac{\partial f}{\partial q_k} = -\frac{\partial f}{\partial q_i}.$$

- Si $f = p_j$, ó $f = q_j$, $\Rightarrow \{q_i, q_j\} = 0, \quad \{p_i, p_j\} = 0, \quad \{q_i, p_j\} = \delta_{ij}$

# Paréntesis de Poisson: Propiedades 2/2

- Como $p_i$ y $q_i$ representan coordenadas independientes tenemos

$$\{q_i, f\} = \sum_{k=1}^{s} \left( \frac{\partial q_i}{\partial q_k} \frac{\partial f}{\partial p_k} - \cancelto{0}{\frac{\partial q_k}{\partial p_k}} \frac{\partial f}{\partial q_k} \right) = \sum_{k=1}^{s} \delta_{ik} \frac{\partial f}{\partial p_k} = \frac{\partial f}{\partial p_i}$$

$$\{p_i, f\} = \sum_{k=1}^{s} \left( \cancelto{0}{\frac{\partial p_i}{\partial q_k}} \frac{\partial f}{\partial p_k} - \frac{\partial p_i}{\partial p_k} \frac{\partial f}{\partial q_k} \right) = -\sum_{k=1}^{s} \delta_{ik} \frac{\partial f}{\partial q_k} = -\frac{\partial f}{\partial q_i}.$$

- Si $f = p_j$, ó $f = q_j$, $\Rightarrow \{q_i, q_j\} = 0, \quad \{p_i, p_j\} = 0, \quad \{q_i, p_j\} = \delta_{ij}$
- Las ecuaciones de Hamilton pueden escribirse como
$\dot{q}_i = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p_i} = \{q_i, \mathcal{H}\} \quad \dot{p}_i = -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial q_i} = \{p_i, \mathcal{H}\}$

# Paréntesis de Poisson: Propiedades 2/2

- Como $p_i$ y $q_i$ representan coordenadas independientes tenemos

$$\{q_i, f\} = \sum_{k=1}^{s}\left(\frac{\partial q_i}{\partial q_k}\frac{\partial f}{\partial p_k} - \cancelto{0}{\frac{\partial q_k}{\partial p_k}}\frac{\partial f}{\partial q_k}\right) = \sum_{k=1}^{s}\delta_{ik}\frac{\partial f}{\partial p_k} = \frac{\partial f}{\partial p_i}$$

$$\{p_i, f\} = \sum_{k=1}^{s}\left(\cancelto{0}{\frac{\partial p_i}{\partial q_k}}\frac{\partial f}{\partial p_k} - \frac{\partial p_i}{\partial p_k}\frac{\partial f}{\partial q_k}\right) = -\sum_{k=1}^{s}\delta_{ik}\frac{\partial f}{\partial q_k} = -\frac{\partial f}{\partial q_i}.$$

- Si $f = p_j$, ó $f = q_j$, $\Rightarrow \{q_i, q_j\} = 0, \quad \{p_i, p_j\} = 0, \quad \{q_i, p_j\} = \delta_{ij}$
- Las ecuaciones de Hamilton pueden escribirse como
  $\dot{q}_i = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p_i} = \{q_i, \mathcal{H}\} \quad \dot{p}_i = -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial q_i} = \{p_i, \mathcal{H}\}$
- En Mecánica Cuántica, la operación $[A, B] = AB - BA$ es el conmutador de los operadores u observables $A$ y $B$.

# Paréntesis de Poisson: Propiedades 2/2

- Como $p_i$ y $q_i$ representan coordenadas independientes tenemos

$$\{q_i, f\} = \sum_{k=1}^{s} \left( \frac{\partial q_i}{\partial q_k}\frac{\partial f}{\partial p_k} - \cancelto{0}{\frac{\partial q_i}{\partial p_k}}\frac{\partial f}{\partial q_k} \right) = \sum_{k=1}^{s} \delta_{ik}\frac{\partial f}{\partial p_k} = \frac{\partial f}{\partial p_i}$$

$$\{p_i, f\} = \sum_{k=1}^{s} \left( \cancelto{0}{\frac{\partial p_i}{\partial q_k}}\frac{\partial f}{\partial p_k} - \frac{\partial p_i}{\partial p_k}\frac{\partial f}{\partial q_k} \right) = -\sum_{k=1}^{s} \delta_{ik}\frac{\partial f}{\partial q_k} = -\frac{\partial f}{\partial q_i}.$$

- Si $f = p_j$, ó $f = q_j$, $\Rightarrow \{q_i, q_j\} = 0, \quad \{p_i, p_j\} = 0, \quad \{q_i, p_j\} = \delta_{ij}$
- Las ecuaciones de Hamilton pueden escribirse como
  $\dot{q}_i = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p_i} = \{q_i, \mathcal{H}\} \quad \dot{p}_i = -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial q_i} = \{p_i, \mathcal{H}\}$
- En Mecánica Cuántica, la operación $[A, B] = AB - BA$ es el conmutador de los operadores u observables $A$ y $B$.
- La estructura algebraica de la Mecánica Clásica, expresada en las propiedades de los paréntesis de Poisson, se preserva en la Mecánica Cuántica. En particular, $\{q_i, p_j\} = i\hbar\delta_{ij}$, donde $\hbar$ es la constante de Planck (dividida por $2\pi$).

# Dos Ejemplos

- Calcular $\{r, \mathbf{p}\}$, donde $r = \left(x^2 + y^2 + z^2\right)^{1/2}$
    - $\{r, \mathbf{p}\} = \{r, p_x\}\,\hat{\mathbf{x}} + \{r, p_y\}\,\hat{\mathbf{y}} + \{r, p_z\}\,\hat{\mathbf{z}}$
    - $\{r, p_x\} = \sum_{i=1}^{3} \left( \frac{\partial r}{\partial q_i} \frac{\partial p_x}{\partial p_i} - \frac{\partial r}{\partial p_i} \frac{\partial p_x}{\partial q_i} \right) = \frac{\partial r}{\partial x} \frac{\partial p_x}{\partial p_x} = \frac{x}{r}$
    - $\{r, p_y\} = \frac{y}{r}, \quad \{r, p_z\} = \frac{z}{r}$
    - luego $\{r, \mathbf{p}\} = \frac{x}{r}\hat{\mathbf{x}} + \frac{y}{r}\hat{\mathbf{y}} + \frac{z}{r}\hat{\mathbf{z}} = \frac{\mathbf{r}}{r} = \hat{\mathbf{r}}$

# Dos Ejemplos

- Calcular $\{r, \mathbf{p}\}$, donde $r = \left(x^2 + y^2 + z^2\right)^{1/2}$
  - $\{r, \mathbf{p}\} = \{r, p_x\}\,\hat{\mathbf{x}} + \{r, p_y\}\,\hat{\mathbf{y}} + \{r, p_z\}\,\hat{\mathbf{z}}$
  - $\{r, p_x\} = \sum_{i=1}^{3}\left(\frac{\partial r}{\partial q_i}\frac{\partial p_x}{\partial p_i} - \frac{\partial r}{\partial p_i}\frac{\partial p_x}{\partial q_i}\right) = \frac{\partial r}{\partial x}\frac{\partial p_x}{\partial p_x} = \frac{x}{r}$
  - $\{r, p_y\} = \frac{y}{r}, \quad \{r, p_z\} = \frac{z}{r}$
  - luego $\{r, \mathbf{p}\} = \frac{x}{r}\hat{\mathbf{x}} + \frac{y}{r}\hat{\mathbf{y}} + \frac{z}{r}\hat{\mathbf{z}} = \frac{\mathbf{r}}{r} = \hat{\mathbf{r}}$
- Dadas las componentes del momento angular $\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$:

  $L_x = yp_z - zp_y, \quad L_y = zp_x - xp_z, \quad L_z = xp_y - yp_x$

  Calcular los paréntesis de Poisson para las componentes de $\mathbf{p}$ y $\mathbf{L}$:

  $\{p_y, L_x\} = -\frac{\partial L_x}{\partial y} = -p_z; \quad \{p_x, L_x\} = -\frac{\partial L_x}{\partial x} = 0;$

  $\{p_z, L_y\} = -\frac{\partial L_y}{\partial z} = -p_x$

  $\{L_x, L_y\} = \sum_{i=1}^{3}\left(\frac{\partial L_x}{\partial q_i}\frac{\partial L_y}{\partial p_i} - \frac{\partial L_x}{\partial p_i}\frac{\partial L_y}{\partial q_i}\right)$

  $\{L_x, L_y\} =$

  $\left(\frac{\partial L_x}{\partial x}\frac{\partial L_y}{\partial p_x} - \frac{\partial L_x}{\partial p_x}\frac{\partial L_y}{\partial x}\right) + \left(\frac{\partial L_x}{\partial y}\frac{\partial L_y}{\partial p_y} - \frac{\partial L_x}{\partial p_y}\frac{\partial L_y}{\partial y}\right) + \left(\frac{\partial L_x}{\partial z}\frac{\partial L_y}{\partial p_z} - \frac{\partial L_x}{\partial p_z}\frac{\partial L_y}{\partial z}\right)$

  $\{L_x, L_y\} = xp_y - yp_x = L_z; \quad \{L_y, L_z\} = L_x \quad \{L_z, L_x\} = L_y$

# Dos Ejemplos

- Calcular $\{r, \mathbf{p}\}$, donde $r = \left(x^2 + y^2 + z^2\right)^{1/2}$
  - $\{r, \mathbf{p}\} = \{r, p_x\}\,\hat{\mathbf{x}} + \{r, p_y\}\,\hat{\mathbf{y}} + \{r, p_z\}\,\hat{\mathbf{z}}$
  - $\{r, p_x\} = \sum_{i=1}^{3}\left(\frac{\partial r}{\partial q_i}\frac{\partial p_x}{\partial p_i} - \frac{\partial r}{\partial p_i}\frac{\partial p_x}{\partial q_i}\right) = \frac{\partial r}{\partial x}\frac{\partial p_x}{\partial p_x} = \frac{x}{r}$
  - $\{r, p_y\} = \frac{y}{r}, \quad \{r, p_z\} = \frac{z}{r}$
  - luego $\{r, \mathbf{p}\} = \frac{x}{r}\hat{\mathbf{x}} + \frac{y}{r}\hat{\mathbf{y}} + \frac{z}{r}\hat{\mathbf{z}} = \frac{\mathbf{r}}{r} = \hat{\mathbf{r}}$
- Dadas las componentes del momento angular $\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p}$:
  $L_x = yp_z - zp_y, \quad L_y = zp_x - xp_z, \quad L_z = xp_y - yp_x$
  Calcular los paréntesis de Poisson para las componentes de $\mathbf{p}$ y $\mathbf{L}$:
  $\{p_y, L_x\} = -\frac{\partial L_x}{\partial y} = -p_z; \quad \{p_x, L_x\} = -\frac{\partial L_x}{\partial x} = 0;$
  $\{p_z, L_y\} = -\frac{\partial L_y}{\partial z} = -p_x$
  $\{L_x, L_y\} = \sum_{i=1}^{3}\left(\frac{\partial L_x}{\partial q_i}\frac{\partial L_y}{\partial p_i} - \frac{\partial L_x}{\partial p_i}\frac{\partial L_y}{\partial q_i}\right)$
  $\{L_x, L_y\} =$
  $\left(\frac{\partial L_x}{\partial x}\frac{\partial L_y}{\partial p_x} - \frac{\partial L_x}{\partial p_x}\frac{\partial L_y}{\partial x}\right) + \left(\frac{\partial L_x}{\partial y}\frac{\partial L_y}{\partial p_y} - \frac{\partial L_x}{\partial p_y}\frac{\partial L_y}{\partial y}\right) + \left(\frac{\partial L_x}{\partial z}\frac{\partial L_y}{\partial p_z} - \frac{\partial L_x}{\partial p_z}\frac{\partial L_y}{\partial z}\right)$
  $\{L_x, L_y\} = xp_y - yp_x = L_z; \quad \{L_y, L_z\} = L_x \quad \{L_z, L_x\} = L_y$
- Entonces, $\{L_i, L_j\} = \epsilon_{ijk} L_k$. En Mecánica Cuántica, $[L_i, L_j] = i\hbar\epsilon_{ijk} L_k$.

# Paréntesis de Poisson y Transformaciones 1/2

Para una transformación canónica $Q_j = Q_j(q_k, p_k, t)$ y $P_i = P_i(q_k, p_k, t)$ se cumple que $\{Q_i, Q_j\} = 0, \quad \{P_i, P_j\} = 0, \quad \{Q_i, P_j\} = \delta_{ij}$

- Sea $Q = q + e^p \quad \& \quad P = p$

Para una transformación canónica $Q_j = Q_j(q_k, p_k, t)$ y $P_i = P_i(q_k, p_k, t)$ se cumple que $\{Q_i, Q_j\} = 0, \quad \{P_i, P_j\} = 0, \quad \{Q_i, P_j\} = \delta_{ij}$

- Sea $Q = q + e^p \quad \& \quad P = p$
- $\{Q, Q\} = \frac{\partial Q}{\partial q}\frac{\partial Q}{\partial p} - \frac{\partial Q}{\partial p}\frac{\partial Q}{\partial q} = (1)(e^p) - (e^p)(1) = 0;$

Para una transformación canónica $Q_j = Q_j(q_k, p_k, t)$ y $P_i = P_i(q_k, p_k, t)$ se cumple que $\{Q_i, Q_j\} = 0, \quad \{P_i, P_j\} = 0, \quad \{Q_i, P_j\} = \delta_{ij}$

- Sea $Q = q + e^p \quad \& \quad P = p$
- $\{Q, Q\} = \frac{\partial Q}{\partial q}\frac{\partial Q}{\partial p} - \frac{\partial Q}{\partial p}\frac{\partial Q}{\partial q} = (1)(e^p) - (e^p)(1) = 0;$
- $\{P, P\} = \frac{\partial P}{\partial q}\frac{\partial P}{\partial p} - \frac{\partial P}{\partial p}\frac{\partial P}{\partial q} = (0)(1) - (1)(0) = 0;$ y finalmente

# Paréntesis de Poisson y Transformaciones 1/2

Para una transformación canónica $Q_j = Q_j(q_k, p_k, t)$ y $P_i = P_i(q_k, p_k, t)$ se cumple que $\{Q_i, Q_j\} = 0, \quad \{P_i, P_j\} = 0, \quad \{Q_i, P_j\} = \delta_{ij}$

- Sea $Q = q + e^p \quad \& \quad P = p$
- $\{Q, Q\} = \frac{\partial Q}{\partial q}\frac{\partial Q}{\partial p} - \frac{\partial Q}{\partial p}\frac{\partial Q}{\partial q} = (1)(e^p) - (e^p)(1) = 0;$
- $\{P, P\} = \frac{\partial P}{\partial q}\frac{\partial P}{\partial p} - \frac{\partial P}{\partial p}\frac{\partial P}{\partial q} = (0)(1) - (1)(0) = 0;$ y finalmente
- $\{Q, P\} = \frac{\partial Q}{\partial q}\frac{\partial P}{\partial p} - \frac{\partial Q}{\partial p}\frac{\partial P}{\partial q}$. Calculando cada una $\frac{\partial Q}{\partial q} = 1$, $\frac{\partial Q}{\partial p} = e^p$, $\frac{\partial P}{\partial q} = 0$, y $\frac{\partial P}{\partial p} = 1$, obtenemos $\{Q, P\} = (1)(1) - (e^p)(0) = 1$.

# Paréntesis de Poisson y Transformaciones 1/2

Para una transformación canónica $Q_j = Q_j(q_k, p_k, t)$ y $P_i = P_i(q_k, p_k, t)$ se cumple que $\{Q_i, Q_j\} = 0, \quad \{P_i, P_j\} = 0, \quad \{Q_i, P_j\} = \delta_{ij}$

- Sea $Q = q + e^p \quad \& \quad P = p$
- $\{Q, Q\} = \frac{\partial Q}{\partial q}\frac{\partial Q}{\partial p} - \frac{\partial Q}{\partial p}\frac{\partial Q}{\partial q} = (1)(e^p) - (e^p)(1) = 0;$
- $\{P, P\} = \frac{\partial P}{\partial q}\frac{\partial P}{\partial p} - \frac{\partial P}{\partial p}\frac{\partial P}{\partial q} = (0)(1) - (1)(0) = 0;$ y finalmente
- $\{Q, P\} = \frac{\partial Q}{\partial q}\frac{\partial P}{\partial p} - \frac{\partial Q}{\partial p}\frac{\partial P}{\partial q}$. Calculando cada una $\frac{\partial Q}{\partial q} = 1$, $\frac{\partial Q}{\partial p} = e^p$, $\frac{\partial P}{\partial q} = 0$, y $\frac{\partial P}{\partial p} = 1$, obtenemos $\{Q, P\} = (1)(1) - (e^p)(0) = 1$.
- Por lo tanto, como la tranformación cumple con $\{Q, Q\} = 0, \quad \{P, P\} = 0, \quad$ y $\quad \{Q, P\} = 1$. **Es canónica**

# Paréntesis de Poisson y Transformaciones 2/2

Consideremos la siguiente transformación

$P_1 = p_1 - 2p_2, \quad Q_1 = q_1$ y $P_2 = -2q_1 - q_2, \quad Q_2 = p_2$

- $\{Q_1, P_1\} = \sum_{i=1}^{s} \left( \frac{\partial Q_1}{\partial q_i} \frac{\partial P_1}{\partial p_i} - \frac{\partial Q_1}{\partial p_i} \frac{\partial P_1}{\partial q_i} \right)$

  $\{Q_1, P_1\} = \left( \frac{\partial Q_1}{\partial q_1} \frac{\partial P_1}{\partial p_1} - \frac{\partial Q_1}{\partial p_1} \frac{\partial P_1}{\partial q_1} \right) + \left( \frac{\partial Q_1}{\partial q_2} \frac{\partial P_1}{\partial p_2} - \frac{\partial Q_1}{\partial p_2} \frac{\partial P_1}{\partial q_2} \right) = 1$

Consideremos la siguiente transformación

$P_1 = p_1 - 2p_2, \quad Q_1 = q_1$ y $P_2 = -2q_1 - q_2, \quad Q_2 = p_2$

- $\{Q_1, P_1\} = \sum_{i=1}^{s} \left( \frac{\partial Q_1}{\partial q_i} \frac{\partial P_1}{\partial p_i} - \frac{\partial Q_1}{\partial p_i} \frac{\partial P_1}{\partial q_i} \right)$

  $\{Q_1, P_1\} = \left( \frac{\partial Q_1}{\partial q_1} \frac{\partial P_1}{\partial p_1} - \frac{\partial Q_1}{\partial p_1} \frac{\partial P_1}{\partial q_1} \right) + \left( \frac{\partial Q_1}{\partial q_2} \frac{\partial P_1}{\partial p_2} - \frac{\partial Q_1}{\partial p_2} \frac{\partial P_1}{\partial q_2} \right) = 1$
- $\{Q_2, P_2\} = \left( \frac{\partial Q_2}{\partial q_1} \frac{\partial P_2}{\partial p_1} - \frac{\partial Q_2}{\partial p_1} \frac{\partial P_2}{\partial q_1} \right) + \left( \frac{\partial Q_2}{\partial q_2} \frac{\partial P_2}{\partial p_2} - \frac{\partial Q_2}{\partial p_2} \frac{\partial P_2}{\partial q_2} \right) = 1$

Consideremos la siguiente transformación

$P_1 = p_1 - 2p_2, \quad Q_1 = q_1$ y $P_2 = -2q_1 - q_2, \quad Q_2 = p_2$

- $\{Q_1, P_1\} = \sum_{i=1}^{s} \left( \frac{\partial Q_1}{\partial q_i} \frac{\partial P_1}{\partial p_i} - \frac{\partial Q_1}{\partial p_i} \frac{\partial P_1}{\partial q_i} \right)$

  $\{Q_1, P_1\} = \left( \frac{\partial Q_1}{\partial q_1} \frac{\partial P_1}{\partial p_1} - \frac{\partial Q_1}{\partial p_1} \frac{\partial P_1}{\partial q_1} \right) + \left( \frac{\partial Q_1}{\partial q_2} \frac{\partial P_1}{\partial p_2} - \frac{\partial Q_1}{\partial p_2} \frac{\partial P_1}{\partial q_2} \right) = 1$
- $\{Q_2, P_2\} = \left( \frac{\partial Q_2}{\partial q_1} \frac{\partial P_2}{\partial p_1} - \frac{\partial Q_2}{\partial p_1} \frac{\partial P_2}{\partial q_1} \right) + \left( \frac{\partial Q_2}{\partial q_2} \frac{\partial P_2}{\partial p_2} - \frac{\partial Q_2}{\partial p_2} \frac{\partial P_2}{\partial q_2} \right) = 1$
- $\{Q_2, P_1\} = \left( \frac{\partial Q_2}{\partial q_1} \frac{\partial P_1}{\partial p_1} - \frac{\partial Q_2}{\partial p_1} \frac{\partial P_1}{\partial q_1} \right) + \left( \frac{\partial Q_2}{\partial q_2} \frac{\partial P_1}{\partial p_2} - \frac{\partial Q_2}{\partial p_2} \frac{\partial P_1}{\partial q_2} \right) = 0$

Consideremos la siguiente transformación

$P_1 = p_1 - 2p_2, \quad Q_1 = q_1$ y $P_2 = -2q_1 - q_2, \quad Q_2 = p_2$

- $\{Q_1, P_1\} = \sum_{i=1}^{s} \left( \frac{\partial Q_1}{\partial q_i} \frac{\partial P_1}{\partial p_i} - \frac{\partial Q_1}{\partial p_i} \frac{\partial P_1}{\partial q_i} \right)$

  $\{Q_1, P_1\} = \left( \frac{\partial Q_1}{\partial q_1} \frac{\partial P_1}{\partial p_1} - \frac{\partial Q_1}{\partial p_1} \frac{\partial P_1}{\partial q_1} \right) + \left( \frac{\partial Q_1}{\partial q_2} \frac{\partial P_1}{\partial p_2} - \frac{\partial Q_1}{\partial p_2} \frac{\partial P_1}{\partial q_2} \right) = 1$
- $\{Q_2, P_2\} = \left( \frac{\partial Q_2}{\partial q_1} \frac{\partial P_2}{\partial p_1} - \frac{\partial Q_2}{\partial p_1} \frac{\partial P_2}{\partial q_1} \right) + \left( \frac{\partial Q_2}{\partial q_2} \frac{\partial P_2}{\partial p_2} - \frac{\partial Q_2}{\partial p_2} \frac{\partial P_2}{\partial q_2} \right) = 1$
- $\{Q_2, P_1\} = \left( \frac{\partial Q_2}{\partial q_1} \frac{\partial P_1}{\partial p_1} - \frac{\partial Q_2}{\partial p_1} \frac{\partial P_1}{\partial q_1} \right) + \left( \frac{\partial Q_2}{\partial q_2} \frac{\partial P_1}{\partial p_2} - \frac{\partial Q_2}{\partial p_2} \frac{\partial P_1}{\partial q_2} \right) = 0$
- $\{Q_1, P_2\} = \left( \frac{\partial Q_1}{\partial q_1} \frac{\partial P_2}{\partial p_1} - \frac{\partial Q_1}{\partial p_1} \frac{\partial P_2}{\partial q_1} \right) + \left( \frac{\partial Q_1}{\partial q_2} \frac{\partial P_2}{\partial p_2} - \frac{\partial Q_1}{\partial p_2} \frac{\partial P_2}{\partial q_2} \right) = 0$

Consideremos la siguiente transformación

$P_1 = p_1 - 2p_2, \quad Q_1 = q_1$ y $P_2 = -2q_1 - q_2, \quad Q_2 = p_2$

- $\{Q_1, P_1\} = \sum_{i=1}^{s} \left( \frac{\partial Q_1}{\partial q_i} \frac{\partial P_1}{\partial p_i} - \frac{\partial Q_1}{\partial p_i} \frac{\partial P_1}{\partial q_i} \right)$

  $\{Q_1, P_1\} = \left( \frac{\partial Q_1}{\partial q_1} \frac{\partial P_1}{\partial p_1} - \frac{\partial Q_1}{\partial p_1} \frac{\partial P_1}{\partial q_1} \right) + \left( \frac{\partial Q_1}{\partial q_2} \frac{\partial P_1}{\partial p_2} - \frac{\partial Q_1}{\partial p_2} \frac{\partial P_1}{\partial q_2} \right) = 1$
- $\{Q_2, P_2\} = \left( \frac{\partial Q_2}{\partial q_1} \frac{\partial P_2}{\partial p_1} - \frac{\partial Q_2}{\partial p_1} \frac{\partial P_2}{\partial q_1} \right) + \left( \frac{\partial Q_2}{\partial q_2} \frac{\partial P_2}{\partial p_2} - \frac{\partial Q_2}{\partial p_2} \frac{\partial P_2}{\partial q_2} \right) = 1$
- $\{Q_2, P_1\} = \left( \frac{\partial Q_2}{\partial q_1} \frac{\partial P_1}{\partial p_1} - \frac{\partial Q_2}{\partial p_1} \frac{\partial P_1}{\partial q_1} \right) + \left( \frac{\partial Q_2}{\partial q_2} \frac{\partial P_1}{\partial p_2} - \frac{\partial Q_2}{\partial p_2} \frac{\partial P_1}{\partial q_2} \right) = 0$
- $\{Q_1, P_2\} = \left( \frac{\partial Q_1}{\partial q_1} \frac{\partial P_2}{\partial p_1} - \frac{\partial Q_1}{\partial p_1} \frac{\partial P_2}{\partial q_1} \right) + \left( \frac{\partial Q_1}{\partial q_2} \frac{\partial P_2}{\partial p_2} - \frac{\partial Q_1}{\partial p_2} \frac{\partial P_2}{\partial q_2} \right) = 0$
- Por lo tanto, la tranformación **Es canónica**

# Recapitulando

- **Transformaciones Puntuales:** Cambios de coordenadas en el espacio de configuraciones no siempre conservan la forma de las ecuaciones de Hamilton.

# Recapitulando

- **Transformaciones Puntuales:** Cambios de coordenadas en el espacio de configuraciones no siempre conservan la forma de las ecuaciones de Hamilton.
- **Transformaciones Canónicas:** Transformaciones en el espacio de fase que preservan la forma de las ecuaciones de Hamilton. Su validez puede derivarse del Principio de Mínima Acción.

# Recapitulando

- **Transformaciones Puntuales:** Cambios de coordenadas en el espacio de configuraciones no siempre conservan la forma de las ecuaciones de Hamilton.
- **Transformaciones Canónicas:** Transformaciones en el espacio de fase que preservan la forma de las ecuaciones de Hamilton. Su validez puede derivarse del Principio de Mínima Acción.
- **Funciones Generadoras:** Clave para construir transformaciones canónicas. Existen cuatro tipos principales según las variables dependientes. Ejemplo tratado: $F_2(q,P) = qP + eP$ para la transformación $Q = q + eP$, $P = p$.

# Recapitulando

- **Paréntesis de Poisson:** Definidos como $\{f,g\} = \sum_i \left( \frac{\partial f}{\partial q_i}\frac{\partial g}{\partial p_i} - \frac{\partial f}{\partial p_i}\frac{\partial g}{\partial q_i} \right)$. Describen la evolución temporal de cualquier función en el espacio de fase y forman una estructura de álgebra de Lie.

# Recapitulando

- **Paréntesis de Poisson:** Definidos como $\{f,g\} = \sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial q_i}\frac{\partial g}{\partial p_i} - \frac{\partial f}{\partial p_i}\frac{\partial g}{\partial q_i}\right)$. Describen la evolución temporal de cualquier función en el espacio de fase y forman una estructura de álgebra de Lie.
- **Propiedades:** Antisimetría, linealidad, regla del producto y la identidad de Jacobi. Permiten verificar si una transformación es canónica mediante $\{Q_i, Q_j\} = 0$, $\{P_i, P_j\} = 0$, $\{Q_i, P_j\} = \delta_{ij}$.

# Recapitulando

Universidad Industrial de Santander

CONSTRUIMOS FUTURO

- **Paréntesis de Poisson:** Definidos como $\{f,g\} = \sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial q_i}\frac{\partial g}{\partial p_i} - \frac{\partial f}{\partial p_i}\frac{\partial g}{\partial q_i}\right)$. Describen la evolución temporal de cualquier función en el espacio de fase y forman una estructura de álgebra de Lie.
- **Propiedades:** Antisimetría, linealidad, regla del producto y la identidad de Jacobi. Permiten verificar si una transformación es canónica mediante $\{Q_i, Q_j\} = 0$, $\{P_i, P_j\} = 0$, $\{Q_i, P_j\} = \delta_{ij}$.
- **Ejemplos:** Se muestran cálculos de Poisson para magnitudes como $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ y los componentes del momento angular $\mathbf{L}$.