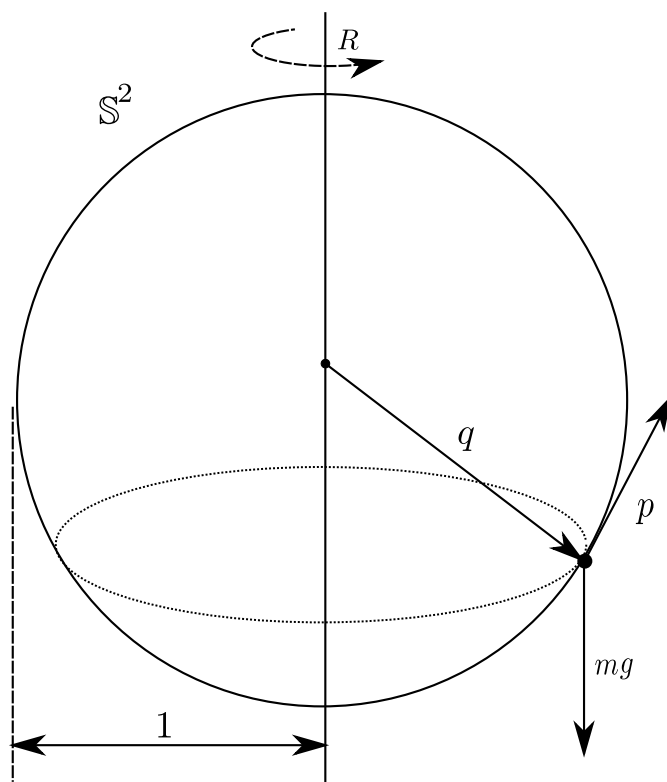


Introducción a la geometría simpléctica y los sistemas integrables

GUILLERMO GALLEGO

JUNIO 2018



Facultad de Ciencias Matemáticas
Departamento de Álgebra, Geometría y Topología
Dirigido por Jesús M. Ruiz

Resumen

El objetivo principal de este trabajo es demostrar el teorema de Arnold-Liouville, que da una condición suficiente para saber si un *sistema mecánico hamiltoniano* es *integrable por cuadraturas*. Con este propósito, definimos y desarrollamos los conceptos necesarios para el teorema, dando unas nociones elementales sobre *geometría simpléctica* y su aplicación a la Mecánica Clásica.

Palabras clave: *Geometría simpléctica, sistemas integrables, teorema de Arnold-Liouville, flujos hamiltonianos, ecuaciones de Hamilton, derivada de Lie, campos dependientes del tiempo.*

Abstract

The main goal of this work is to prove the Arnold-Liouville theorem, which gives a sufficient condition for a *hamiltonian mechanical system* to be *integrable by quadratures*. To that end we define and develop the concepts involved in the theorem, giving some elementary notions of *symplectic geometry* and its application to Classical Mechanics.

Keywords: *Symplectic geometry, integrable systems, Arnold-Liouville theorem, hamiltonian flows, Hamilton's equations, Lie derivative, time-dependent vector fields.*

Índice general

Introducción	7
1. Motivación física. De Newton a Hamilton	9
2. Preliminares de geometría diferencial	15
2.1. Derivada de Lie y fórmulas de Cartan	15
2.2. Campos y formas dependientes del tiempo	19
2.3. Lema de Poincaré	21
3. Geometría simpléctica y mecánica hamiltoniana	23
3.1. Espacios vectoriales simplécticos	23
3.2. Variedades simplécticas	24
3.3. Campos simplécticos y campos hamiltonianos	27
3.4. Corchete de Poisson	29
3.5. Mecánica en variedades simplécticas	31
3.6. Simetrías y leyes de conservación	33
4. Sistemas integrables	37
4.1. Teorema de Arnold-Liouville	37
4.2. Variables de acción-ángulo	42
4.3. Osciladores armónicos	45
4.4. Movimiento condicionalmente periódico	48
4.5. Sistemas con un grado de libertad	51
4.6. Más sistemas integrables	53
Bibliografía	57

Introducción

Una *variedad simpléctica* es una variedad diferenciable de dimensión par en la que se define una 2-forma diferencial ω cerrada y no degenerada. La *geometría simpléctica* es el estudio de las variedades simpléticas y es interesante tanto por sus problemas fundamentales como por su aplicación a la Mecánica Clásica (y por extensión al resto de la Física). La forma ω induce una correspondencia entre campos y 1-formas, que nos permite obtener campos tangentes a partir de funciones definidas sobre la variedad. Las variedades simpléticas constituyen entonces una forma natural de visualizar los sistemas mecánicos ya que las *ecuaciones de Hamilton* interpretan las leyes del movimiento como campos tangentes y, por tanto, intrínsecos a la variedad.

Un *sistema mecánico integrable por cuadraturas* es aquel en el que las ecuaciones del movimiento pueden ser resueltas salvo el cálculo de integrales (cuadraturas) de funciones conocidas, de forma que el problema de estudiar el comportamiento del sistema queda (al menos numéricamente) resuelto. El *teorema de Arnold-Liouville* nos ofrece una forma de saber si un sistema mecánico es integrable por cuadraturas mediante el estudio de la variedad simpléctica que lleva asociado. Tras un desarrollo previo de algunos prerrequisitos de geometría diferencial como son la *derivada de Lie* y los *campos dependientes del tiempo*, y tras afianzar algunos conceptos del álgebra lineal de los *espacios vectoriales simpléticos* (espacios vectoriales en los que se define una forma cuadrática antisimétrica y no degenerada), nos concentramos en el estudio de la geometría simpléctica, para acabar probando los resultados fundamentales que componen la teoría de los sistemas integrables.

Capítulo 1

Motivación física. De Newton a Hamilton

La forma más sencilla de describir el movimiento de un sistema de partículas es mediante el formalismo newtoniano, tomando como postulado fundamental de la mecánica clásica el *principio de determinación*: conocidas en cierto instante las posiciones y las velocidades iniciales de todas las partículas que conforman el sistema, es posible determinar sus posiciones y velocidades en cualquier otro instante.

Matemáticamente, este principio se traduce en la existencia de una función¹, conocida como *fuerza*, $F : \mathbb{R}^{3n} \times \mathbb{R}^{3n} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, que cumple la llamada *ecuación de Newton*²:

$$\ddot{x} = F(x, \dot{x}, t; \alpha),$$

donde n es el número de partículas, $x : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^{3n}$ es la trayectoria del sistema³ y α son unos ciertos parámetros de los que puede depender F , como por ejemplo las masas o las cargas eléctricas de las diferentes partículas. Para cada sistema concreto, la fuerza se determina experimentalmente. Desde un punto de vista matemático, decimos que la fuerza define un *sistema mecánico newtoniano*. En general, cuando hablemos de los distintos tipos de sistema mecánico, llamaremos a sus ecuaciones diferenciales asociadas (Newton, Euler-Lagrange, Hamilton) *ecuaciones del movimiento* o *dinámica del sistema*.

El formalismo newtoniano ofrece una forma muy simple de entender los sistemas mecánicos pero tiene la complicación de que es necesario medir y calcular las tres componentes de la posición y de la velocidad de cada partícula que conforma el sistema. Por verlo con un ejemplo, si queremos describir el movimiento de un barco en un viaje transatlántico deberíamos tomar una referencia cartesiana (tal vez el centro de la Tierra y tres ejes perpendiculares) y describir su posición y velocidad en \mathbb{R}^3 en términos de esta referencia, cuando lo que parece más sencillo es simplemente entender el barco como una partícula moviéndose en la superficie de \mathbb{S}^2 y dar su posición y velocidad en términos de su latitud y longitud. Otro ejemplo lo podemos ver si consideramos el movimiento de una peonza. En este caso, aunque la peonza esté compuesta de cuatrillones de partículas, es posible describir su posición sólo con tres ángulos (el de giro respecto a su eje y los dos de orientación de su eje), o equivalentemente, con la rotación de sus ejes propios respecto a los de una referencia inmóvil exterior (un *sistema de laboratorio*), es decir, con un elemento de $\text{SO}(3)$.

De forma más general, podemos considerar sistemas newtonianos sometidos a *ligaduras* entre las partículas que lo conforman. Las posibilidades de movimiento quedan entonces restringidas a un subconjunto de \mathbb{R}^{3n} . En el caso de que estas ligaduras sean «lo suficientemente buenas» (*holónomas*

¹A lo largo del texto sólo consideraremos funciones diferenciables (\mathcal{C}^∞ si es necesario), no lo especificaremos en lo que sigue.

²Esta ecuación es una forma peculiar de la conocida *segunda ley de Newton*: $F = ma$.

³A lo largo del texto utilizaremos la notación usual en Física por la que un punto encima de una función dependiente del tiempo indica la derivada temporal: $\dot{a} = \frac{da}{dt}$. En particular el punto indica que debe existir esa dependencia respecto del tiempo.

es el término clásicamente usado en mecánica), es posible entenderlas como unas funciones $f_1, \dots, f_r : \mathbb{R}^{3n} \rightarrow \mathbb{R}$, independientes en todo $x \in \mathbb{R}^{3n}$ ($d_x f_1 \wedge \dots \wedge d_x f_r \neq 0$), que definen el subconjunto de \mathbb{R}^{3n}

$$\begin{cases} f_1(x) = 0, \\ \vdots \\ f_r(x) = 0. \end{cases}$$

Por el teorema de la función implícita, las ligaduras definen una subvariedad regular $M \subset \mathbb{R}^{3n}$ de dimensión $m = 3n - r$. En Física, a esta M se le suele llamar *espacio de configuración* del sistema y a m su número de *grados de libertad*. Así, llegamos al formalismo lagrangiano.

Un *sistema lagrangiano* viene dado por una variedad diferenciable M de dimensión m . Si (U, q) es una carta en M , las coordenadas $q = (q_1, \dots, q_m) : U \rightarrow \mathbb{R}^m$ suelen llamarse en Física *coordenadas generalizadas* del sistema. Dados $x \in M$ y $v \in T_x M$, las coordenadas de v suelen denotarse $\dot{q} = (\dot{q}_1, \dots, \dot{q}_m)$ y suelen llamarse *velocidades generalizadas* del sistema. Esto significa en realidad que, en la carta (U, q) , $v = \sum_{i=1}^m \dot{q}_i \frac{\partial}{\partial q_i}$. Como no hay t respecto de la que derivar, es sólo una notación, pero es consistente. Si $v = \dot{x}(t)$ tenemos

$$\dot{q}_i = dq_{i,x(t)}(v) = \frac{d}{dt}(q_i \circ x)(t).$$

Un *estado* del sistema lagrangiano vendrá dado por un punto $(x, v) \in TM$, donde x es la posición y v la velocidad del sistema en dicho estado, y una *trayectoria* del sistema vendrá dada por una aplicación

$$\begin{aligned} \gamma : \mathbb{R} &\longrightarrow TM \\ t &\longmapsto (x(t), \dot{x}(t)). \end{aligned}$$

Vemos que esta trayectoria está asociada a una curva $x : \mathbb{R} \rightarrow M$ en el espacio de configuración, que podemos entender como la descripción de las posiciones de las partículas a lo largo del tiempo, mientras que $\dot{x}(t) = \frac{d}{dt}x(t)$ describe sus velocidades.

La dinámica del sistema lagrangiano viene dada por lo que se conoce como el *principio de mínima acción*. Este principio puede deducirse a partir del formalismo newtoniano, imponiendo ciertas condiciones a las fuerzas y a partir del *principio de D'Alembert* (o *de los trabajos virtuales*), como puede leerse en [7]. Sin embargo, aquí le daremos un enfoque distinto, postulando directamente el principio de mínima acción, al estilo de Landau y Lifshitz [8]:

«La formulación más general de la ley del movimiento de los sistemas mecánicos es el *principio de mínima acción* (o *principio de Hamilton*).»

En primer lugar, el principio de mínima acción afirma que todo sistema mecánico viene caracterizado por una función $L : TM \rightarrow \mathbb{R}$, llamada *lagrangiano* del sistema. Ahora, suponiendo que en los tiempos t_1 y t_2 el sistema ocupa los estados (x_1, v_1) y (x_2, v_2) , la trayectoria que describirá el sistema entre los dos estados será aquella que minimice (o más precisamente, que haga extremal) la integral

$$S(\gamma) = \int_{t_1}^{t_2} L(\gamma(t)). \quad (1.1)$$

Este funcional S se conoce como la *acción* del sistema.

Utilizando técnicas de cálculo variacional [2], es posible obtener unas ecuaciones diferenciales para las trayectorias que hacen extremales funcionales de la forma de S . Las soluciones de estas ecuaciones son las trayectorias «reales» del sistema lagrangiano. Tenemos así las *ecuaciones de Euler-Lagrange*, que en coordenadas locales se expresan:

$$\left[\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} \right] (t) = 0,$$

para $i = 1, \dots, m$.

* * *

Dado un sistema newtoniano $F : \mathbb{R}^{3n} \times \mathbb{R}^{3n} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^{3n}$, se define la *energía cinética* como una aplicación

$$\begin{aligned} T : \mathbb{R}^{3n} &\longrightarrow \mathbb{R} \\ v &\longmapsto \frac{1}{2} \langle v, v \rangle. \end{aligned}$$

Decimos que el sistema es *conservativo* o, equivalentemente que F es una *fuerza conservativa*, si ésta sólo depende de la posición y además es un campo gradiente, es decir, si existe una función $V : \mathbb{R}^{3n} \rightarrow \mathbb{R}$ que cumpla $F(x) = -\nabla V(x)$. Esta V toma el nombre de *energía potencial*. En un sistema newtoniano conservativo podemos ver la ecuación de Newton en la forma

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial v_i} \Big|_{\dot{x}(t)} \right) = - \frac{\partial V}{\partial x_i} \Big|_{x(t)}, \quad i = 1, \dots, 3n.$$

Ahora, escribiendo la función $L(x, v) = T(v) - V(x)$, tenemos

$$\left[\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial v_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_i} \right]_{(x(t), \dot{x}(t))} = 0, \quad i = 1, \dots, 3n.$$

Así, podemos ver cualquier sistema newtoniano conservativo como un sistema lagrangiano con $M = \mathbb{R}^{3n}$ y $L = T - V$.

En el caso de una variedad diferenciable cualquiera, debemos tener en cuenta que el producto escalar $\langle u, v \rangle$ deberá ser sustituido por una métrica riemanniana g . Recordamos que una *métrica riemanniana* en una variedad diferenciable M se define como una colección de productos escalares

$$g_x : T_x M \times T_x M \rightarrow \mathbb{R}, \quad x \in M,$$

que satisface la siguiente condición de *diferenciabilidad*: para cada par X, Y de campos tangentes diferenciables de M la función

$$\begin{aligned} \langle X, Y \rangle : M &\longrightarrow \mathbb{R} \\ x &\longmapsto g_x(X_x, Y_x) \end{aligned}$$

es diferenciable. Se llama *variedad riemanniana* a un par (M, g) , donde M es una variedad diferenciable y g una métrica riemanniana en M .

Definimos entonces un sistema lagrangiano *natural*, como un par $((M, g), L)$, donde (M, g) es una variedad riemanniana y $L : TM \rightarrow \mathbb{R}$ es de la forma $L = T - V$, con $T : TM \rightarrow \mathbb{R}$, $T(x, v) = \frac{1}{2}g_x(v, v)$ y $V : M \rightarrow \mathbb{R}$ una función⁴.

* * *

Es una técnica común a la hora de estudiar ecuaciones diferenciales de orden 2

$$f''(x) = F(x, f, f'),$$

realizar un cambio de la forma

$$\begin{cases} f'(x) = g(x) \\ g'(x) = F(x, f, g), \end{cases}$$

lo que convierte la ecuación original de orden 2 en un sistema de dos ecuaciones de orden 1. Esto ofrece una serie de ventajas prácticas y fundamentales, ya que nos permite ver la ecuación diferencial como un campo y su solución como el flujo correspondiente. La misma idea se puede aplicar para estudiar sistemas lagrangianos.

⁴Aunque $V(x)$ está definida en M , la expresión $L = T - V$ tiene sentido si entendemos V como una función definida en TM con $V(x, v) = V(x)$.

Sea $((M, g), L)$ un sistema natural. En TM tenemos las coordenadas (q, \dot{q}) , pero podemos definir otras usando la dualidad asociada a la métrica riemanniana g , es decir, el isomorfismo de Riesz:

$$\begin{aligned} T_x M &\longrightarrow T_x M^* \\ v &\longmapsto g_x(v, \bullet). \end{aligned}$$

En efecto, las formas

$$p_i = g_x \left(\frac{\partial}{\partial \dot{q}_i}, \bullet \right), \quad i = 1, \dots, m,$$

que se llaman *momentos canónicos conjugados* o simplemente *momentos*, son independientes y forman una base de $T_x M^*$, de modo que $p = (p_1, \dots, p_m)$ son coordenadas en $T_x M$. Explícitamente

$$p_i = \sum_{j=1}^m p_i \left(\frac{\partial}{\partial \dot{q}_j} \right) dq_j = \sum_{j=1}^m g_{ij} dq_j,$$

es decir, $p_i(q, \dot{q}) = \sum_{j=1}^m g_{ij}(q) \dot{q}_j$, donde $g_{ij}(q)$ son las componentes de la matriz asociada a g_x en la base $\left\{ \frac{\partial}{\partial \dot{q}_i} \right\}$. Por tanto

$$\frac{\partial p_i}{\partial \dot{q}_j}(q, \dot{q}) = g_{ij}(q).$$

Así, (q, p) son unas nuevas coordenadas en TM . Ahora, si recordamos que

$$L(q, \dot{q}) = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^m \dot{q}_i g_{ij}(q) \dot{q}_j - V(q),$$

resulta que

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} = \sum_{j=1}^m g_{ij}(q) \dot{q}_j = p_i(q, \dot{q}).$$

Consideramos ahora una función $H : TM \rightarrow \mathbb{R}$,

$$H = \sum_{i=1}^m p_i \dot{q}_i - L(q, \dot{q}),$$

con las p relacionadas con las \dot{q} mediante $p_i(q, \dot{q}) = \sum_{j=1}^m g_{ij}(q) \dot{q}_j$. Derivando a ambos lados de la expresión respecto de \dot{q}_j obtenemos

$$\sum_{i=1}^m \frac{\partial H}{\partial p_i} \frac{\partial p_i}{\partial \dot{q}_j} = \sum_{i=1}^m \frac{\partial p_i}{\partial \dot{q}_j} \dot{q}_i + p_j - \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j}$$

que nos lleva a

$$\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial H}{\partial p_i} - \dot{q}_i \right) g_{ij} = 0.$$

Como la matriz de los g_{ij} es regular,

$$\frac{\partial H}{\partial p_i} = \dot{q}_i.$$

Si derivamos respecto de q_j tenemos

$$\frac{\partial H}{\partial q_j} + \sum_{i=1}^m \frac{\partial H}{\partial p_i} \frac{\partial p_i}{\partial q_j} = \sum_{i=1}^m \frac{\partial p_i}{\partial q_j} \dot{q}_i - \frac{\partial L}{\partial q_j}.$$

Finalmente, usando la relación recién obtenida,

$$\frac{\partial H}{\partial q_j} = -\frac{\partial L}{\partial q_j}.$$

Para ver cómo será la dinámica del sistema en estas coordenadas, consideramos una trayectoria $(x(t), \dot{x}(t))$, que en las nuevas coordenadas se expresa $(q(t), p(t))$, con $p(t) = (p_1(t), \dots, p_m(t))$ y $p_i(t) = \sum_{j=1}^m g_{ij}(q(t))\dot{q}_j(t)$. Nótese que aquí el punto sí expresa derivación respecto del tiempo, es decir, que las p dependen de las q . En este caso, por la ecuación de Euler-Lagrange, la segunda de las relaciones anteriores queda:

$$\frac{\partial H}{\partial q_j}(t) = -\frac{\partial L}{\partial q_j}(t) = -\left(\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j}\right)(t) = -\frac{d}{dt} p_j(t) = -\dot{p}_j(t).$$

Obtenemos entonces un sistema de EDOs de orden 1 equivalentes a la ecuación de Euler-Lagrange

$$\begin{cases} \dot{q}_i(t) = \frac{\partial H}{\partial p_i}(t) \\ \dot{p}_i(t) = -\frac{\partial H}{\partial q_i}(t), \end{cases} \quad (1.2)$$

para $i = 1, \dots, n$. Éstas son las *ecuaciones de Hamilton*.

Si queremos dotar de sentido físico a esta función H , conocida como *hamiltoniano* del sistema, consideremos un sistema natural con lagrangiano $L = T - V$. Entonces $p_i = \sum_{j=1}^m g_{ij}(q)\dot{q}_j$ y $T(q, \dot{q}) = \sum_{i,j=1}^m \frac{1}{2} \dot{q}_i g_{ij}(q) \dot{q}_j$, por tanto

$$H(q, \dot{q}) = \sum_{i=1}^m p_i(q, \dot{q}) \dot{q}_i - L(q, \dot{q}) = \sum_{i,j=1}^m (g_{ij} \dot{q}_j) \dot{q}_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^m \dot{q}_i g_{ij} \dot{q}_j + V(q) = T(q, \dot{q}) + V(q),$$

Es decir, el hamiltoniano es exactamente $T + V$, la *energía total* del sistema.

De esta forma, podemos entender la dinámica de un sistema lagrangiano como la definición de un campo tangente al fibrado tangente del espacio de configuración, cuyas curvas integrales contendrán toda la información sobre la evolución temporal del sistema. En coordenadas locales este campo tangente se expresa

$$X = \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial H}{\partial p_i} \frac{\partial}{\partial q_i} - \frac{\partial H}{\partial q_i} \frac{\partial}{\partial p_i} \right).$$

* * *

La siguiente pregunta que cabe hacerse es si será posible construir este campo de forma independiente de las coordenadas a partir de la especificación de un hamiltoniano $H : TM \rightarrow \mathbb{R}$. La construcción es sencilla, basta considerar un punto $\zeta \in TM$, con coordenadas (q, p) y la 1-forma α que localmente se expresa

$$\alpha = \sum_{i=1}^m p_i dq_i.$$

Entonces, la 2-forma

$$\omega = d\alpha = \sum_{i=1}^m dp_i \wedge dq_i,$$

es cerrada (porque es exacta) y no degenerada.

Usando esta forma se puede construir un isomorfismo lineal, dado $\zeta \in TM$,

$$\begin{aligned} T_\zeta(TM) &\longrightarrow (T_\zeta(TM))^* \\ \xi &\longmapsto \omega(\bullet, \xi) = -\omega(\xi, \bullet). \end{aligned} \quad (1.3)$$

Ahora, si X^H es el campo asociado a dH por este isomorfismo, es decir, tal que $dH = \omega(\bullet, X^H)$, es fácil comprobar que en coordenadas locales se expresa tal y como queríamos:

$$X^H = \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial H}{\partial p_i} \frac{\partial}{\partial q_i} - \frac{\partial H}{\partial q_i} \frac{\partial}{\partial p_i} \right).$$

En efecto, si $X^H = \sum_{i=1}^m \left(a_i \frac{\partial}{\partial q_i} + b_i \frac{\partial}{\partial p_i} \right)$ entonces

$$\begin{aligned} \omega \left(\frac{\partial}{\partial p_i}, X^H \right) &= \sum_k dp_k \wedge dq_k \left(\frac{\partial}{\partial p_i}, \sum_j a_j \frac{\partial}{\partial q_j} + b_j \frac{\partial}{\partial p_j} \right) \\ &= \sum_{j,k} a_j dp_k \wedge dq_k \left(\frac{\partial}{\partial p_i}, \frac{\partial}{\partial q_j} \right) = a_i \\ \omega \left(\frac{\partial}{\partial q_i}, X^H \right) &= \sum_k dp_k \wedge dq_k \left(\frac{\partial}{\partial q_i}, \sum_j a_j \frac{\partial}{\partial q_j} + b_j \frac{\partial}{\partial p_j} \right) \\ &= \sum_{j,k} b_j dp_k \wedge dq_k \left(\frac{\partial}{\partial q_i}, \frac{\partial}{\partial p_j} \right) = -b_i, \end{aligned}$$

de modo que

$$\begin{aligned} a_i &= \omega \left(\frac{\partial}{\partial p_i}, X^H \right) = dH \left(\frac{\partial}{\partial p_i} \right) = \frac{\partial H}{\partial p_i} \\ b_i &= -\omega \left(\frac{\partial}{\partial q_i}, X^H \right) = -dH \left(\frac{\partial}{\partial q_i} \right) = -\frac{\partial H}{\partial q_i}, \end{aligned}$$

ya que $dH = \sum_{i=1}^m \frac{\partial H}{\partial q_i} dq_i + \frac{\partial H}{\partial p_i} dp_i$.

Obsérvese que el elemento realmente crucial en la construcción de este campo ha sido la 2-forma ω . Una forma de esas características induce sobre TM la estructura de *variedad simpléctica*. El estudio de las variedades simplécticas y sus propiedades es la *geometría simpléctica*. A partir de la sección 3.1, introduciremos el formalismo de la geometría simpléctica, lo que nos permitirá enunciar la *formulación canónica* de la mecánica clásica y resolver alguno de sus problemas.

Capítulo 2

Preliminares de geometría diferencial

2.1. Derivada de Lie y fórmulas de Cartan

Antes de comenzar con el estudio de la geometría simpléctica, conviene recordar el concepto de la derivada de Lie de campos, extenderlo a formas, y obtener una serie de resultados que nos serán útiles más adelante.

Empecemos recordando la definición del corchete de Lie de campos, su estudio detallado puede encontrarse en [6].

Definición 2.1.1. Sea M una variedad diferenciable y $\mathfrak{X}(M)$ el conjunto de los campos diferenciables en M , se define el *corchete de Lie* como la aplicación

$$\begin{aligned} [\cdot, \cdot] : \mathfrak{X}(M) \times \mathfrak{X}(M) &\longrightarrow \mathfrak{X}(M) \\ (X, Y) &\longmapsto [X, Y] = X \circ Y - Y \circ X, \end{aligned}$$

donde la composición se entiende si vemos los campos como aplicaciones $\mathcal{C}^\infty(M) \rightarrow \mathcal{C}^\infty(M)$.

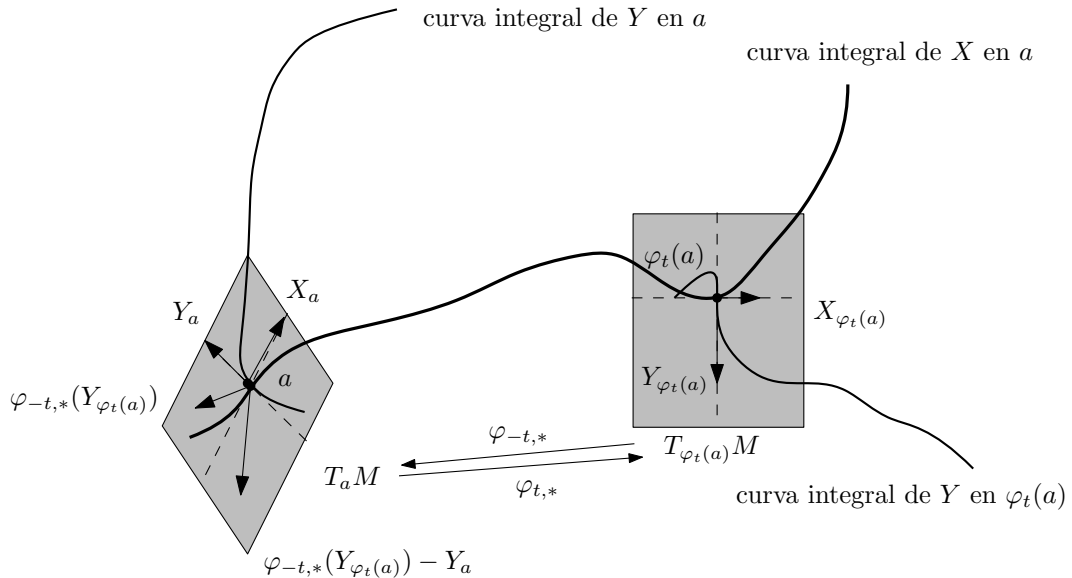


Figura 2.1: Visión geométrica de la derivada de Lie

Recordamos también que podemos ver el corchete de Lie de otra forma equivalente. Sea M una variedad diferenciable, $a \in M$, $Y \in \mathfrak{X}(M)$, φ un flujo en M y X su generador infinitesimal. Entonces

$$[X, Y]_a = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\varphi_{-t,*}(Y_{\varphi_t(a)}) - Y_a}{t}.$$

En vista de esta fórmula, se define la *derivada de Lie de Y respecto de X* como $L_X Y = [X, Y]$. Por último, recordamos otro resultado muy importante que usaremos posteriormente:

Proposición 2.1.2. *Sea M una variedad diferenciable, sean φ, ψ flujos en M y sean X, Y sus generadores infinitesimales, respectivamente. Entonces los flujos conmutan si y sólo si lo hacen sus generadores infinitesimales (es decir, $\varphi_t \circ \psi_s = \psi_s \circ \varphi_t$ si y sólo si $[X, Y] = 0$).*

Ya estamos en disposición de dar una definición más general de la derivada de Lie:

Definición 2.1.3. Sean M una variedad diferenciable, X un campo en M , y φ su flujo. Se define la *derivada de Lie respecto de X* como la aplicación

$$\begin{aligned} L_X : \Gamma^r(M) &\longrightarrow \Gamma^r(M) \\ \omega &\longmapsto L_X \omega = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\varphi_t^* \omega - \omega}{t} \end{aligned}$$

(es decir, $(L_X \omega)_x = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\varphi_t^* \omega_{\varphi_t(x)} - \omega_x}{t}$ para $x \in M$).

Vamos a obtener ahora un par de propiedades de la derivada de Lie.

Proposición 2.1.4. *Sean M una variedad diferenciable, $\omega \in \Gamma^r(M)$, $X, X_1, \dots, X_r \in \mathfrak{X}(M)$. Se cumple*

$$L_X \omega(X_1, \dots, X_r) = X\omega(X_1, \dots, X_r) - \sum_{i=1}^r \omega(X_1, \dots, [X, X_i], \dots, X_r).$$

Demostración. Vamos a probarlo sólo para el caso en el que ω es una 2-forma para simplificar su lectura. El cálculo general es completamente análogo. En primer lugar,

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{t} [(\varphi_t^* \omega)(X_1, X_2) - \omega(X_1, X_2)] &= \lim_{t \rightarrow 0} \left[\frac{1}{t} [(\varphi_t^* \omega)(X_1, X_2) - \varphi_t^*(\omega(X_1, X_2))] \right] \\ &\quad + \lim_{t \rightarrow 0} \left[\frac{1}{t} [\varphi_t^*(\omega(X_1, X_2)) - \omega(X_1, X_2)] \right]. \end{aligned}$$

El segundo término de esta expresión es exactamente

$$\lim_{t \rightarrow 0} \left[\frac{1}{t} [\varphi_t^*(\omega(X_1, X_2)) - \omega(X_1, X_2)] \right] = \left(\frac{d}{dt} \Big|_{t=0} \varphi_t \right) (\omega(X_1, X_2)) = X\omega(X_1, X_2),$$

mientras que el primer término, en $x \in M$ es

$$\begin{aligned} &\lim_{t \rightarrow 0} \left[\frac{1}{t} [(\varphi_t^* \omega)(X_1, X_2) - \varphi_t^*(\omega(X_1, X_2))] \right] \Big|_x \\ &= \lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{t} [\omega_{\varphi_t(x)}(d_x \varphi_t(X_{1,x}), d_x \varphi_t(X_{2,x})) - \omega_{\varphi_t(x)}(X_{1,\varphi_t(x)}, X_{2,\varphi_t(x)})] \\ &= \lim_{t \rightarrow 0} \omega_{\varphi_t(x)} \left[\frac{1}{t} (d_x \varphi_t(X_{1,x}) - X_{1,\varphi_t(x)}), d_x \varphi_t(X_{2,x}) \right] \\ &\quad + \lim_{t \rightarrow 0} \omega_{\varphi_t(x)} \left[X_{1,\varphi_t(x)}, \frac{1}{t} (d_x \varphi_t(X_{2,x}) - X_{2,\varphi_t(x)}) \right] \\ &= -\omega_x([X, X_1]_x, X_{2,x}) - \omega_x(X_{1,x}, [X, X_2]_x). \end{aligned}$$

Comprobemos que, en efecto

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{t} (d_x \varphi_t(X_{1,x}) - X_{1,\varphi_t(x)}) = [X, X_1]_x,$$

y es análogo para $[X, X_2]_x$. Basta «sacar factor común» a $d_x \varphi_t$, de modo que

$$\frac{1}{t} (d_x \varphi_t(X_{1,x}) - X_{1,\varphi_t(x)}) = -d_x \varphi_t \left(\frac{(d_x \varphi_t)^{-1}(X_{1,\varphi_t(x)}) - X_{1,x}}{t} \right).$$

Ahora, $(d_x \varphi_t)^{-1} = d_{\varphi_t(x)} \varphi_{-t} = \varphi_{-t,*}$ y

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{1}{t} (\varphi_{-t,*}(X_{1,\varphi_t(x)}) - X_{1,x}) = [X, X_1]_x.$$

Volviendo a agrupar, tenemos lo que se quería demostrar. \square

Proposición 2.1.5. *Sea M una variedad diferenciable y $\alpha \in \Gamma^r(M)$. Se cumple*

$$\begin{aligned} (d\alpha)(X_1, \dots, X_{r+1}) &= \sum_{i=1}^{r+1} (-1)^{i-1} X_i \alpha(X_1, \dots, \hat{X}_i, \dots, X_{r+1}) \\ &+ \sum_{i < j} (-1)^{i+j} \alpha([X_i, X_j], X_1, \dots, \hat{X}_i, \dots, \hat{X}_j, \dots, X_{r+1}), \end{aligned}$$

donde el circunflejo en un campo quiere decir que este campo se omite.

Demostración. En este caso probaremos solo la identidad más sencilla

$$d\alpha(X, Y) = X\alpha(Y) - Y\alpha(X) - \alpha([X, Y]),$$

válida para el caso en el que α es de grado 1. El caso general es completamente análogo.

En primer lugar, escribimos todo en coordenadas locales:

$$\begin{aligned} \alpha &= \sum_i \alpha_i dx_i, \quad d\alpha = \sum_{i,j} d\alpha_i \wedge dx_j = \sum_{i,j} \frac{\partial \alpha_i}{\partial x_j} dx_i \wedge dx_j, \\ X &= \sum_i X_i \frac{\partial}{\partial x_i}, \quad [X, Y] = \sum_{i,j} \left(X_i \frac{\partial Y_j}{\partial x_i} - Y_i \frac{\partial X_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial}{\partial x_j}. \end{aligned}$$

Ahora, operando en estas coordenadas:

$$\begin{aligned} \alpha(X) &= \sum_i \alpha_i X_i, \quad d\alpha(X, Y) = \sum_{i,j} \frac{\partial \alpha_i}{\partial x_j} (X_j Y_i - X_i Y_j), \\ \alpha([X, Y]) &= \sum_{i,j} \left(X_i \frac{\partial Y_j}{\partial x_i} - Y_i \frac{\partial X_j}{\partial x_i} \right) \alpha_j = \sum_{i,j} \alpha_i X_j \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} - \sum_{i,j} \alpha_i Y_j \frac{\partial X_i}{\partial x_j}, \\ X(\alpha Y) &= \sum_{i,j} \alpha_i X_j \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} + Y_i X_j \frac{\partial \alpha_i}{\partial x_j}, \quad Y(\alpha X) = \sum_{i,j} \alpha_i Y_j \frac{\partial X_i}{\partial x_j} + X_i Y_j \frac{\partial \alpha_i}{\partial x_j}. \end{aligned}$$

Obtenemos entonces

$$X(\alpha(Y)) - Y\alpha(X) - \alpha([X, Y]) = \sum_{i,j} Y_i X_j \frac{\partial \alpha_i}{\partial x_j} - X_i Y_j \frac{\partial \alpha_i}{\partial x_j} = d\alpha(X, Y).$$

\square

Antes de seguir, vamos a introducir una nueva operación para formas:

Definición 2.1.6. Sea M una variedad diferenciable y X un campo en M , se define el *producto interior* o *contracción* $i_X : \Gamma^{r+1}(M) \rightarrow \Gamma^r(M)$ por

$$i_X \omega(X_1, \dots, X_r) = \omega(X, X_1, \dots, X_r),$$

para $X_1, \dots, X_r \in \mathfrak{X}(M)$.

Podemos probar ya una serie de fórmulas, debidas a Élie Cartan¹, que nos serán de gran utilidad posteriormente.

Teorema 2.1.7 (Fórmulas de Cartan). *Sea X un campo en una variedad M , y consideramos la derivada de Lie L_X , el producto interior i_X , y la diferencial exterior d . Entonces se cumplen las siguientes fórmulas:*

1. $i_{[X,Y]} = L_X i_Y - i_Y L_X$, para todo $Y \in \mathfrak{X}(M)$,
2. $L_X = d \circ i_X + i_X \circ d$,
3. $L_X \circ d = d \circ L_X$.

Demostración.

1. Si $X_1, \dots, X_r \in \mathfrak{X}(M)$, entonces

$$\begin{aligned} L_X[(i_Y \omega)(X_1, \dots, X_r)] &= X\omega(Y, X_1, \dots, X_r) - \sum_{i=1}^r \omega(Y, X_1, \dots, [X, X_i], \dots, X_r), \\ i_Y[(L_X \omega)(X_1, \dots, X_r)] &= X\omega(Y, X_1, \dots, X_r) \\ &\quad - \sum_{i=1}^r \omega(Y, X_1, \dots, [X, X_i], \dots, X_r) \\ &\quad - \omega([X, Y], X_1, \dots, X_r). \end{aligned}$$

Por tanto

$$\begin{aligned} i_{[X,Y]} \omega(X_1, \dots, X_r) &= \omega([X, Y], X_1, \dots, X_r) \\ &= L_X[(i_Y \omega)(X_1, \dots, X_r)] \\ &\quad - i_Y[(L_X \omega)(X_1, \dots, X_r)]. \end{aligned}$$

2. Usando la relación entre el corchete de Lie y la diferencial exterior que obtuvimos antes, tenemos

$$\begin{aligned} (d(i_X \alpha))(X_1, \dots, X_r) &= \sum_i (-1)^{i-1} X_i \alpha(X, X_1, \dots, \hat{X}_i, \dots, X_r) \\ &\quad + \sum_{i < j} (-1)^{i+j} \alpha(X, [X_i, X_j], X_1, \dots, \hat{X}_i, \dots, \hat{X}_j, \dots, X_r), \\ (i_X(d\alpha))(X_1, \dots, X_r) &= \sum_i (-1)^i X_i \alpha(X, X_1, \dots, \hat{X}_i, \dots, X_r) \\ &\quad + \sum_{i < j} (-1)^{i+j+1} \alpha(X, [X_i, X_j], X_1, \dots, \hat{X}_i, \dots, \hat{X}_j, \dots, X_r) \\ &\quad + X\alpha(X_1, \dots, X_r) + \sum_j (-1)^j \alpha([X, X_j], X_1, \dots, \hat{X}_j, \dots, X_r). \end{aligned}$$

Sumando ambas expresiones obtenemos

$$\begin{aligned} (di_X \alpha + i_X d\alpha)(X_1, \dots, X_r) &= X\alpha(X_1, \dots, X_r) \\ &\quad + \sum_j (-1)^j (-1)^{j-1} \alpha(X_1, \dots, [X, X_j], \dots, X_r) \\ &= X\alpha(X_1, \dots, X_r) - \sum_j \alpha(X_1, \dots, [X, X_j], \dots, X_r). \end{aligned}$$

3. Utilizando (2) y que $d \circ d = 0$, obtenemos

$$\begin{aligned} L_X \circ d &= (i_X \circ d) \circ d + (d \circ i_X) \circ d = d \circ i_X \circ d, \\ d \circ L_X &= d \circ (i_X \circ d) + d \circ (d \circ i_X) = d \circ i_X \circ d, \end{aligned}$$

luego $L_X \circ d = d \circ L_X$. □

¹En la literatura, la segunda de estas fórmulas suele llamarse «fórmula mágica de Cartan».

2.2. Campos y formas dependientes del tiempo

Hasta ahora hemos tratado con campos tangentes a una variedad diferenciable, que de forma natural nos dan ecuaciones diferenciales *autónomas* sobre esta variedad. Sin embargo, en algún uso posterior, especialmente en la demostración del teorema de Darboux (teorema 3.2.5), vamos a necesitar tratar ecuaciones *no* autónomas, es decir, ecuaciones diferenciales que dependan de un parámetro extra, generalmente el tiempo. Para ello, es necesario introducir los campos y las formas dependientes del tiempo.

Definición 2.2.1. Sea $J \subset \mathbb{R}$ un intervalo abierto y M una variedad diferenciable:

1. Un *campo tangente (diferenciable) dependiente del tiempo* de M es una aplicación

$$\begin{aligned} X : J \times M &\longrightarrow TM \\ (t, x) &\longmapsto (x, X_{t,x}) \end{aligned}$$

que es diferenciable como aplicación entre variedades.

2. Una *forma diferencial (diferenciable) de grado r dependiente del tiempo* de M es una aplicación

$$\begin{aligned} \alpha : J \times M &\longrightarrow \Lambda^r(M) \\ (t, x) &\longmapsto (x, \alpha_{t,x}) \end{aligned}$$

tal que la función

$$\begin{aligned} \alpha(X_1, \dots, X_r) : J \times M &\longrightarrow \mathbb{R} \\ (t, x) &\longmapsto \alpha_{t,x}(X_{1,x}^t, \dots, X_{r,x}^t) \end{aligned}$$

es diferenciable para cualesquiera r campos $X_1, \dots, X_r \in \mathfrak{X}(M)$.

Observación 2.2.2. Un campo y una forma dependientes del tiempo se expresan en una carta (U, \mathbf{x}) en la forma

$$\begin{aligned} X_{t,x} &= \sum X_i(t, x) \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_i} \Big|_x \\ \alpha_{t,x} &= \sum \alpha_i(t, x) d\mathbf{x}_i|_x. \end{aligned}$$

La diferenciabilidad de X y α es equivalente a la de sus componentes X_i, α_i como funciones $J \times U \rightarrow \mathbb{R}$.

Tiene sentido decir ahora qué entendemos por derivar una forma respecto al tiempo. Sea α_t una r -forma dependiente del tiempo, la *derivada temporal* de α_t es

$$\frac{d}{dt} \Big|_{t=t_0} \alpha_t = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\alpha_{t_0+h} - \alpha_{t_0}}{h}.$$

El siguiente teorema nos permite integrar campos dependientes del tiempo. Por brevedad de exposición omitimos la demostración, que puede encontrarse en [9].

Teorema 2.2.3. Sea $X : J \times M \rightarrow TM$ un campo dependiente del tiempo. Existen un abierto $V \subset J \times J \times M$ y una función $\varphi : V \rightarrow M$ tal que para cada $s \in J$ y para cada $x \in M$, el conjunto $V^{(s,x)} = \{t \in J \mid (t, s, x) \in V\}$ es un intervalo abierto que contiene a s y la curva $\gamma : V^{(s,x)} \rightarrow M$ definida por $\gamma(t) = \varphi(t, s, x)$ es la única solución maximal al problema de valor inicial

$$\begin{cases} \gamma'(t) = X_{(t, \gamma(t))}, \\ \gamma(s) = x. \end{cases}$$

Equivalentemente, podemos ver el problema de valor inicial en la siguiente forma:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi}{\partial t}(t, s, x) = X_{(t, \varphi(t, s, x))}, \\ \varphi(s, s, x) = x. \end{cases}$$

Esta φ recibe el nombre de *flujo dependiente del tiempo*. Nótese que cada $\varphi(t, s, \bullet)$ es una aplicación diferenciable de un abierto de M en M que denotaremos $\varphi_{t,s}$. Aunque aquí no lo detallamos, es sencillo probar que este flujo sigue una *ley de aditividad*: si $(t_1, t_0, x) \in V$ y $(t_2, t_1, \varphi_{t_1, t_0}(x)) \in V$, entonces $(t_2, t_0, x) \in V$ y

$$\varphi_{t_2, t_1} \circ \varphi_{t_1, t_0}(x) = \varphi_{t_2, t_0}(x).$$

Ahora podemos generalizar la derivada de Lie de formas para campos dependientes del tiempo:

$$L_{X_t} \alpha = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\varphi_{t+h, t}^* \alpha - \alpha}{h},$$

para $x \in M$. Esto nos da una fórmula que nos relaciona la derivada temporal con la derivada de Lie de formas.

Proposición 2.2.4. *Sea $X : J \times M \rightarrow TM$ un campo dependiente del tiempo y $\varphi : V \rightarrow M$ el flujo dependiente del tiempo asociado. Si α_t es una r -forma dependiente del tiempo, entonces para cualquier $(t_1, t_0, x) \in V$*

$$\left. \frac{d}{dt} \right|_{t=t_1} (\varphi_{t, t_0}^* \alpha_t)_x = \left[\varphi_{t_1, t_0}^* \left(L_{X_{t_1}} \alpha_{t_1} + \left. \frac{d}{dt} \right|_{t=t_1} \alpha_t \right) \right]_x.$$

Podemos ver esta fórmula en una notación más compacta:

$$\frac{d}{dt} \varphi_t^* \alpha_t = \varphi_t^* \left(L_{X_t} \alpha_t + \frac{d}{dt} \alpha_t \right).$$

Demostración. En primer lugar, probaremos una forma más sencilla, en la que α no depende del tiempo,

$$\left. \frac{d}{dt} \right|_{t=t_1} (\varphi_{t, t_0}^* \alpha) = \varphi_{t_1, t_0}^* (L_{X_{t_1}} \alpha).$$

En efecto

$$\left. \frac{d}{dt} \right|_{t=t_1} (\varphi_{t, t_0} \alpha) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\varphi_{t_1+h, t_0}^* \alpha - \varphi_{t_1, t_0}^* \alpha}{h} = \varphi_{t_1, t_0}^* \left(\lim_{h \rightarrow 0} \frac{\varphi_{t_1+h, t_1} \alpha - \alpha}{h} \right) = \varphi_{t_1, t_0}^* (L_{X_{t_1}} \alpha).$$

Probemos ahora la fórmula general. Tomando un $\varepsilon > 0$ lo suficientemente pequeño, consideremos la aplicación $F : (t_1 - \varepsilon, t_1 + \varepsilon) \times (t_1 - \varepsilon, t_1 + \varepsilon) \rightarrow \Gamma^k(T_x M)$ definida por

$$F(u, v) = (\varphi_{u, t_0}^* \alpha_v)_x.$$

Ahora, por la regla de la cadena

$$\left. \frac{d}{dt} \right|_{t=t_1} F(t, t) = \frac{\partial F}{\partial u}(t_1, t_1) + \frac{\partial F}{\partial v}(t_1, t_1) = [\varphi_{t_1, t_0}^* (L_{X_{t_1}} \alpha_{t_1})]_x + \left. \frac{d}{dt} \right|_{t=t_1} (\varphi_{t_1, t_0}^* \alpha_t)_x.$$

«Sacando factor común» a φ_{t_1, t_0}^* , obtenemos lo que queríamos probar. \square

2.3. Lema de Poincaré

En esta sección vamos a probar uno de los resultados fundamentales de cohomología de de Rham, que nos será útil en varias partes a lo largo del texto. Se trata del lema de Poincaré, que afirma que en un abierto *estrellado* toda forma diferencial cerrada es exacta.

Sea M una variedad diferenciable de dimensión n y sea J el intervalo $[0, 1]$. Consideremos la familia de aplicaciones

$$\begin{aligned} j_t : M &\longrightarrow J \times M \\ x &\longmapsto (t, x). \end{aligned}$$

Se define el *operador de homotopía* como la aplicación

$$\begin{aligned} h : \Lambda^k(J \times M) &\longrightarrow \Lambda^{k-1}(M) \\ \omega &\longmapsto \int_0^1 i_{\frac{\partial}{\partial t}} \omega \, dt. \end{aligned}$$

Explícitamente, para un punto $(t, x) \in J \times M$,

$$(h\omega)_x(X_1, \dots, X_{k-1}) = \int_0^1 (i_{\frac{\partial}{\partial t}} \omega)_{(t,x)}(X_1, \dots, X_{k-1}) dt = \int_0^1 \omega_{(t,x)}\left(\frac{\partial}{\partial t}, X_1, \dots, X_{k-1}\right) dt.$$

$$\begin{array}{ccc} \vdots & & \vdots \\ \downarrow d & & \downarrow d \\ \Lambda^{k-1}(J \times U) & \xrightarrow{h} & \Lambda^{k-1}(U) \\ \downarrow d & & \downarrow d \\ \Lambda^k(J \times U) & \xrightarrow{h} & \Lambda^k(U) \\ \downarrow d & & \downarrow d \\ \Lambda^{k+1}(J \times U) & \xrightarrow{h} & \Lambda^{k+1}(U) \\ \downarrow d & & \downarrow d \\ \vdots & & \vdots \end{array}$$

Proposición 2.3.1. *El operador de homotopía cumple la relación*

$$d \circ h + h \circ d = j_1^* - j_0^*,$$

con las j_t definidas como antes.

Demostración. Sea $\omega \in \Lambda^k(J \times M)$. Directamente, usando la fórmula de Cartan,

$$\begin{aligned} (d \circ h + h \circ d)(\omega_{(t,x)}) &= d\left(\int_0^1 (i_{\frac{\partial}{\partial t}} \omega)_{(t,x)} dt\right) + \int_0^1 i_{\frac{\partial}{\partial t}} (d\omega_{(t,x)}) dt \\ &= \int_0^1 (d \circ i_{\frac{\partial}{\partial t}} + i_{\frac{\partial}{\partial t}} \circ d)(\omega)_{(t,x)} dt \\ &= \int_0^1 (L_{\frac{\partial}{\partial t}} \omega)_{(t,x)} dt = \int_0^1 \left(\frac{\partial}{\partial t} \omega\right)_{(t,x)} dt \\ &= \omega_{(1,x)} - \omega_{(0,x)} = \omega_{j_1(x)} - \omega_{j_0(x)} \\ &= (j_1^* \omega)_x - (j_0^* \omega)_x. \end{aligned}$$

□

Definición 2.3.2. Un subconjunto abierto $U \subset \mathbb{R}^n$ se dice *estrellado* si, para cada $x \in U$ y para cada $t \in J$, $tx \in U$.

Por ejemplo, son conjuntos estrellados las bolas centradas en 0 o el propio \mathbb{R}^n . Podemos considerar entonces el *retracto de deformación*

$$\begin{aligned} r : J \times U &\longrightarrow U \\ (t, x) &\longmapsto tx, \end{aligned}$$

que es una aplicación diferenciable que cumple $r \circ j_0 = r(0, \bullet) \equiv 0$ y $r \circ j_1 = r(1, \bullet) = \text{id}_U$.

Proposición 2.3.3 (Lema de Poincaré). *Si $U \subset \mathbb{R}^n$ es un abierto estrellado, entonces toda forma diferencial cerrada en U es exacta. En otras palabras, para todo $k \in \mathbb{N}$, $H^k(U) = 0$.*

Demostración. Sea $\omega \in \Lambda^k(U)$. Sea r el retracto de deformación y \tilde{h} la aplicación inducida por el diagrama

$$\begin{array}{ccc} \Lambda^k(U) & \xrightarrow{r^*} & \Lambda^k(J \times U) \\ & \searrow \tilde{h} & \downarrow h \\ & & \Lambda^{k-1}(U). \end{array}$$

Tenemos entonces que

$$\begin{aligned} \tilde{h}(d\omega) + d(\tilde{h}\omega) &= h(r^*d\omega) + d(hr^*\omega) = h \circ d(r^*\omega) + d \circ h(r^*\omega) \\ &= j_1^*(r^*\omega) - j_0^*(r^*\omega) = (r \circ j_1)^*\omega - (r \circ j_0)^*\omega \\ &= \omega - 0 = \omega. \end{aligned}$$

Ahora, si ω es cerrada, entonces $d(\tilde{h}\omega) = \omega$, luego ω es exacta. □

Corolario 2.3.4. *Para cualesquiera $n, k \in \mathbb{N}$, $H^k(\mathbb{R}^n) = 0$. Es decir, en \mathbb{R}^n toda forma cerrada es exacta.*

Corolario 2.3.5. *Si $n \geq 3$, entonces $H^2(\mathbb{S}^n) = 0$.*

Demostración. Si ω es una 2-forma en \mathbb{S}^n , $n \geq 3$, $x \in \mathbb{S}^n$ y U es un disco entorno de x . Por el lema de Poincaré, existe una 1-forma α definida en U tal que $\omega = d\alpha$ en U . Sea θ una función meseta que valga 1 en un entorno $V \subset U$ de x relativamente compacto de U y 0 fuera de U . La forma

$$\omega_1 = \omega - d(\theta\alpha)$$

es cerrada con soporte compacto en $\mathbb{S}^n \setminus \{x\}$, que es difeomorfa, por proyección estereográfica φ , a \mathbb{R}^n . De nuevo por el lema de Poincaré, existe una 1-forma β de \mathbb{R}^n tal que $d\beta = \varphi^*\omega_1$. Con todo esto, tenemos

$$\omega = d\left(\theta\alpha + (\varphi^{-1})^*\beta\right).$$

Por tanto, ω es exacta en \mathbb{S}^n y $H^2(\mathbb{S}^n) = \{0\}$. □

Capítulo 3

Geometría simpléctica y mecánica hamiltoniana

3.1. Espacios vectoriales simplécticos

En esta sección repasamos algunos conceptos de álgebra lineal necesarios para estudiar geometría simpléctica. Introduciremos la noción de *espacio vectorial simpléctico* y veremos algunas de sus propiedades. Muchos de los resultados aquí expuestos pueden leerse más desarrollados en [5].

Definición 3.1.1. Un *espacio vectorial simpléctico* es un par ordenado (V, ω) , donde V es un espacio vectorial sobre \mathbb{R} y

$$\omega : V \times V \rightarrow \mathbb{R}$$

es una forma bilineal antisimétrica no degenerada.

Clasificación de formas bilineales antisimétricas

1. Sean ω una forma bilineal antisimétrica sobre un espacio vectorial V de dimensión finita. Entonces existe una base respecto de la cual la matriz asociada a ω es

$$\begin{pmatrix} 0 & -I_n & 0 \\ I_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

donde I_n es la matriz identidad $n \times n$ y $n \leq \frac{1}{2} \dim(V)$.

2. Si (V, ω) es un espacio vectorial simpléctico de dimensión finita, entonces $\dim(V) = 2n$ para cierto $n \in \mathbb{N}$. En tal caso, se dice que $\mathcal{B} \subset V$ es una *base simpléctica* de V si la matriz asociada a ω en \mathcal{B} es

$$J_n := \begin{pmatrix} 0 & -I_n \\ I_n & 0 \end{pmatrix}.$$

3. Podemos ver la forma bilineal ω de matriz asociada J_n como una 2-forma alternada en V . Si $\{u_1, \dots, u_n, v_1, \dots, v_n\}$ es una base simpléctica y $\{\varphi_1, \dots, \varphi_n, \psi_1, \dots, \psi_n\}$ es su base dual, entonces es inmediato comprobar que

$$\omega = \sum_{i=1}^n \psi_i \wedge \varphi_i.$$

4. Llamaremos *n-ésima forma simpléctica estándar* a la forma $\Omega_n : \mathbb{R}^{2n} \rightarrow \mathbb{R}^{2n}$ de matriz asociada J_n en la base canónica de \mathbb{R}^{2n} . Llamaremos *espacio simpléctico estándar 2n-dimensional* a $(\mathbb{R}^{2n}, \Omega_n)$. Deducimos también de lo anterior que todo espacio vectorial simpléctico de dimensión $2n$ es isomorfo a $(\mathbb{R}^{2n}, \Omega_n)$.

Aplicaciones simplécticas

Sean (V, ω) y (V', ω') espacios vectoriales simplécticos. Decimos que una aplicación lineal $f : V \rightarrow V'$ es *simpléctica* si

$$\omega'(f(v), f(w)) = \omega(v, w)$$

para cualesquiera $v, w \in V$. En otras palabras $f^*\omega' = \omega$.

Ahora, si $w \neq 0$ y $f(v) = 0$, entonces $\omega(v, w) = 0$ y, como ω es no degenerada, $v = 0$, de modo que $\ker f = \{0\}$. Es decir, toda aplicación simpléctica es inyectiva.

En el caso en que V y V' tienen la misma dimensión, entonces f es un isomorfismo que lleva una base simpléctica de (V, ω) a una base simpléctica de (V', ω') .

El grupo simpléctico

Sea (V, ω) un espacio vectorial simpléctico de dimensión $2n$. El conjunto de las aplicaciones lineales simplécticas de V en V es un subgrupo de $\text{GL}(2n)$. Este grupo se conoce como *n-ésimo grupo simpléctico* y se denota por $\text{Sp}(n)$.

Asignando a cada $f \in \text{Sp}(n)$ su matriz asociada A en una base simpléctica fijada, el grupo simpléctico se puede representar por medio de las matrices $2n \times 2n$ que cumplen

$$J_n = A^t J_n A.$$

Estas matrices se dicen *matrices simplécticas*. De aquí deducimos inmediatamente, por un razonamiento análogo al que haríamos para matrices ortogonales, que todas las matrices simplécticas tienen determinante 1 o -1 . Sin embargo, podemos probar un resultado aún más fuerte sobre el grupo simpléctico: su *subgrupo especial* (es decir, el subgrupo de las aplicaciones de determinante 1) coincide con él mismo.

Proposición 3.1.2. *Toda aplicación lineal simpléctica tiene determinante 1.*

Demostración. Si Ω_n es la forma simpléctica canónica, entonces $\Lambda = \Omega_n \wedge \cdots \wedge \Omega_n^{(n)}$ es una forma de grado máximo, luego, por el teorema del determinante, $f^*(\Lambda) = \det(f)\Lambda$. Ahora, como f es simpléctica,

$$f^*(\Lambda) = (\Omega_n \circ f) \wedge \cdots \wedge (\Omega_n \circ f) = \Omega_n \wedge \cdots \wedge \Omega_n = \Lambda.$$

Por tanto, $\det(f) = 1$. □

3.2. Variedades simplécticas

Una vez repasados los conceptos básicos de la geometría lineal simpléctica, estamos preparados para entender lo que son las *variedades simplécticas* y estudiar las propiedades que exhiben.

Definición 3.2.1. Una *variedad simpléctica* es un par (M, ω) donde M es una variedad diferenciable de dimensión $2n$ y $\omega \in \Gamma^2(M)$ es una 2-forma cerrada y no degenerada (para todo $x \in M$, ω_x es no degenerada).

De la propia definición de variedad simpléctica podemos ya deducir unas cuantas restricciones para lo que puede y lo que no puede ser una variedad simpléctica. En primer lugar, claramente todas tienen que tener dimensión par, ya que lo hemos impuesto por definición, aunque venía motivado del hecho de que solo en dimensión par podemos tener matrices antisimétricas no degeneradas. Veamos entonces un primer ejemplo de variedad simpléctica, a parte del ya estudiado espacio simpléctico estándar, al que trivialmente se le puede dotar de la estructura de variedad simpléctica.

Ejemplo 3.2.2. Podemos dar un ejemplo de variedad simpléctica si consideramos la esfera \mathbb{S}^2 y su forma de área ω , que es cerrada por ser de grado máximo. Si vemos \mathbb{S}^2 sumergida en \mathbb{R}^3 como la esfera de radio 1 y consideramos el radio vector ν en cada punto de la esfera con coordenadas (x, y, z) , la expresión concreta de esta forma en este punto es

$$\omega = \det(\nu, \bullet, \bullet) = xdy \wedge dz - ydx \wedge dz + zdx \wedge dy.$$

En efecto, como en la esfera unidad

$$x dx + y dy + z dz = 0$$

entonces

$$\begin{aligned} x\omega &= x^2 dy \wedge dz + x dx (-y dz + z dy) \\ &= x^2 dy \wedge dz + (-y dx \wedge dz + z dx \wedge dy) \\ &= (x^2 + y^2 + z^2) dy \wedge dz, \end{aligned}$$

y, por un cálculo análogo

$$y\omega = -(x^2 + y^2 + z^2) dx \wedge dz$$

y

$$z\omega = (x^2 + y^2 + z^2) dx \wedge dy.$$

Como el miembro de la derecha de cada una de estas expresiones sólo se anula en el plano tangente a la esfera en los puntos en los que se anula el correspondiente x , y o z de la izquierda, tenemos que la forma ω nunca es nula en la esfera.

También se puede ver cómo se expresa esta forma en coordenadas esféricas

$$\begin{cases} x = \cos \phi \sin \theta \\ y = \sin \phi \cos \theta \\ z = \cos \theta. \end{cases}$$

Tenemos entonces

$$\begin{cases} dx = -\sin \phi \sin \theta d\phi + \cos \phi \cos \theta d\theta \\ dy = \cos \phi \sin \theta d\phi + \sin \phi \cos \theta d\theta \\ dz = -\sin \theta d\theta, \end{cases}$$

$$\begin{cases} dx \wedge dy = -\sin \theta \cos \theta d\phi \wedge d\theta \\ dx \wedge dz = \sin \phi \sin^2 \theta d\phi \wedge d\theta \\ dy \wedge dz = -\cos \phi \sin^2 \theta d\phi \wedge d\theta. \end{cases}$$

Finalmente

$$\omega = -(\cos^2 \phi \sin^3 \theta + \sin^2 \phi \sin^3 \theta + \sin \theta \cos^2 \theta) d\phi \wedge d\theta = -\sin \theta d\phi \wedge d\theta,$$

que es la forma de área típica en coordenadas esféricas.

Vamos a obtener ahora algunas condiciones que tienen que cumplir las variedades simplécticas que se deducen directamente de la definición.

Proposición 3.2.3. *Toda variedad simpléctica es orientable.*

Demostración. Como ω es no degenerada, $\omega^n = \omega \wedge \cdots \wedge \omega$ es una forma de grado máximo nunca nula, luego la variedad es orientable. \square

A esta ω^n se le suele llamar *volumen de Liouville* de M ya que, aunque aquí no lo desarrollemos, está relacionada con el elemento de volumen en M si definieramos en ésta una estructura riemanniana.

Proposición 3.2.4. *Si (M, ω) es una variedad simpléctica compacta y sin borde, entonces su segundo grupo de cohomología de de Rham $H^2(M)$ es no trivial: ω no es exacta.*

Demostración. Consideramos en M el volumen de Liouville ω^n . Ahora, si $\omega = d\alpha$, entonces $\omega^n = d(\alpha \wedge \omega^{n-1})$. Por el teorema de Stokes

$$\int_M \omega^n = \int_M d(\alpha \wedge \omega^{n-1}) = \int_{\partial M = \emptyset} \alpha \wedge \omega^{n-1} = 0.$$

Pero M es compacta y ω^n es una forma diferencial de grado máximo, luego $\int_M \omega^n$ no puede ser igual a 0. Por tanto, ω es cerrada y no es exacta, luego $[\omega] \neq 0$ y $H^2(M) \neq \{0\}$. \square

Como consecuencia del resultado anterior, las esferas de dimensión superior a 2 no admiten una estructura simpléctica ya que $H^2(\mathbb{S}^n) = 0$ si $n \geq 3$.

Teorema de Darboux

Prosiguiendo el estudio de las variedades simplécticas más allá de la propia definición nos encontramos con un resultado muy fuerte, central en toda la geometría simpléctica: las formas simplécticas son localmente constantes. Esto establece una diferenciación clara con la geometría riemanniana, donde existen invariantes locales, como la curvatura, de modo que pedir a una métrica riemanniana que sea localmente constante es como pedirle a la variedad que sea localmente plana. Sin embargo, en geometría simpléctica la situación es distinta ya que no hay invariantes locales.

Teorema 3.2.5 (Darboux). *Sean M una variedad diferenciable y ω una 2-forma cerrada y no degenerada en M . Entonces, para todo $x \in M$ existe una carta (U, φ) en x tal que $\varphi^*\omega$ tiene coeficientes constantes.*

Demostración. Como se trata de una cuestión local, podemos suponer que estamos en \mathbb{R}^{2n} . Sea $\omega_1 = \omega_x$, que tiene coeficientes constantes, y sea

$$\omega_t = t\omega_1 + (1-t)\omega = \omega + t(\omega_1 - \omega),$$

para cada $t \in \mathbb{R}$. Como $\omega_{t,x} = \omega_x$, para todo $t \in \mathbb{R}$, ω_t es no degenerada en x . Por tanto, si J es un intervalo abierto acotado tal que $[0, 1] \in J$, existe un entorno $U \subset M$ de x en el que ω_t es no degenerada para cada $t \in J$. Ahora, como $\omega_1 - \omega$ es cerrada, por el Lema de Poincaré existirá una 1-forma α en tal que $\omega_1 - \omega = d\alpha$. Además, podemos asumir $\alpha_x = 0$.

Ahora, por ser ω_t no degenerada, da un isomorfismo entre campos y 1-formas (de forma análoga a como vimos en la sección 1): para $t \in J$, podemos definir el campo dependiente del tiempo X_t tal que $i_{X_t}\omega_t = -\alpha$ y además $X_{t,x} = 0$ por ser $\alpha_x = 0$. Ahora, si $\varphi : V \rightarrow U$ es el flujo dependiente del tiempo asociado a X , entonces $\varphi(t, 0, x) = x$ para todo $t \in J$, luego $J \times \{0\} \times \{x\} \subset V$. Como V es abierto en $J \times J \times M$ y $[0, 1]$ es compacto, existe un entorno U_0 de x tal que $[0, 1] \times \{0\} \times U_0 \subset V$.

Por tanto, si $\varphi_t = \varphi(t, 0, \bullet)$ para cada $t \in [0, 1]$ se sigue, por la proposición 2.2.4 y por las fórmulas de Cartan,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\varphi_t^*\omega_t) &= \varphi_t^*(L_{X_t}\omega_t) + \varphi_t^*\left(\frac{d}{dt}\omega_t\right) = \varphi_t^*(i_{X_t}d\omega_t + di_{X_t}\omega_t) + \varphi_t^*(\omega_1 - \omega) \\ &= \varphi_t^*(0 - d\alpha + \omega_1 - \omega) = 0. \end{aligned}$$

De modo que $\varphi_1^*\omega_1 = \varphi_0^*\omega_0 = \omega$. Por tanto, $\varphi_{1,*}$ es simpléctica, luego es un isomorfismo, lo que implica que φ_1 es un difeomorfismo local. Así, reduciendo el entorno si es necesario, encontramos la carta que estábamos buscando: basta tomar $\varphi = \varphi_1^{-1}$, y $\varphi^*\omega = \omega_1$ tiene coeficientes constantes. \square

Corolario 3.2.6. Sea (M, ω) una variedad simpléctica. Para cada $x \in M$ existe un entorno U de x y unas coordenadas $(q, p) = (q_1, \dots, q_n, p_1, \dots, p_n)$ en x tales que

$$\omega = \sum_{i=1}^n dp_i \wedge dq_i.$$

Una carta $(U, (q, p))$ de este tipo se llama carta de Darboux.

Demostración. Basta tomar la carta (U, φ) , dada por el teorema de Darboux, para la cual la forma $\varphi^*\omega$ es constante. Tomamos ahora la aplicación lineal $A : \mathbb{R}^{2n} \rightarrow \mathbb{R}^{2n}$, que diagonaliza $\varphi^*\omega$ a la forma Ω_n , y las coordenadas $\mathbf{x} = (q, p)$ para las cuales el siguiente diagrama conmuta

$$\begin{array}{ccc} U & \xrightarrow{\varphi} & \mathbb{R}^{2n} \\ & \searrow \varphi_* & \downarrow A \\ & & \mathbb{R}^{2n}. \end{array}$$

Entonces en la carta (U, \mathbf{x}) podemos escribir $\omega = \mathbf{x}^*\Omega_n = \sum_{i=1}^n dp_i \wedge dq_i$. □

Simplectomorfismos

Para terminar la sección, vamos a estudiar lo que podríamos tomar como morfismos en una categoría de las variedades simplécticas: aplicaciones diferenciables que preserven las 2-formas.

Definición 3.2.7. Sean (M, ω) y (M', ω') variedades simplécticas y $f : M \rightarrow M'$ una aplicación diferenciable. Decimos que f es un *simplectomorfismo* si $f^*\omega' = \omega$, es decir, si para cada $x \in M$, $(d_x f)^*\omega'_{f(x)} = \omega_x$. Equivalentemente, f es un simplectomorfismo si la aplicación lineal $d_x f : T_x M \rightarrow T_{f(x)} M'$ es simpléctica.

Una propiedad básica de los simplectomorfismos es que preservan las cartas de Darboux.

Proposición 3.2.8. Sean (M, ω) y (M', ω') variedades simplécticas y $f : M \rightarrow M'$ una aplicación diferenciable. Entonces f es un simplectomorfismo si y sólo si, para cada $x \in M$, si $(U, (q, p))$ es una carta de Darboux en $f(x)$, entonces $(f^{-1}(U), (q \circ f, p \circ f))$ es una carta de Darboux en x .

Demostración. Basta darse cuenta de que

$$\sum_{i=1}^n d(p_i \circ f) \wedge d(q_i \circ f) = \sum_{i=1}^n f^*(dp_i \wedge dq_i) = f^*\left(\sum_{i=1}^n dp_i \wedge dq_i\right) = f^*\omega'$$

es igual a ω si y sólo si f es un simplectomorfismo. □

Enunciamos también una consecuencia inmediata de la definición de simplectomorfismo:

Proposición 3.2.9. Los simplectomorfismos preservan el volumen de Liouville ω^n .

3.3. Campos simplécticos y campos hamiltonianos

Sea (M, ω) una variedad simpléctica. Análogamente a lo visto en la sección 1 y en la demostración del teorema de Darboux, la aplicación

$$\begin{array}{ccc} T_x M & \longrightarrow & (T_x M)^* \\ \xi & \longmapsto & \omega(\bullet, \xi), \end{array}$$

es un isomorfismo lineal entre campos y 1-formas. Resulta que a cada campo X le podemos asignar la forma $-i_X\omega$. Veremos enseguida como esta propiedad, junto con la fórmula de Cartan nos va a permitir obtener resultados muy interesantes.

En primer lugar, observemos que si f_t es una familia uniparamétrica de simplectomorfismos y X es su generador infinitesimal, entonces

$$L_X\omega = \left. \frac{d}{dt} \right|_{t=0} f_t^*\omega = 0.$$

En la otra dirección también es cierto, si X es un campo con $L_X\omega = 0$, su flujo φ es una familia uniparamétrica de simplectomorfismos. En efecto,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\varphi_t^*\omega_{\varphi_t(x)}) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\varphi_{t+h}^*\omega_{\varphi_{t+h}(x)} - \varphi_t^*\omega_{\varphi_t(x)}}{h} \\ &= \varphi_t^* \left(\lim_{h \rightarrow 0} \frac{\varphi_h^*\omega_{\varphi_h(\varphi_t(x))} - \omega_{\varphi_t(x)}}{h} \right) \\ &= \varphi_t^*((L_X\omega)_{\varphi_t(x)}) = \varphi_t^*(0) = 0. \end{aligned}$$

Por tanto, $\varphi_t^*\omega_{\varphi_t(x)} = \omega_x$.

Por otro lado, aplicando la fórmula de Cartan

$$L_X\omega = i_X(d\omega) + d(i_X\omega) = d(i_X\omega),$$

ya que ω es cerrada. Por tanto, si X es un campo tangente a una variedad simpléctica, $L_X\omega = 0$ si y sólo si $i_X\omega$ es cerrada. Todo esto nos lleva a dar la siguiente definición:

Definición 3.3.1. Sea (M, ω) una variedad simpléctica. Un campo $X \in \mathfrak{X}(M)$ se dice *simpléctico*, si $L_X\omega = 0$ o, equivalentemente, si $i_X\omega$ es una 1-forma cerrada. El conjunto de los campos simplécticos de (M, ω) se denota por $\mathfrak{X}_\omega(M)$.

En el caso en que X sea un campo simpléctico y además $i_X\omega$ sea exacta, existe una función $F : M \rightarrow \mathbb{R}$ con $i_X\omega = -dF$. Denotamos entonces $X = X^F$ y decimos que X^F es un *campo hamiltoniano* con hamiltoniano F .

Localmente, si tomamos una carta de Darboux en un punto $x \in M$, podemos escribir $x = (q_1, \dots, q_n, p_1, \dots, p_n)$ y una función $F : M \rightarrow \mathbb{R}$ como $F(q_1, \dots, q_n, p_1, \dots, p_n)$. Tenemos entonces

$$dF = \sum_{i=1}^n \frac{\partial F}{\partial q_i} dq_i + \frac{\partial F}{\partial p_i} dp_i,$$

de modo que el campo de hamiltoniano F tiene la forma

$$X^F = \sum_{i=1}^n X_{q_i}^F \frac{\partial}{\partial q_i} + X_{p_i}^F \frac{\partial}{\partial p_i}.$$

Ahora,

$$dF = -i_{X^F}\omega = - \sum_{i,j=1}^n dp_i \wedge dq_j \left(X_{q_j}^F \frac{\partial}{\partial q_j} + X_{p_j}^F \frac{\partial}{\partial p_j}, \bullet \right) = \sum_{i=1}^n X_{q_i}^F dp_i - X_{p_i}^F dq_i.$$

Por tanto, las componentes del campo son $X_{q_i}^F = \frac{\partial F}{\partial p_i}$ y $X_{p_i}^F = -\frac{\partial F}{\partial q_i}$. Si consideramos ahora las curvas integrales $(q_1(t), \dots, q_n(t), p_1(t), \dots, p_n(t))$ del campo X^F , obtenemos ecuaciones de Hamilton con hamiltoniano F , tal y como las vimos en la sección 1

$$\begin{cases} \dot{q}_i(t) &= \frac{\partial F}{\partial p_i}(t) \\ \dot{p}_i(t) &= -\frac{\partial F}{\partial q_i}(t), \end{cases}$$

para $i = 1, \dots, n$.

Cabe preguntarse ahora cuándo los campos simplécticos y los campos hamiltonianos coincidirán. Esto es fácil de ver. Si consideramos las aplicaciones $F \mapsto X^F$ y $X \mapsto [i_X\omega]$, nótese que existe una sucesión exacta de espacios vectoriales

$$\mathcal{C}^\infty(M) \xrightarrow{X^\bullet} \mathfrak{X}_\omega(M) \xrightarrow{[i_\bullet\omega]} H^1(M),$$

donde precisamente $\ker([i_\bullet\omega]) = \text{im}(X^\bullet)$ es el conjunto de campos hamiltonianos. Si $H^1(M) = 0$ (en particular, si M es simplemente conexo), entonces todo campo simpléctico es hamiltoniano. Como consecuencia, todo campo simpléctico es localmente hamiltoniano. Es decir, si X es un campo simpléctico, en todo punto $x \in M$ podemos tomar un entorno U simplemente conexo en el que hay una función $F : U \rightarrow \mathbb{R}$ tal que $-i_X\omega = dF$ en U .

3.4. Corchete de Poisson

Podemos seguir sacándole jugo a los campos hamiltonianos y definir una nueva estructura en las variedades simplécticas. En esta sección veremos que toda variedad simpléctica es una *variedad de Poisson*.

Definición 3.4.1. Sea (M, ω) una variedad simpléctica y $F, G : M \rightarrow \mathbb{R}$. Se define el *corchete de Poisson de F y G* como la función

$$\{F, G\}(x) = (X^F G)(x),$$

para cada $x \in M$.

Proposición 3.4.2. Sean $F, G : M \rightarrow \mathbb{R}$. Entonces,

1. $\{F, G\} = dG(X^F) = \omega(X^F, X^G)$ y
2. $[X^F, X^G] = X^{\{F, G\}}$.

Demostración.

1. $\{F, G\} = X^F(G) = dG(X^F) = -i_{X^G}\omega(X^F) = -\omega(X^G, X^F) = \omega(X^F, X^G)$.
2. Por las fórmulas de Cartan:

$$\begin{aligned} i_{[X^F, X^G]}\omega &= L_{X^F}(i_{X^G}\omega) - i_{X^G}(L_{X^F}\omega) \\ &= di_{X^F}i_{X^G}\omega + i_{X^F}di_{X^G}\omega - i_{X^G}di_{X^F}\omega - i_{X^G}i_{X^F}d\omega \\ &= d(\omega(X^G, X^F)) - i_{X^F}(d(dG)) + i_{X^G}(d(dF)) - i_{X^G}i_{X^F}(0) \\ &= d\{G, F\} = -i_{X^{\{G, F\}}}\omega = i_{X^{\{F, G\}}}\omega. \end{aligned}$$

□

Localmente, si tomamos una carta de Darboux (q, p) en un punto $x \in M$, podemos escribir

$$\begin{aligned} \{F, G\} &= dG(X^F) = \left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial G}{\partial q_i} dq_i + \frac{\partial G}{\partial p_i} dp_i \right) \left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial F}{\partial p_i} \frac{\partial}{\partial q_i} - \frac{\partial F}{\partial q_i} \frac{\partial}{\partial p_i} \right) \\ &= \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial p_i} \frac{\partial G}{\partial q_i} - \frac{\partial F}{\partial q_i} \frac{\partial G}{\partial p_i} \right). \end{aligned}$$

Ésta es la forma del corchete de Poisson que se suele ver en mecánica clásica. Observamos también las relaciones

$$\begin{cases} \{F, q_i\} &= \frac{\partial F}{\partial p_i} \\ \{F, p_i\} &= -\frac{\partial F}{\partial q_i}. \end{cases}$$

Éstas son precisamente las componentes del campo X^F . Si ahora consideramos las curvas integrales de F , podemos ver que las ecuaciones de Hamilton toman una forma más simple

$$\begin{cases} \dot{q}_i &= \{F, q_i\} \\ \dot{p}_i &= \{F, p_i\}. \end{cases}$$

De aquí también obtenemos lo que se conoce como las *relaciones de conmutación canónicas*:

$$\{p_i, q_j\} = \delta_{ij}.$$

Recíprocamente, si $(U, (q, p))$ es una carta en un punto $x \in M$ tal que, para cada $i, j = 1, \dots, n$, $\{q_i, q_j\} = \{p_i, p_j\} = 0$ y $\{q_i, p_j\} = \delta_{ij}$, entonces es una carta de Darboux. En efecto, como todos los corchetes de Poisson entre las coordenadas son constantes, entonces $[X^{q_i}, X^{q_j}] = [X^{p_i}, X^{p_j}] = [X^{q_i}, X^{p_j}] = 0$, de modo que los campos $X_{p_1}, \dots, X_{p_n}, X_{q_1}, \dots, X_{q_n}$ son coordenados. Esto es, reduciendo el entorno si es preciso, existen unas coordenadas (\mathbf{x}, \mathbf{y}) tales que $X^{p_i} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_i}$ y $X^{q_i} = -\frac{\partial}{\partial \mathbf{y}_i}$. Ahora,

$$\omega\left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_i}, \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_j}\right) = \omega(X^{p_i}, X^{p_j}) = \{p_i, p_j\} = 0,$$

$$\omega\left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{y}_i}, \frac{\partial}{\partial \mathbf{y}_j}\right) = -\omega(X^{q_i}, X^{q_j}) = -\{q_i, q_j\} = 0$$

y

$$\omega\left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_i}, \frac{\partial}{\partial \mathbf{y}_j}\right) = \omega(X^{p_i}, -X^{q_j}) = -\{p_i, q_j\} = -\delta_{ij}.$$

De modo que la carta $(U, (\mathbf{x}, \mathbf{y}))$ es de Darboux. Ahora,

$$dq_i = -i_{X^{q_i}}\omega = i_{\frac{\partial}{\partial \mathbf{y}_i}}\omega = d\mathbf{x}_i$$

y

$$dp_i = -i_{X^{p_i}}\omega = -i_{\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}_i}}\omega = d\mathbf{y}_i,$$

luego $\mathbf{x}_i = q_i$ e $\mathbf{y}_i = p_i$ (salvo tal vez una constante). Por tanto, la carta $(U, (q, p))$ es de Darboux.

Veamos ahora las propiedades del corchete de Poisson.

Proposición 3.4.3. *La aplicación $\{\cdot, \cdot\} : \mathcal{C}^\infty(M) \times \mathcal{C}^\infty(M) \rightarrow \mathcal{C}^\infty(M)$ que a cada par de funciones le asigna su corchete de Poisson cumple las siguientes propiedades:*

1. *Es bilineal,*
2. *es antisimétrica,*
3. *cumple la identidad de Jacobi*

$$\{\{A, B\}, C\} + \{\{B, C\}, A\} + \{\{C, A\}, B\} = 0,$$

4. *y cumple la regla de Leibniz*

$$\{A, BC\} = \{A, B\}C + B\{A, C\},$$

es decir, $\{A, \bullet\}$ es una derivación.

En particular, las propiedades 1-3 nos dicen que $(\mathcal{C}^\infty(M), \{, \})$ es un *álgebra de Lie*. Al añadir la propiedad 4 decimos que es un *álgebra de Poisson*.

Demostración. La demostración de 1 y 2 es inmediata del hecho de que $\{F, G\} = \omega(X^F, X^G)$ y de la linealidad de X^\bullet .

Para probar 3 tenemos

$$\begin{aligned} [X^A, X^B](C) &= X^A \circ X^B(C) - X^B \circ X^A(C) = X^A(\{B, C\}) - X^B(\{A, C\}) \\ &= \{A, \{B, C\}\} - \{B, \{A, C\}\}. \end{aligned}$$

Mientras que

$$[X^A, X^B](C) = X^{\{A, B\}}(C) = \{\{A, B\}, C\}.$$

Tenemos entonces

$$\{\{A, B\}, C\} = \{A, \{B, C\}\} - \{B, \{A, C\}\} = -\{\{B, C\}, A\} - \{\{C, A\}, B\}.$$

Pasando el segundo término al otro lado obtenemos la identidad de Jacobi.

La regla de Leibniz (4) es inmediata porque $\{A, \bullet\}(x) = X_x^A$ es una derivación. \square

En general, si en una variedad diferenciable M consideramos el conjunto de funciones $\mathcal{C}^\infty(M)$ y lo dotamos de la estructura de álgebra de Poisson mediante un corchete $\{, \}$, decimos que el par $(M, \{, \})$ es una *variedad de Poisson*. Podemos reducir el enunciado de la proposición anterior simplemente a afirmar que *toda variedad simpléctica es de Poisson*.

3.5. Mecánica en variedades simplécticas

Una vez estudiadas las estructuras básicas de las variedades simplécticas, veamos cómo éstas plantean el marco natural en el que estudiar la mecánica clásica, dando lo que se denomina el *formalismo hamiltoniano*.

En general, un sistema mecánico se compone de tres partes: un conjunto de *estados* o configuraciones, cuyos elementos contienen toda la información posible sobre el sistema en cierto instante, un conjunto de *observables*, cantidades medibles del sistema, que «extraen» la información sobre éste, y una *ley de evolución temporal*, que nos dice cómo se comportará el sistema a tiempos futuros. En el caso de la mecánica hamiltoniana, estas partes se pueden dar en el contexto de la geometría simpléctica, a saber, un *sistema mecánico hamiltoniano* se compone de:

Estados El conjunto de estados de un sistema hamiltoniano viene dado por una variedad simpléctica (M, ω) , comúnmente llamada *espacio de fases*.

Observables Los observables del sistema son las funciones $\mathcal{C}^\infty(M)$, que además forman un álgebra de Poisson, como vimos en la sección anterior.

Evolución temporal La ley de evolución temporal está determinada por una función $H : M \rightarrow \mathbb{R}$ (característica de cada sistema), llamada *hamiltoniano del sistema*. Las trayectorias del sistema seguirán las curvas integrales del campo X^H , luego, localmente, son solución de las ecuaciones de Hamilton

$$\begin{cases} \dot{q}_i(t) = \frac{\partial H}{\partial p_i}(t), \\ \dot{p}_i(t) = -\frac{\partial H}{\partial q_i}(t). \end{cases}$$

O, en su forma más compacta

$$\begin{cases} \dot{q}_i(t) = \{H, q_i(t)\}, \\ \dot{p}_i(t) = \{H, p_i(t)\}. \end{cases}$$

El flujo φ^H generado por X^H se llama *flujo hamiltoniano* del sistema y contiene toda la información sobre su comportamiento. El hamiltoniano H también determina la evolución temporal de los observables, según la *ecuación de Liouville*

$$\left. \frac{d}{dt} \right|_{t=0} F(\varphi_t^H(x)) = \{H, F\}(x).$$

De manera más formal, podemos definir un *sistema hamiltoniano* simplemente como un par (M, H) , donde $M = (M, \omega)$ es una variedad simpléctica y $H : M \rightarrow \mathbb{R}$ una función.

Teorema de recurrencia de Poincaré

Como todos los campos hamiltonianos son simplécticos, los flujos hamiltonianos preservan la forma ω y en particular el volumen de Liouville ω^n . Este resultado se conoce clásicamente como el *teorema de Liouville*. A la vista de esto, los sistemas hamiltonianos tendrán una de las características más importantes de los sistemas que preservan el volumen, el *teorema de recurrencia de Poincaré*¹:

Proposición 3.5.1 (Teorema de recurrencia de Poincaré). *Sea $D \subset \mathbb{R}^n$ un conjunto de volumen finito y sea $g : D \rightarrow D$ que preserva el volumen euclídeo. Entonces, para cualquier $U \subset D$ abierto, hay un punto $x \in D$ y un $n \in \mathbb{N}$, $n > 0$, tal que $g^n(x) \in U$.*

Demostración. Consideramos la familia

$$\{g^n U | n \in \mathbb{N}\}.$$

Todos estos conjuntos tienen el mismo volumen y, si no se cortaran en ningún punto, D tendría volumen infinito. Por tanto, existen $k, l \in \mathbb{N}$, $k > l$ tal que

$$g^k U \cap g^l U \neq \emptyset,$$

luego $A = g^{k-l} U \cap U \neq \emptyset$. Entonces, dado $y \in A$, existen $x \in U$ y $n = k - l$ tal que $y = g^n(x) \in U$. \square

Ejemplo 3.5.2. Sea D una circunferencia y g la rotación de ángulo α . Si $\alpha = 2\pi(m/n)$, entonces g^n es la identidad y el resultado es obvio. Pero, si α es un múltiplo irracional de 2π , entonces, por el teorema de recurrencia de Poincaré, para todo $x \in D$ y para todo $\delta > 0$ existe un $n \in \mathbb{N}$ tal que $g^n(x) \in B_\delta(x)$. De aquí se sigue que, dado $x \in D$, el conjunto $\{g^k(x) | k \in \mathbb{N}\}$ es denso en D . Más adelante veremos una aplicación de este ejemplo a mecánica hamiltoniana.

Transformaciones canónicas

Para terminar la sección, vamos a ver cómo se comportan las ecuaciones de Hamilton mediante cambios de coordenadas:

Proposición 3.5.3. *Sean M, M' variedades simplécticas y $H : M' \rightarrow \mathbb{R}$. Si $f : M \rightarrow M'$ es una aplicación diferenciable, entonces*

$$f^* i_{X^H} \omega' = i_{X^{H \circ f}} \omega.$$

Demostración. Basta hacer los cálculos,

$$f^* i_{X^H} \omega' = f^* dH = dH \circ f_* = d(H \circ f) = i_{X^{H \circ f}} \omega.$$

¹En inglés *Poincaré recurrence theorem*. Nótese que aquí la palabra «recurrencia» no toma el significado habitual en matemáticas (por ejemplo en «construcción de sucesiones por recurrencia»), que se traduce del inglés *recursion*. El diccionario Oxford define *recursion* como “the repeated application of a recursive procedure or definition”. Por otro lado, define *recurrence* como “the fact of occurring again”, que podría traducirse también como «repetición» o «reaparición».

□

Vamos a buscar entonces cambios de coordenadas que mantengan las ecuaciones de Hamilton invariantes, es decir, que al escribir las ecuaciones en las nuevas coordenadas se obtengan precisamente las ecuaciones de Hamilton del mismo hamiltoniano, expresado en las nuevas coordenadas.

Definición 3.5.4. Sean (M, H) un sistema hamiltoniano y $f : M \rightarrow M$ una aplicación diferenciable. Decimos que f es una *transformación canónica* si deja las ecuaciones de Hamilton invariantes, es decir, si $X^H = f_* X^{H \circ f}$.

Proposición 3.5.5. Sean (M, ω) una variedad simpléctica y $f : M \rightarrow M$ un difeomorfismo local. Son equivalentes:

1. f es un *simplectomorfismo*,
2. para todo $H : M \rightarrow \mathbb{R}$, f es una *transformación canónica* del sistema (M, H) ,
3. f deja invariante el corchete de Poisson, es decir, para cualesquiera $F, G \in \mathcal{C}^\infty(M)$,

$$\{F, G\} \circ f = \{F \circ f, G \circ f\}.$$

Demostración.

1 \implies 2. En primer lugar, por una comprobación inmediata se tiene que si f es un difeomorfismo local, para cualquier forma λ , y para cualquier campo X ,

$$f^* i_X \lambda = i_{(f_*)^{-1} X} f^* \lambda.$$

Como f es un simplectomorfismo, $f^* \omega = \omega$, luego, si aplicamos la proposición 3.5.3,

$$i_{X^{H \circ f}} \omega = f^*(i_{X^H} \omega) = i_{(f_*)^{-1} X^H} f^* \omega = i_{(f_*)^{-1} X^H} \omega$$

por tanto $(f_*)^{-1} X^H = X^{H \circ f}$, de modo que $X^H = f_* X^{H \circ f}$, es decir, f es una transformación canónica de (M, H) .

2 \implies 1. Si $f_* X^{H \circ f} = X^H$ para todo $H : M \rightarrow \mathbb{R}$, entonces, de nuevo por la proposición 3.5.3 y por la fórmula anterior,

$$i_{X^H} \omega = i_{f_* X^{H \circ f}} \omega = (f^*)^{-1} (i_{X^{H \circ f}} f^* \omega) = (f^*)^{-1} f^* (i_{X^H} f^* \omega) = i_{X^H} f^* \omega.$$

Luego $f^* \omega = \omega$ y f es un simplectomorfismo.

3 \iff 2. Tenemos,

$$\{F, G\} \circ f(x) = X_{f(x)}^G(F) = ((f_*)^{-1} X^G)_x (F \circ f)$$

$$\{F \circ f, G \circ f\} = X^{G \circ f}(F \circ f).$$

Por tanto, $\{F, G\} \circ f = \{F \circ f, G \circ f\}$ para cualesquiera F, G si y sólo si $f_* X^{G \circ f} = X^G$, para todo G . □

3.6. Simetrías y leyes de conservación

En esta sección damos la noción de *cantidad conservada* o *integral primera* de un sistema hamiltoniano y estudiamos la relación que tiene con las simetrías del sistema, mediante el mecanismo descubierto por Emmy Noether, que constituye una de las ideas centrales a toda la Física.

Definición 3.6.1. Sea (M, H) un sistema hamiltoniano. Una función $F : M \rightarrow \mathbb{R}$ se dice que es una *integral primera* del sistema o una *cantidad conservada* si es constante a lo largo del flujo hamiltoniano. Esto es, si

$$F(\varphi_t^H(x)) = F(x)$$

para todo $t \geq 0$ y para todo $x \in M$.

El primer ejemplo de integral primera es el propio hamiltoniano.

Proposición 3.6.2 (Ley de conservación de la energía). *H es una integral primera del sistema hamiltoniano (M, H) .*

Demostración. Basta hallar la derivada de H en la dirección de X^H y ver que es 0. En efecto, dado $x \in M$,

$$\frac{d}{dt}H(\varphi_t^H(x)) = d_{\varphi_t^H(x)}H(X_{\varphi_t^H(x)}^H) = \omega(X_{\varphi_t^H(x)}^H, X_{\varphi_t^H(x)}^H) = 0,$$

ya que $d_x H = \omega(\bullet, X_x^H)$ y ω es antisimétrica. \square

Veamos ahora como el corchete de Poisson, ecuación de Liouville mediante, juega un papel central en todo este asunto. En efecto, de la ecuación de Liouville obtenemos inmediatamente lo siguiente:

Proposición 3.6.3. *Una función $F : M \rightarrow \mathbb{R}$ es una integral primera de (M, H) si y sólo si $\{H, F\}$ (equivalentemente, $\{F, H\}$) es idénticamente nula.*

Además, si conocemos algunas integrales primeras, la identidad de Jacobi nos permite obtener otras nuevas:

Proposición 3.6.4 (Teorema de Poisson). *Si F_1, F_2 son integrales primeras de (M, H) , entonces $\{F_1, F_2\}$ es también una integral primera de (M, H) .*

Demostración. Por la identidad de Jacobi,

$$\{\{F_1, F_2\}, H\} = \{F_1, \{F_2, H\}\} + \{F_2, \{H, F_1\}\} = 0,$$

ya que F_1, F_2 son integrales primeras. \square

Veamos ahora el resultado principal de esta sección, que relaciona integrales primeras con simetrías.

Proposición 3.6.5 (Teorema de Noether). *Sea (M, H) un sistema hamiltoniano y $F : M \rightarrow \mathbb{R}$. Si H es constante a lo largo del flujo de X^F , entonces F es una integral primera de (M, H) .*

Demostración. Como H es constante a lo largo de X^F , es una integral primera de (M, F) , luego $\{H, F\} = \{F, H\} = 0$ y F es una integral primera de (M, H) . \square

Otra forma de ver este mismo teorema es la siguiente:

Proposición 3.6.6 (Otra forma del teorema de Noether). *Sea (M, ω) una variedad simpléctica conexa y sean X^F y X^G campos hamiltonianos en M . Los dos campos conmutan (y, por tanto, lo hacen los flujos que generan) si y sólo si $\{F, G\}$ es constante.*

Demostración. Si $\{F, G\} = a \in \mathbb{R}$, entonces

$$[X^F, X^G] = X^{\{F, G\}} = X^a = 0,$$

y recíprocamente

$$d\{F, G\} = \omega(\bullet, X^{\{F, G\}}) = \omega(\bullet, [X^F, X^G]).$$

\square

Para entender bien qué son las «simetrías» del sistema consideremos la siguiente definición:

Definición 3.6.7. Sea (M, H) un sistema hamiltoniano y G un grupo. Sea $\text{Diff}(M)$ el grupo de difeomorfismos de M . Una G -simetría del sistema (M, H) es una acción

$$\begin{aligned}\varphi : G &\longrightarrow \text{Diff}(M) \\ g &\longmapsto \varphi_g,\end{aligned}$$

tal que $H \circ \varphi_g = H$.

Ahora, consideremos el caso en que G sea un grupo de Lie y φ una G -simetría diferenciable de un sistema hamiltoniano (M, H) . Si g_t es un subgrupo uniparamétrico de G entonces g_t lleva asociado por la acción un flujo completo $\varphi_t = \varphi_{g_t}$. En el caso en que φ_t sea un flujo generado por un hamiltoniano $F : M \rightarrow \mathbb{R}$, entonces, por el teorema de Noether, F es una cantidad conservada del sistema (M, H) . La mejor forma de ilustrar estas ideas es con ejemplos:

Ejemplo 3.6.8 (Conservación del momento lineal). Consideremos un sistema hamiltoniano cuyo espacio de fases es el espacio simpléctico estándar $(\mathbb{R}^{2n}, \Omega_n)$. Decimos que el sistema es *invariante por traslaciones* si la acción

$$\begin{aligned}\mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^{2n} &\longrightarrow \mathbb{R}^{2n} \\ (y, (q, p)) &\longmapsto (q + y, p)\end{aligned}$$

del grupo $G = (\mathbb{R}^n, +)$ sobre \mathbb{R}^{2n} es una G -simetría del sistema. Fijo ahora $y \in \mathbb{R}^n$, si consideramos el flujo

$$\varphi_t(q, p) = (q + yt, p),$$

el hamiltoniano del sistema es invariante bajo este flujo. Busquemos ahora un posible hamiltoniano para φ_t . Para ello, hallemos su generador infinitesimal

$$X_y = \left. \frac{d}{dt} \right|_{t=0} \varphi_t(q, p) = (y, 0) = \sum_{i=1}^n y_i \frac{\partial}{\partial q_i}.$$

Ahora, si F es el hamiltoniano asociado (suponiendo que exista) tenemos que

$$dF = -i_{X_y} \Omega_n = \sum_{i=1}^n (dp_i \wedge dq_i) \left(\bullet, \sum_{i=1}^n y_i \frac{\partial}{\partial q_i} \right) = \sum_{i=1}^n y_i dp_i.$$

De modo que la cantidad conservada es $F = \sum_{i=1}^n y_i p_i = \langle y, p \rangle$. Como esto es cierto para cualquier $y \in \mathbb{R}^n$, en particular lo es para los vectores e_i de la base canónica, de modo que, para cada $i = 1, \dots, n$, p_i es una cantidad conservada y, en general, el *momento lineal* $p = (p_1, \dots, p_n)$ se conserva. De esta forma, hemos visto como la simetría bajo traslaciones lleva asociada la conservación del momento lineal.

Ejemplo 3.6.9 (Conservación del momento angular). De nuevo, consideremos un sistema hamiltoniano cuyo espacio de fases es el espacio simpléctico estándar, en este caso 6 dimensional $(\mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3, \Omega_3)$. Decimos que el sistema es *invariante por rotaciones* si la acción

$$\begin{aligned}\text{SO}(3) \times \mathbb{R}^6 &\longrightarrow \mathbb{R}^6 \\ (R, (q, p)) &\longmapsto (R(q), R(p))\end{aligned}$$

del grupo de rotaciones $G = \text{SO}(3)$ con la operación de composición, es una G -simetría del sistema. Consideremos ahora el grupo uniparamétrico de rotaciones en torno al eje OZ , que matricialmente se representa como

$$A(\phi) = \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Así, a este grupo uniparamétrico le podemos asociar el flujo

$$\varphi_\phi(q, p) = (A(\phi)q, A(\phi)p),$$

cuyo generador infinitesimal será, por la regla de la cadena

$$X = \left. \frac{d}{dt} \right|_{\phi=0} \varphi_\phi(q, p) = (\hat{A}q, \hat{A}p),$$

con

$$\hat{A} = \left. \frac{d}{dt} \right|_{\phi=0} A(\phi) = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

De modo que

$$X = -q_2 \frac{\partial}{\partial q_1} + q_1 \frac{\partial}{\partial q_2} - p_2 \frac{\partial}{\partial p_1} + p_1 \frac{\partial}{\partial p_2}.$$

Luego,

$$-i_X \Omega_3 = -q_2 dp_1 + q_1 dp_2 + p_2 dq_1 - p_1 dq_2.$$

Definimos ahora el *momento angular* como la función $L : \mathbb{R}^6 \rightarrow \mathbb{R}^3$ dada por el producto vectorial $L(q, p) = q \times p$, de modo que su componente k -ésima es $L_k(q, p) = \sum_{i,j=1}^3 \epsilon_{ijk} q_i p_j$, donde ϵ_{ijk} es la paridad de (i, j, k) como permutación de $(1, 2, 3)$. Ahora,

$$dL_3 = d(q_1 p_2 - q_2 p_1) = -q_2 dp_1 + q_1 dp_2 + p_2 dq_1 - p_1 dq_2 = -i_X \Omega_3.$$

De modo que, aplicando el teorema de Noether, la simetría del sistema bajo las rotaciones en torno al eje OZ lleva asociada una conservación de la tercera componente del momento angular L_3 . Podemos hacer un cálculo análogo para los casos de las rotaciones en torno a los ejes OX y OY , de forma que obtendríamos la conservación de las componentes L_1 y L_2 , o, de otra manera, como sabemos ya que el sistema es invariante bajo rotaciones, podemos tomar directamente el eje OZ como la dirección del momento angular. Finalmente, llegaríamos a que la simetría bajo rotaciones lleva asociada la conservación del momento angular.

Capítulo 4

Sistemas integrables

4.1. Teorema de Arnold-Liouville

A la hora de estudiar sistemas dinámicos, una cuestión interesante a plantearse, con consecuencias prácticas y también de carácter fundamental, es si las ecuaciones del sistema podrán ser «integradas», es decir, si podrán ser resueltas mediante integrales («cuadraturas») de funciones conocidas. Decimos entonces que una ecuación diferencial es *integrable por cuadraturas* si es posible escribir su solución general en términos de sumas, productos, composiciones e integrales de funciones conocidas.

En 1885, Joseph Liouville encontró una condición necesaria para que las ecuaciones de Hamilton de ciertos sistemas hamiltonianos fueran (localmente) integrables por cuadraturas. Décadas más tarde, con la introducción del formalismo geométrico y topológico al estudio de los sistemas dinámicos se descubrirían muchas más cosas interesantes sobre los sistemas que cumplían la condición que Liouville propuso. Destaca especialmente en todo este estudio la teoría de los toros invariantes desarrollada por Vladimir Arnold en 1963. Nace así la teoría de los *sistemas integrables*, cuyos resultados más básicos constituyen el *teorema de Arnold-Liouville*.

Definición 4.1.1. Sea (M, H) un sistema hamiltoniano con $\dim(M) = 2n$. Decimos que (M, H) es *integrable (en el sentido de Liouville)* si existen $F_1, \dots, F_n \in \mathcal{C}^\infty(M)$ que

1. son *funcionalmente independientes*, es decir, $dF_{1,x} \wedge \dots \wedge dF_{n,x} \neq 0$ para casi todo punto¹ $x \in M$,
2. están *en involución*, esto es, $\{F_i, F_j\} = 0$ para cada $i, j = 1, \dots, n$, y
3. los campos X^{F_i} son completos para cada $i = 1, \dots, n$.

En particular, si $F_1 = H$, todas las funciones F_1, \dots, F_n son integrales primeras del sistema.

Si escribimos $F : M \rightarrow \mathbb{R}^n$ con $F(x) = (F_1(x), \dots, F_n(x))$. Los puntos $x \in M$ en los que $\text{rango}(dF_x) = n$ se llaman *puntos regulares* del sistema. Los puntos que no son regulares se llaman *puntos críticos*. Si $x \in M$ es un punto crítico, $F(x)$ se llama *valor crítico*. Por tanto, llamamos *valores regulares* a los valores que no son críticos, es decir, a aquellos $a \in \mathbb{R}^n$ tales que si $a = F(x)$, entonces x es un punto regular. Si Σ es el conjunto de los puntos críticos, el conjunto de los valores críticos $F(\Sigma) \in \mathbb{R}^n$ se llama *diagrama de bifurcación* del sistema. Nótese que, por el teorema de Sard², el diagrama de bifurcación tiene medida nula.

Observación 4.1.2. De la definición y de la conservación de la energía directamente se deduce que todo sistema con un grado de libertad (y cuyo hamiltoniano sea regular en casi todo punto) es

¹Como aquí en principio no estamos considerando ninguna medida, con *para casi todo punto* queremos decir en un conjunto *residual* o *comagro*, esto es, que su complementario sea *magro*. Un conjunto se dice *magro* o *de primera categoría de Baire* si es unión numerable de conjuntos diseminados, esto es, de conjuntos cuya adherencia tiene interior vacío. Por ejemplo, el conjunto de los números racionales $\mathbb{Q} \subset \mathbb{R}$ no es diseminado pero sí es magro en \mathbb{R} .

²El teorema de Sard afirma que si Σ denota el conjunto de puntos críticos de una función $f \in \mathcal{C}^k(\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^m)$, con $k \geq \max\{n - m + 1, 1\}$ entonces su imagen $f(\Sigma)$ tiene medida nula.

integrable en el sentido de Liouville. Asimismo, un sistema con dos grados de libertad que tenga una cantidad conservada independiente de la energía también será integrable en el sentido de Liouville, ya que las cantidades conservadas dan 0 al evaluar el corchete de Poisson de cada una de ellas con el hamiltoniano.

Teorema 4.1.3 (Arnold-Liouville). *Sea (M, H) un sistema integrable en el sentido de Liouville con $F_1 (= H), \dots, F_n$ las integrales primeras en involución. Sea a un valor regular y el conjunto de nivel $F^{-1}(a)$. Sea $x \in F^{-1}(a)$ y M_a la componente conexa de $F^{-1}(a)$ que contiene a x . Entonces:*

1. M_a es una variedad diferenciable invariante bajo el flujo del sistema y $\omega|_{M_a} = 0$.
2. M_a es difeomorfa a $\mathbb{T}^k \times \mathbb{R}^{n-k}$ para cierto $0 \leq k \leq n$. En particular, si M_a es compacta, M_a es difeomorfa al toro n -dimensional \mathbb{T}^n . En este caso, se dice que M_a es un toro de Liouville.
3. Podemos tomar unas coordenadas $w = (w_1, \dots, w_n)$ en M_a de manera que existen unas velocidades constantes $v(a) = (v_1(a), \dots, v_n(a))$ tales que $\dot{w}(t) = v(a)$.

Demostración. En primer lugar, como F tiene rango máximo en cada punto de M_a , por el teorema de la función implícita M_a es una subvariedad regular de M de dimensión $2n - n = n$. Como M es una variedad simpléctica, para cada $i = 1, \dots, n$, podemos definir el campo $X_i = X^{F_i}$. Al ser las dF_i linealmente independientes los campos X_i son linealmente independientes. Además, por 3.4.2, como para cada $i, j = 1, \dots, n$ $\{F_i, F_j\} = 0$, tenemos que $[X_i, X_j] = 0$ y que $\omega(X_i, X_j) = 0$. Por esto mismo, la derivada de la función F_i en la dirección de X_j es 0, luego los campos X_j son tangentes a M_a .

De aquí sacamos varias conclusiones:

1. M_a es invariante con respecto a cada uno de los n flujos hamiltonianos generados por cada función F_i (luego, en particular lo será respecto del generado por F_1).
2. Como, para cada $x \in M_a$, los vectores $X_1|_x, \dots, X_n|_x$ forman una base de $T_x M_a$, ω se anula en $T_x M_a$.
3. M_a es una variedad diferenciable de dimensión n con n campos conmutativos dos a dos y linealmente independientes en todo punto de M_a .

Esto prueba la parte 1 del teorema. Para continuar, necesitamos probar un lema previo.

Lema 4.1.4. *Sea N una variedad diferenciable de dimensión n conexa tal que existen campos X_1, \dots, X_n en N completos y linealmente independientes y tales que, para $i \neq j$, $[X_i, X_j] = 0$. Entonces N es difeomorfa a $\mathbb{T}^k \times \mathbb{R}^{n-k}$.*

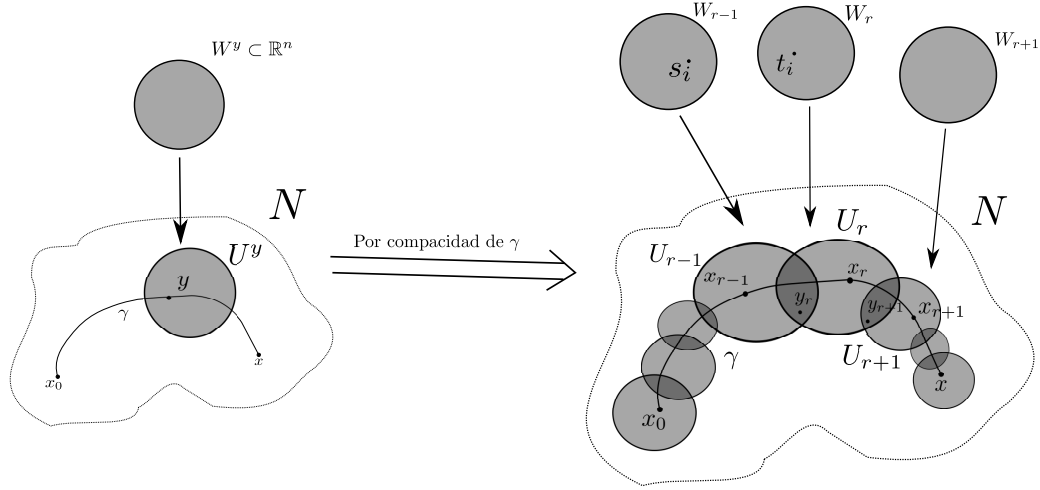
Demostración. Para cada $i = 1, \dots, n$, sea g_i el flujo completo generado por X_i . Como para todo $i \neq j$, $[X_i, X_j] = 0$, entonces g_i conmuta con g_j , es decir, $g_{i,t}g_{j,s}(x) = g_{j,s}g_{i,t}(x)$, para todo $x \in N$.

Así, podemos definir una acción de \mathbb{R}^n en N que a cada $t = (t_1, \dots, t_n) \in \mathbb{R}^n$ le asigna $g_t : N \rightarrow N$, con $g_t = g_{1,t_1} \cdots g_{n,t_n}$. Por conmutar los flujos, $g_{t+s} = g_t g_s$. Ahora, fijo $x_0 \in N$, definimos

$$\begin{aligned} g : \mathbb{R}^n &\longrightarrow N \\ t &\longmapsto g_t(x_0). \end{aligned}$$

Como los campos son linealmente independientes, $d_t g$ es un isomorfismo lineal para todo t y, por el teorema de la función inversa, g es un difeomorfismo local. Ahora, dado $x \in N$, tomamos una curva γ en N que una x y x_0 . Por ser g un difeomorfismo local, para todo $y \in \gamma$ existe un entorno U de y tal que $g_t(y)$ da un difeomorfismo entre U y un entorno $W \in \mathbb{R}^n$ centrado en 0. Por ser γ compacta, podemos tomar entonces una sucesión finita de entornos U_0, \dots, U_r que recubran γ tales que $x_0 \in U_0$ y $x \in U_r$ y tales que existan unos puntos x_1, \dots, x_r pertenecientes a U_1, \dots, U_r , respectivamente, con $x_r = x$, de forma que $g_t(x_i)$ dé un difeomorfismo entre un entorno $W_i \subset \mathbb{R}^n$ centrado en 0 y U_i . Tomemos ahora unos puntos y_1, \dots, y_r pertenecientes a $U_0 \cap U_1, \dots, U_{r-1} \cap U_r$, respectivamente. Entonces, para cada $i = 1, \dots, r$, $y_i = g_{s_i}(x_{i-1}) = g_{t_i}(x_i)$, para ciertos $s_i, t_i \in \mathbb{R}^n$, luego $x_i = g_{s_i - t_i}(x_{i-1})$. Por tanto,

$$x = x_r = g_{s_r - t_r}(x_{r-1}) = g_{s_r - t_r + s_{r-1} - t_{r-1} + \dots + s_1 - t_1}(x_0).$$

Figura 4.1: Idea de la demostración de que g es sobreyectiva.

De modo que g es sobreyectiva.

Tenemos entonces que $g : \mathbb{R}^n \rightarrow N$ es un difeomorfismo local sobreyectivo, luego es una identificación diferenciable. Denotamos

$$\Gamma := \{t \in \mathbb{R}^n \mid g_t(x_0) = x_0\},$$

que es un subgrupo de $(\mathbb{R}^n, +)$ ya que, dados $t, s \in \Gamma$,

$$g_{s+t}(x_0) = g_s g_t(x_0) = g_s(x_0) = x_0$$

y

$$g_{-t}(x_0) = g_{-t} g_t(x_0) = x_0.$$

Además, Γ no depende de la elección de x_0 , en efecto, si $x = g_s(x_0)$ y $t \in \Gamma$, entonces

$$g_t(x) = g_{t+s}(x_0) = g_s g_t(x_0) = g_s(x_0) = x.$$

Ahora, por la propiedad universal del cociente, si $\pi : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n/\Gamma$ denota la proyección natural, el siguiente diagrama

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{R}^n & \xrightarrow{g} & N \\ \downarrow \pi & \nearrow \tilde{g} & \\ \mathbb{R}^n/\Gamma & & \end{array}$$

da un difeomorfismo $\tilde{g} : \mathbb{R}^n/\Gamma \rightarrow N$. Si $\Gamma = \{0\}$, entonces $g : \mathbb{R}^n \rightarrow N$ es un difeomorfismo y habríamos terminado. Supongamos que $\Gamma \neq \{0\}$.

Como g es un difeomorfismo local, existe un entorno $V \subset \mathbb{R}^n$ de 0 tal que $\Gamma \cap V = \{0\}$. Es más, si $t \in \Gamma$, $s \in V \setminus \{0\}$ y $x \in N$,

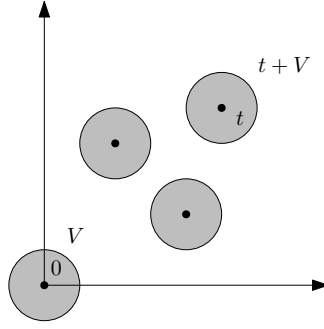
$$g_{t+s}(x) = g_s g_t(x) = g_s(x) \neq x.$$

Luego Γ es un conjunto discreto. Nótese también que Γ es cerrado en \mathbb{R}^n .

Antes de continuar, es necesario probar el siguiente lema:

Lema 4.1.5. *Todo subgrupo no trivial, cerrado y discreto Γ de \mathbb{R}^n es isomorfo a \mathbb{Z}^k para algún $k \in \{1, \dots, n\}$. Es decir, existen $e_1, \dots, e_k \in \Gamma$ linealmente independientes tales que*

$$\Gamma = \{n_1 e_1 + \dots + n_k e_k \mid (n_1, \dots, n_k) \in \mathbb{Z}^k\}.$$

Figura 4.2: Idea de que Γ es discreto.

Demostración. Sea $e_0 \in \Gamma$, $e_0 \neq 0$. Como Γ es discreto, $\Gamma \cap D(0, \|e_0\|)$ (donde $D(a, r)$ denota el disco cerrado de centro a y radio r) es finito. De estos puntos consideramos aquellos que están en $L(e_0)$ ³ y de estos escogemos el más cercano, que llamaremos e_1 .

Si existieran algún $e \in \Gamma$ y algún $m \in \mathbb{Z}$ tal que $e \in (me_1, (m+1)e_1)$, entonces $e - me_1 \in \Gamma \cap L(e_0)$ estaría más cerca de 0 que e_1 . Por tanto,

$$\Gamma \cap L(e_0) = e_1\mathbb{Z}.$$

Si no hay puntos de Γ fuera de $L(e_1)$ hemos terminado, Γ es isomorfo a \mathbb{Z} . En caso contrario, dado $e \in \Gamma \setminus L(e_1)$, proyectamos ortogonalmente e sobre $L(e_1)$. Esta proyección cae exactamente sobre un intervalo $\Delta = [me_1, (m+1)e_1]$ para cierto $m \in \mathbb{Z}$. Sea C el cilindro cerrado de eje Δ y de radio igual a la distancia entre Δ y e . $C \cap \Gamma$ es finito, y de sus puntos, sea e_2 el más cercano a Δ que no esté en Δ . Entonces, para cualquier otro $f \in \Gamma$, la distancia entre f y $L(e_1)$ es mayor que la distancia entre e_2 y $L(e_1)$.

En efecto, si existe $l \in \mathbb{Z}$ tal que la proyección ortogonal de f cae sobre $[le_1, (l+1)e_1]$, entonces $f' = f - le_1 + me_1 \in C$ y la distancia entre f' y $L(e_1)$ es menor que la distancia entre e_2 y $L(e_1)$, lo que nos lleva a una contradicción.

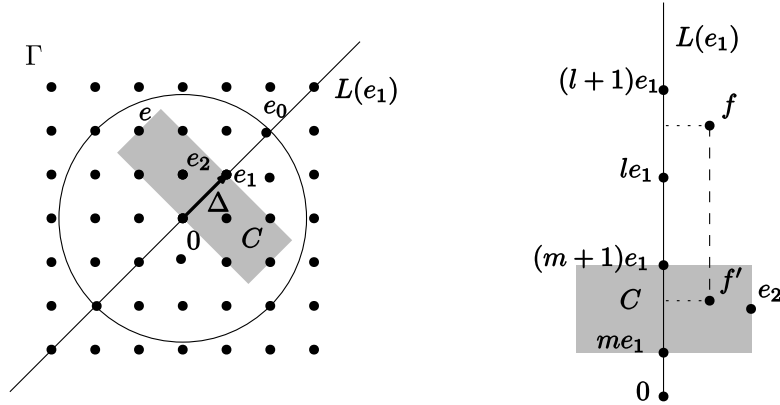


Figura 4.3: Idea de la demostración del lema.

Ahora, $\{n_1e_1 + n_2e_2 \mid (n_1, n_2) \in \mathbb{Z}^2\}$ forma una red discreta en $L(e_1, e_2)$. Además, si existiera un $e \in L(e_1, e_2) \cap \Gamma$ que no perteneciese a la red, podríamos tomar $m_1 = [\langle e, e_1 \rangle]$, $m_2 = [\langle e, e_2 \rangle]$ (donde $[\cdot]$ denota la parte entera). Entonces, $e - m_1e_1 - m_2e_2$ estaría más cerca de $L(e_1)$ que e_2 . Por tanto, esta red es exactamente $L(e_1, e_2) \cap \Gamma$.

Procedemos ahora por inducción, supongamos que existen e_1, \dots, e_k linealmente independientes tales que $\{n_1e_1 + \dots + n_ke_k \mid (n_1, \dots, n_k) \in \mathbb{Z}^k\} = L(e_1, \dots, e_k) \cap \Gamma$ y que existe $e \in \Gamma$ tal que $e \notin L(e_1, \dots, e_k)$. Análogamente, la proyección ortogonal de e sobre $L(e_1, \dots, e_k)$ cae sobre un hipercubo

³Aquí $L(x)$ denota la envoltura lineal de x .

$\Delta = [m_1 e_1, (m_1 + 1)e_1) \times \cdots \times [m_k e_k, (m_k + 1)e_k)$. Si C denota el conjunto de los puntos cuyas proyecciones ortogonales caen en Δ y son más o igualmente cercanos a Δ que e , entonces $C \cap \Gamma$ es finito. Sea e_{k+1} el más cercano a Δ de estos puntos, que no esté en Δ . Para cualquier otro $f \in \Gamma$, la distancia entre f y $L(e_1, \dots, e_k)$ es mayor que entre e_2 y $L(e_1, \dots, e_k)$, por un razonamiento completamente análogo al caso bidimensional.

Por tanto, $\{n_1 e_1 + \cdots + n_{k+1} e_{k+1} \mid (n_1, \dots, n_{k+1}) \in \mathbb{Z}^{k+1}\}$ forma una red discreta en $L(e_1, \dots, e_{k+1})$ y, de forma análoga al caso anterior, esta red agota los puntos de $\Gamma \cap L(e_1, \dots, e_{k+1})$. Finalmente, sea k el mínimo número natural tal que no existe $e \in \Gamma \setminus L(e_1, \dots, e_k)$. Evidentemente, sabemos que este k existe porque \mathbb{R}^n es un espacio vectorial de dimensión finita. Entonces Γ es isomorfo a \mathbb{Z}^k . \square

Terminamos ahora la demostración del Lema 4.1.4.

Sea k el número de generadores de Γ y sea la proyección natural

$$\begin{aligned} \varpi : \mathbb{R}^n = \mathbb{R}^k \times \mathbb{R}^{n-k} &\longrightarrow \mathbb{T}^k \times \mathbb{R}^{n-k} \\ (x, y) &\longmapsto (\exp(x), y), \end{aligned}$$

donde la función

$$\begin{aligned} \exp : \mathbb{R}^k &\longrightarrow \mathbb{T}^k \cong \mathbb{S}^1 \times \cdots \times \mathbb{S}^1 \\ (x_1, \dots, x_k) &\longmapsto (e^{2\pi i x_1}, \dots, e^{2\pi i x_k}), \end{aligned}$$

denota el recubridor universal de \mathbb{T}^k . El núcleo de este homomorfismo de grupos ϖ es precisamente el subgrupo $\mathbb{Z}^k \subset \mathbb{R}^n$ generado por los k primeros vectores de la base canónica. Sean e_1, \dots, e_k los generadores de Γ y sea $\zeta : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ un isomorfismo lineal que mande el i -ésimo vector de la base canónica a e_i . Entonces, la aplicación $\tilde{\zeta}$ que hace el siguiente diagrama conmutativo es un difeomorfismo,

$$\begin{array}{ccccc} \mathbb{R}^n & \xrightarrow{\zeta} & \mathbb{R}^n & & \\ \downarrow \varpi & & \downarrow \pi & \searrow \mathcal{G} & \\ \mathbb{T}^k \times \mathbb{R}^{n-k} & \xrightarrow{\tilde{\zeta}} & \mathbb{R}^n / \Gamma & \xrightarrow{\tilde{g}} & N, \end{array}$$

y compuesto con \tilde{g} da el difeomorfismo buscado. \square

Volvemos ahora a la demostración del teorema de Arnold-Liouville. Aplicamos directamente el lema 4.1.4 con $N = M_a$ (considerando los campos $X_i = X^{F_i}$ ya definidos y construyendo g como en la demostración del lema) y tenemos que M_a es difeomorfa a $\mathbb{T}^k \times \mathbb{R}^{n-k}$ para cierto $k = 0, \dots, n$. En particular, si M_a es compacta, entonces $k = n$ y $M_a \cong \mathbb{T}^n$. Hemos probado entonces la parte 2 del teorema. Además, el difeomorfismo $\tilde{\zeta} : \mathbb{T}^k \times \mathbb{R}^{n-k} \rightarrow M_a$ está bien descrito por el diagrama anterior.

Podemos considerar entonces la parametrización $\psi : \mathbb{R}^n \rightarrow M_a$ dada por el diagrama

$$\begin{array}{ccccc} & & & \psi & \\ & & & \curvearrowright & \\ \mathbb{R}^n & \xrightarrow{\zeta} & \mathbb{R}^n & & \\ \downarrow \varpi & & \downarrow \pi & \searrow \mathcal{G} & \\ \mathbb{T}^k \times \mathbb{R}^{n-k} & \xrightarrow{\tilde{\zeta}} & \mathbb{R}^n / \Gamma & \xrightarrow{\tilde{g}} & M_a, \end{array}$$

Sea el vector $v(a) \in \mathbb{R}^n$ tal que $\zeta(v(a)) = (1, 0, \dots, 0)$. Tomemos ahora un flujo rectilíneo

$$\begin{aligned}\mathbb{R} &\longrightarrow \mathbb{R}^n \\ t &\longmapsto v(a)t,\end{aligned}$$

y veamos su comportamiento en el diagrama

$$\begin{array}{ccccc} t \in \mathbb{R} & \longrightarrow & v(a)t \in \mathbb{R}^n & \xrightarrow{\zeta} & (t, 0, \dots, 0) \in \mathbb{R}^n \\ & & \searrow \psi & & \downarrow g \\ & & & & g_{1,t}(x) = \varphi_t^H(x) \in M_a. \end{array}$$

Tenemos entonces que $\varphi_t^H(x) = \psi(v(a)t)$, de modo que podemos tomar una carta (U, w) con $U \subset M_a$ abierto relativo tal que el siguiente diagrama conmute

$$\begin{array}{ccc} & & \mathbb{R}^n \\ & \nearrow w & \downarrow \psi \\ \mathbb{R} & \xrightarrow{\varphi_t^H(x)} & U \hookrightarrow M_a. \end{array}$$

Por tanto, $w(t) = w(\varphi_t^H(x)) = v(a)t$, luego $\dot{w}(t) = v(a)$. Nótese que al ser arbitraria la elección del punto x en el toro de Liouville M_a , la elección de las variables angulares en el toro es ambigua por una constante. Es decir, podemos elegir el valor $w_{0,a} = w(0)$. Como el flujo hamiltoniano deja M_a invariante, queda descrito por las ecuaciones

$$\begin{cases} F(t) = a \\ w(t) = w_{0,a} + v(a)t. \end{cases}$$

Esto prueba la parte 3 y por tanto concluye la demostración del teorema. \square

Observación 4.1.6. Para finalizar la sección vamos a hacer un pequeño comentario sobre la completitud de los campos. Recordemos de la definición 4.1.1 que una de las cosas que exigíamos a un sistema para que fuera integrable en el sentido de Liouville es que los campos X^{F_i} fueran completos. Sin embargo, en la demostración del teorema de Arnold-Liouville hemos usado algo ligeramente más débil: sólo necesitamos que los campos sean completos en el conjunto de nivel M_a . En particular, si nos encontramos ante un toro de Liouville, es decir, si M_a es compacta, entonces todos los campos son completos en M_a .

Una garantía segura de la completitud de los campos es que M fuera compacta. Sin embargo en la mayoría de los casos con sentido físico esto no se cumple, pues M suele ser un fibrado tangente, que claramente no es compacto. Por otra parte, el resultado expuesto en [10] asegura que un campo hamiltoniano X^G es completo en toda la variedad si G es propia, esto es, si la imagen inversa de un compacto por G es un conjunto compacto y si G está acotada inferiormente. De nuevo, esto no aporta gran cosa, pues si las F_i son propias, entonces $F^{-1}(a)$ es compacto y otra vez estaríamos exigiendo que todos los conjuntos de nivel fueran toros de Liouville, aunque esta vez al menos no requerimos que M sea compacta.

4.2. Variables de acción-ángulo

Vamos a ver el resultado que, junto con el teorema de Arnold-Liouville (y de hecho, en gran parte de la literatura incluido dentro de éste) constituye el núcleo de la teoría de sistemas integrables. En el caso en que M_a sea compacta y, por tanto, un toro de Liouville, vamos a ver que es posible encontrar

un entorno de este toro y unas coordenadas (variables de acción-ángulo) en este entorno que nos permitan integrar el sistema por cuadraturas.

Las variables de acción-ángulo fueron introducidas originalmente por Delaunay en 1860 para estudiar el movimiento de la Luna y más tarde, a principios del siglo XX, usadas por los físicos para estudiar el átomo de Bohr. Sería Schwarzschild quien acuñara esa terminología en 1916. La demostración del teorema de las variables de acción-ángulo se atribuye a Mineur en 1936.

Teorema 4.2.1 (Variables de acción-ángulo). *Seguimos en las hipótesis del teorema 4.1.3. En el caso en que M_a sea compacta, existe un entorno $U \subset M$ de M_a difeomorfo a $\mathbb{R}^n \times \mathbb{T}^n$ (un entorno tubular⁴) y un sistema de coordenadas de Darboux (ϕ, F) (llamadas variables de acción-ángulo) en U tales que las ϕ_i son coordenadas angulares en U y las F_i son constantes en cada toro de U .*

Observación 4.2.2. La consecuencia inmediata de este teorema es que en los entornos tubulares las ecuaciones de Hamilton quedan resueltas por cuadraturas. En efecto, al ser (ϕ, F) coordenadas de Darboux, podemos escribir las ecuaciones de Hamilton en la forma

$$\begin{cases} \dot{F}_i = \frac{\partial H}{\partial \phi_i}, \\ \dot{\phi}_i = -\frac{\partial H}{\partial F_i}. \end{cases}$$

Ahora, como las F_i son constantes en los toros, se tiene $\dot{F}_i = 0$, de modo que $\frac{\partial H}{\partial \phi_i}$ es constante en cada toro, luego el hamiltoniano no depende de las coordenadas ϕ . Por tanto, las frecuencias $\nu_i = \dot{\phi}_i = -\frac{\partial H}{\partial F_i}$ son constantes en cada toro. Así, las ecuaciones quedan integradas en la forma

$$\begin{cases} F_i(t) = F_i(0), \\ \phi_i(t) = \phi_i(0) + \nu_i t. \end{cases}$$

Demostración. En primer lugar, hay que obtener el entorno tubular U . Como M_a es un conjunto compacto de puntos regulares existe un entorno W de M_a con todos sus puntos regulares de manera que $M_a \subset W \subset \bar{W}$ y tal que $F|_W$ sea abierta. Por tanto, $V = F(W) \subset \mathbb{R}^n$ es un entorno abierto de a . Ahora, para cada $b \in V$, existe al menos una componente conexa M_b de $F^{-1}(b)$ que interseca a W en algún punto. Si M_b está contenida en W entonces es compacta y por tanto es un toro de Liouville. En caso contrario, existe un punto $x_b \in M_b \cap (\bar{W} \setminus W)$.

Supongamos entonces que existe una sucesión (b_k) de valores en V tal que $b_k \rightarrow a$ con $M_{b_k} \cap (\bar{W} \setminus W) \neq \emptyset$. Entonces existe una sucesión convergente (x_{b_k}) con cada $x_{b_k} \in M_{b_k} \cap \bar{W} \setminus W$. Ahora, si llamamos $x_0 = \lim_k x_{b_k}$ entonces $x_0 \in \bar{W} \setminus W$ y por continuidad $F(x_0) = \lim_k F(x_{b_k}) = \lim_k b_k = a$, de modo que $x_0 \in M_a \subset W$ y llegamos a una contradicción. Por tanto existe una bola $B \subset \mathbb{R}^n$ centrada en a tal que el toro de Liouville $M_b \subset W \subset \bar{W}$ para cada $b \in B$.

Podemos considerar entonces el abierto

$$U = F^{-1}(B) = \bigcup_{b \in B} M_b,$$

que es una unión disjunta de toros de Liouville. Ahora, análogamente a la demostración del teorema de Arnold-Liouville, para cada $b \in B$, fijamos $x \in M_b$ y consideramos la aplicación

$$\begin{aligned} \varphi^F : \mathbb{R}^n &\longrightarrow M_b \\ (\theta_1, \dots, \theta_n) &\longmapsto \varphi_{\theta_1}^{F_1} \cdots \varphi_{\theta_n}^{F_n}(x), \end{aligned}$$

que está bien definida por conmutar los flujos, y el difeomorfismo $\theta_b : M_b \rightarrow \mathbb{T}^n$ inducido por el diagrama

⁴Nótese que aquí estamos suponiendo que M_a no está en el borde de M , en cuyo caso procederíamos análogamente para obtener un entorno difeomorfo a $\mathbb{H}^n \times \mathbb{T}^n$.

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{R}^n & \xrightarrow{\varphi^F} & M_b \\ \downarrow & \swarrow \theta_b & \\ \mathbb{T}^n & & \end{array}$$

Tenemos entonces que la aplicación

$$\begin{aligned} \Phi : U &\longrightarrow B \times \mathbb{T}^n \\ x &\longmapsto (F(x), \theta_{F(x)}(x)), \end{aligned}$$

es un difeomorfismo. De modo que, como B es una bola, el entorno U es un entorno tubular.

Procedamos ahora a hallar las variables de acción-ángulo. Sea $\pi : U \cong B \times \mathbb{T}^n \rightarrow B$ la proyección canónica. Entonces $\pi^{-1}(x)$ es un toro invariante para cada $x \in B$. En cada uno de estos toros, consideramos $X_i = X^{F_i}$ y (F, θ) las coordenadas antes obtenidas. Si tomamos un punto $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_n) \in \mathbb{R}^n$ entonces, para cada $x \in M$, podemos usar la conmutatividad de los flujos para escribir

$$\left. \frac{\partial}{\partial \theta_i} \right|_{\varphi_\theta^F(x)} = \frac{\partial}{\partial \theta_i} \varphi_{\theta_i}^{F_i}(y),$$

con $y = \varphi_{\theta_1}^{F_1} \cdots \varphi_{\theta_{i-1}}^{F_{i-1}} \varphi_{\theta_{i+1}}^{F_{i+1}} \cdots \varphi_{\theta_n}^{F_n}(x)$. Ahora, como φ^{F_i} es el flujo de X_i ,

$$\left. \frac{\partial}{\partial \theta_i} \right|_{\varphi_\theta^F(x)} = \frac{\partial}{\partial \theta_i} \varphi_{\theta_i}^{F_i}(y) = X_{i, \varphi_{\theta_i}^{F_i}(y)} = X_{i, \varphi_\theta^F(x)}.$$

De modo que $\frac{\partial}{\partial \theta_i} = X_i$.

Como ω se anula en el toro, no tiene términos en $d\theta_i \wedge d\theta_j$ y los términos en $dF_i \wedge d\theta_j$ serán

$$\omega \left(\frac{\partial}{\partial F_i}, \frac{\partial}{\partial \theta_j} \right) = \omega \left(\frac{\partial}{\partial F_j}, X_i \right) = dF_i \left(\frac{\partial}{\partial F_j} \right) = \delta_{ij}.$$

Por tanto, ω es de la forma

$$\omega = \sum_i^n dF_i \wedge d\theta_i + \sum_{k,l=1}^n a_{kl} dF_k \wedge dF_l,$$

con a_{kl} unas ciertas funciones. Además, como ω es cerrada, al diferenciar, cada término correspondiente a $d\theta_j \wedge dF_k \wedge dF_l$ debe anularse. Este término es exactamente $\frac{\partial a_{kl}}{\partial \theta_j}$, de modo que las a_{kl} son constantes en cada toro invariante.

Si ahora definimos $\alpha = \sum_{i,j=1}^n a_{ij} dF_i \wedge dF_j$,

$$\omega = \sum_{i=1}^n dF_i \wedge d\theta_i + \alpha.$$

Como las a_{ij} son constantes en cada toro invariante podemos ver α como una forma en \mathbb{R}^n , es decir, existe una 2-forma β en \mathbb{R}^n tal que $\alpha = \pi^* \beta$. De aquí tenemos

$$0 = d\omega = \sum_{i=1}^n d(dF_i \wedge d\theta_i) + d\alpha = d\alpha = \pi^* d\beta,$$

de donde concluimos que $d\beta = 0$. Por el lema de Poincaré, existe γ en \mathbb{R}^n tal que $\beta = d\gamma$. Ahora, si escribimos $\gamma = \sum_{i=1}^n f_i dF_i$, para algunas funciones $f_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, entonces podemos tomar unas nuevas coordenadas

$$\phi_i = \theta_i + f_i \circ \pi.$$

Nótese que para cada $b \in B$ y para cada $x \in M_b$ el valor de $f_i \circ \pi(x) = f_i(b)$ sólo depende de b , de modo que las nuevas variables difieren de las anteriores en un valor constante en cada toro de Liouville luego siguen siendo coordenadas angulares en cada M_b . En estas nuevas coordenadas

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n dF_i \wedge d\phi_i &= \sum_{i=1}^n dF_i \wedge d\theta_i + \sum_{i=1}^n dF_i \wedge d(f_i \circ \pi) \\ &= \sum_{i=1}^n dF_i \wedge d\theta_i + \pi^* d\gamma = \sum_{i=1}^n dF_i \wedge d\theta_i + \alpha = \omega. \end{aligned}$$

Por tanto, hemos encontrado unas coordenadas de Darboux (ϕ, F) , con las F_i constantes en cada toro invariante y con las ϕ_i coordenadas angulares en estos toros. \square

Observación 4.2.3. En la práctica, las variables de acción-ángulo no suelen obtenerse como en la demostración del teorema. Normalmente se suele trabajar en el fibrado tangente $M = TN$ de cierta variedad riemanniana N de dimensión n en la que se define un sistema lagrangiano natural, igual que hicimos en la sección 1. En este caso, si (ϕ, J) son unas variables de acción-ángulo en M , se puede escribir

$$\omega = \sum_{i=1}^n dJ_i \wedge d\phi_i = d\alpha,$$

con $\alpha = \sum_{i=1}^n J_i d\phi_i$. Si ahora tomamos los ciclos γ_i en los que están definidas las variables ϕ_i , entonces, como las J no dependen de las ϕ

$$\int_{\gamma_i} \alpha = \sum_{j=1}^n J_j \int_{\gamma_i} d\phi_j = \sum_{j=1}^n J_j 2\pi \delta_{ij} = 2\pi J_i.$$

Además, por la independencia de las ϕ , cada uno de los caminos γ_i ha de corresponder a un generador distinto del grupo fundamental del toro de Liouville que estemos tratando. Así, el procedimiento a seguir para construir variables de acción-ángulo es el siguiente:

1. Se toman unas coordenadas de Darboux (q, p) en las que ya se conozca la forma del sistema.
2. Se hallan los toros de Liouville y se escogen unos ciclos $\gamma_1, \dots, \gamma_n$ que generen el grupo fundamental del toro de Liouville M_a en el que queramos trabajar.
3. Se obtienen las variables de acción siguiendo la fórmula

$$J_i(a) = \int_{\gamma_i} \sum_{i=1}^n p_i dq_i.$$

4. Se escribe el hamiltoniano en función de las variables de acción $H = H(J(a))$ y se obtienen las frecuencias

$$\nu_i(a) = \dot{\phi}_i(t) = \frac{\partial H}{\partial J}(J(a)).$$

En los ejemplos que veremos a continuación estudiaremos algún caso donde podemos realizar el cálculo explícito de las variables de acción-ángulo y la integración del sistema por cuadraturas.

4.3. Osciladores armónicos

Para aclarar algunas de las ideas detrás de la teoría de sistemas integrables, vamos a considerar uno de los ejemplos más sencillos pero más ilustrativos, el oscilador armónico.

Oscilador armónico con un grado de libertad

Empezamos considerando el oscilador armónico con un grado de libertad. El espacio de fases del sistema será el espacio simpléctico estándar 2-dimensional, (\mathbb{R}^2, Ω_1) con las coordenadas de Darboux canónicas (q, p) . El hamiltoniano vendrá dado por la función

$$H(q, p) = \frac{1}{2}p^2 + \frac{1}{2}\omega^2 q^2,$$

con ω una constante que representa la frecuencia de oscilación. Las ecuaciones de Hamilton son entonces

$$\begin{cases} \dot{q}(t) = \frac{\partial H}{\partial p}(t) = p(t) \\ \dot{p}(t) = -\frac{\partial H}{\partial q}(t) = -\omega^2 q(t). \end{cases}$$

Estas ecuaciones se pueden integrar fácilmente, si tomamos como condición inicial $(q(0), p(0)) = (a, 0)$, tenemos

$$\begin{cases} q(t) = a \cos \omega t \\ p(t) = -\omega a \sin \omega t. \end{cases}$$

Ahora, recordemos que el hamiltoniano del sistema es una cantidad conservada, por tanto podemos considerar las variedades M_E de energía constante, que, por el teorema de Arnold-Liouville serán topológicamente circunferencias invariantes bajo el flujo del sistema, ya que el único punto crítico del hamiltoniano es su mínimo $(q, p) = (0, 0)$. En efecto, las curvas de energía constante vienen dadas por la ecuación

$$E = \frac{1}{2}p^2 + \frac{1}{2}\omega^2 q^2,$$

que define una elipse de semiejes $\sqrt{2E}$ y $\frac{\sqrt{2E}}{\omega}$. El flujo en las curvas de energía constante toma la forma

$$\begin{cases} q(t) = \frac{\sqrt{2E}}{\omega} \cos \omega t \\ p(t) = -\sqrt{2E} \sin \omega t. \end{cases}$$

Ahora, si tomamos unas coordenadas «polares» (E, ϕ) , donde ϕ es la coordenada angular en cada una de estas elipses, la dinámica del sistema queda mucho más simplificada:

$$\begin{cases} E(t) = E(0) \\ \phi(t) = \phi(0) - \omega t. \end{cases}$$

Sin embargo, ¿será canónica la transformación $(q, p) \rightarrow (E, \phi)$? Para ello, veamos cómo se comporta la forma $\Omega_1 = dp \wedge dq$ con el cambio

$$\begin{cases} q(E, \phi) = \frac{\sqrt{2E}}{\omega} \cos \phi \\ p(E, \phi) = \sqrt{2E} \sin \phi. \end{cases}$$

Tenemos entonces

$$\begin{cases} dq = \frac{1}{\omega\sqrt{2E}} \cos \phi dE - \frac{\sqrt{2E}}{\omega} \sin \phi d\phi \\ dp = \sqrt{\frac{1}{2E}} \sin \phi dE + \sqrt{2E} \cos \phi d\phi, \end{cases}$$

y

$$\Omega_1 = dp \wedge dq = -\frac{1}{\omega} dE \wedge d\phi.$$

Por tanto, si definimos la *variable de acción*, $J = -\frac{E}{\omega}$, entonces $\Omega_1 = dJ \wedge d\phi$ y (ϕ, J) son unas coordenadas de Darboux.

Para tratar de dar sentido físico a esta variable J , consideremos el área A_E de la región S_E encerrada por la curva de energía constante M_E . Por la fórmula del área de la elipse

$$A_E = \pi \sqrt{2mE} \sqrt{\frac{2E}{k}} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} E = 2\pi \frac{E}{\omega} = -2\pi J.$$

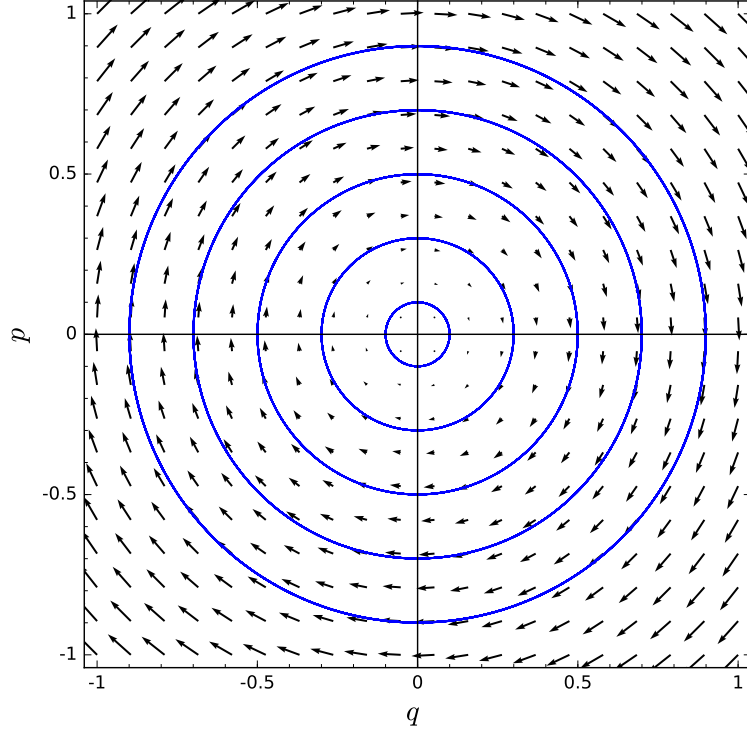


Figura 4.4: Espacio de fases del oscilador armónico junto al campo y a las curvas de energía constante. En este caso $k = m = 1$, de modo que las curvas de energía constante son circunferencias de radio $\sqrt{2E}$.

Observemos ahora que como Ω_1 es la forma de área en \mathbb{R}^2 ,

$$A_E = \int_{S_E} \Omega_1 = \int_{S_E} dp \wedge dq = \int_{M_E} pdq,$$

donde hemos usado el teorema de Stokes y el hecho de que $dp \wedge dq = d(pdq)$. De modo que podemos redefinir la variable de acción en la forma

$$J = -\frac{1}{2\pi} \int_{M_E} pdq.$$

Este será el aspecto que tengan las variables de acción-ángulo en general para sistemas con un grado de libertad. Regresando ahora a las coordenadas originales, tenemos

$$\begin{cases} q(\phi, J) = \sqrt{-\frac{2J}{\omega}} \cos \phi \\ p(\phi, J) = \sqrt{-2\omega J} \sin \phi. \end{cases}$$

Oscilador armónico con n grados de libertad

Para estudiar un caso de dimensión superior, podemos considerar el sistema formado por n osciladores armónicos acoplados o, equivalentemente, un oscilador armónico con n grados de libertad. El hamiltoniano del sistema será

$$H(q_1, \dots, q_n, p_1, \dots, p_n) = H_1(q_1, p_1) + \dots + H_n(q_n, p_n) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (p_i^2 + \omega_i^2 q_i^2).$$

Este sistema es integrable en el sentido de Liouville. Basta tomar $F = (H_1, H_2, \dots, H_n)$, ya que

$$\{H_i, H_j\} = \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial H_i}{\partial p_k} \frac{\partial H_j}{\partial q_k} - \frac{\partial H_j}{\partial p_k} \frac{\partial H_i}{\partial q_k} \right) = 0$$

y las componentes de F son independientes en casi todo punto de \mathbb{R}^{2n} .

Ahora, dado $a = (a_1, \dots, a_n) \in \mathbb{R}^n$, $M_a = F^{-1}(a)$ vendrá dado por

$$\begin{cases} p_1^2 + \omega_1^2 q_1^2 = 2a_1 \\ p_2^2 + \omega_2^2 q_2^2 = 2a_2 \\ \vdots \\ p_n^2 + \omega_n^2 q_n^2 = 2a_n, \end{cases}$$

que son las ecuaciones de un toro n -dimensional. Cada una de las ecuaciones $p_i^2 + q_i^2 = 2a_i$ da, en el plano (q_i, p_i) , una elipse $C_{a,i}$ de semiejes $\sqrt{2a_i}$ y $\frac{\sqrt{2a_i}}{\omega_i}$, de modo que $M_a = C_{a,1} \times \dots \times C_{a,n}$. Nótese que en este caso los valores críticos son precisamente aquellos a con varias componentes iguales, de forma que los puntos críticos formarán toros de dimensión menor.

Consideremos $\gamma_{a,i}$ lazos en cada elipse $C_{a,i}$, de manera que los $\gamma_{a,i}$ son generadores del grupo fundamental de M_a . Entonces podemos definir las variables de acción

$$J_i(a) = \frac{1}{2\pi} \int_{\gamma_{a,i}} \sum_{k=1}^n p_k dq_k = \frac{1}{2\pi} \int_{\gamma_{a,i}} p_i dq_i = \frac{a_i}{\omega_i}.$$

Consideremos ahora las variables angulares ϕ_i a lo largo de cada $C_{i,a}$. Podemos tomar entonces las nuevas coordenadas (ϕ, J) , con

$$J_i(q, p) = J_i(F(q, p)) = \frac{1}{2\pi} \int_{\gamma_{F(q,p),i}} p_i dq_i = \frac{H_i(q, p)}{\omega_i},$$

y $\phi(q, p)$ las variables angulares en el toro $M_{F(q,p)}$. Si la carta (ϕ, J) es de Darboux, las ecuaciones de Hamilton pueden integrarse por cuadraturas. Esto se debe a que $H = \sum_{i=1}^n H_i(J, \phi) = \sum_{i=1}^n \omega_i J_i$, de modo que, por las ecuaciones de Hamilton,

$$\begin{cases} \dot{J}_i = \frac{\partial H}{\partial \phi_i} = 0, \\ \dot{\phi}_i = -\frac{\partial H}{\partial J_i} = -\omega_i. \end{cases}$$

Las ecuaciones de Hamilton quedan entonces integradas en la forma

$$\begin{cases} J_i(t) = J_i(0) \\ \phi_i(t) = \phi_i(0) - \omega_i t. \end{cases}$$

Este tipo de flujo en el toro se llama *movimiento condicionalmente periódico*, ya que, dependiendo de los valores de las frecuencias ω_i , las trayectorias serán cerradas y periódicas o serán densas en cada toro de Liouville. En la siguiente sección profundizaremos más en este tema.

4.4. Movimiento condicionalmente periódico

Una vez tenemos a nuestra disposición el teorema de Arnold-Liouville, sabemos que el flujo en los toros de Liouville será muy sencillo. En esta sección vamos a estudiar el flujo en estos toros y obtendremos un teorema muy importante sobre este tipo de sistemas.

En primer lugar, consideremos un 2-toro de Liouville. Sea (θ_1, θ_2) un punto en el toro y su trayectoria bajo el flujo hamiltoniano $\gamma(t) = \varphi_t(\theta_1, \theta_2) = (\theta_1 + \omega_1 t, \theta_2 + \omega_2 t)$. Si $\omega_1/\omega_2 = m/n$ es racional, entonces

$$\gamma\left(\frac{2n\pi}{\omega_2}\right) = (\theta_1 + 2m\pi, \theta_2 + 2n\pi) = (\theta_1, \theta_2).$$

Es decir, a cierto tiempo la trayectoria «se cierra». Estas órbitas se dicen *periódicas*.

Sin embargo, si ω_2/ω_1 es irracional, dado un ángulo α y tomando T tal que $\alpha = \theta_1 + \omega T$, entonces podemos tomar $T_n = T + 2n\pi/\omega_1$, $\alpha = \theta_1 + \omega_1(T_n)$ para cada $n \in \mathbb{N}$. Ahora, la aplicación

$$\begin{aligned} g : \mathbb{S}^1 &\longrightarrow \mathbb{S}^1 \\ \phi &\longmapsto \phi + 2\pi \frac{\omega_2}{\omega_1}, \end{aligned}$$

es una rotación de ángulo un múltiplo irracional de 2π en la circunferencia del toro de ángulo α . Entonces, como ya vimos por el teorema de recurrencia de Poincaré (teorema 3.5.1), $\{g^n(\phi) | n \in \mathbb{N}\}$ es denso en \mathbb{S}^1 . Como esto es válido para todo α y se cumple

$$\gamma(T_n) = (\alpha, g^n(\theta_2) + \omega_2 T),$$

tenemos que $\{\gamma(t) | t \in \mathbb{R}\}$ es denso en el toro. Este tipo de órbitas se llaman *cuasiperiódicas*. Una forma sencilla de visualizar esto es mediante las *figuras de Lissajous*

$$L_\omega = \{(\cos t, \cos \omega t) | t \in \mathbb{R}\},$$

ver figura 4.5.

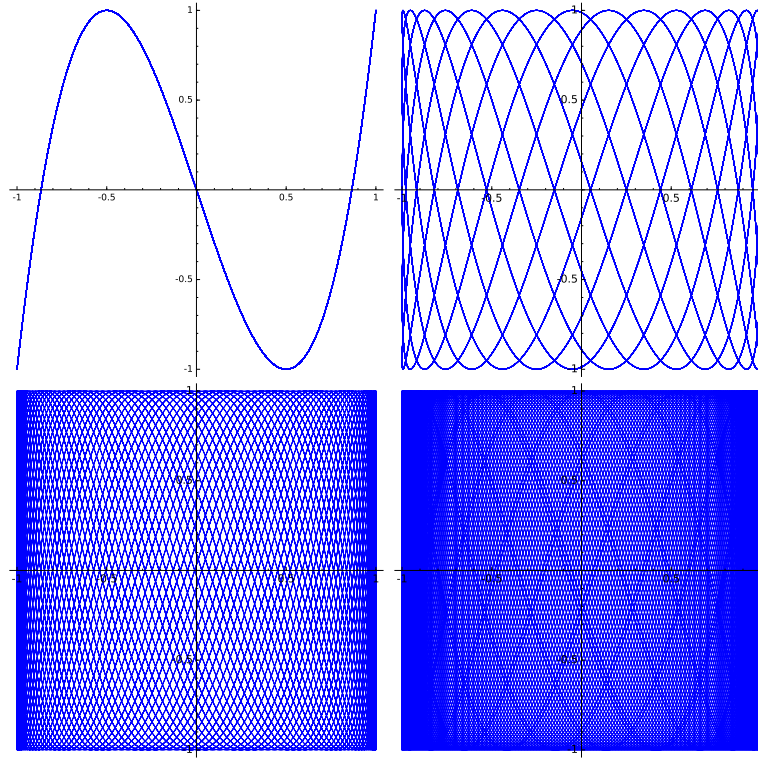


Figura 4.5: Figuras de Lissajous para $\omega = 3, 3,1, 3,14$, y $3,1416$, $t \in (0, 128\pi)$ con pasos de $0,01$.

Vamos a generalizar ahora estas ideas al caso n -dimensional.

Definición 4.4.1. Sean \mathbb{T}^n el toro n -dimensional y $\phi = (\phi_1, \dots, \phi_n)$ coordenadas angulares. Se entiende por un *movimiento condicionalmente periódico* en el toro el flujo uniparamétrico dado por

$$\phi(t) = \phi(0) + \omega t$$

con $\omega = (\omega_1, \dots, \omega_n)$ frecuencias constantes en el toro. Las frecuencias ω se dicen *independientes* si, para cada $k \in \mathbb{Z}^n$, $\langle k, \omega \rangle = 0$ si y sólo si $k = 0$.

Definición 4.4.2. Sea $f : \mathbb{T}^n \rightarrow \mathbb{R}$ una función integrable Riemann,

1. El *promedio espacial* de f en \mathbb{T}^n es el número

$$\bar{f} = \frac{1}{(2\pi)^n} \int_0^{2\pi} \cdots \int_0^{2\pi} f(\phi) d\phi_1, \dots, d\phi_n.$$

2. El *promedio temporal* de f en \mathbb{T}^n es la función

$$f^*(\phi_0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T f(\phi_0 + \omega t) dt,$$

definida en los puntos ϕ_0 en los que exista el límite.

Teorema 4.4.3 (Teorema de los promedios). *Si $f : \mathbb{T}^n \rightarrow \mathbb{R}$ es una función integrable Riemann y las frecuencias ω son independientes, el promedio temporal está bien definido en todo el toro \mathbb{T}^n y coincide en todo punto con el promedio espacial.*

Demostración. En primer lugar, consideramos funciones de la forma $e^{i\langle k, \phi \rangle}$, $k \in \mathbb{Z}^n$. Si $k = 0$, entonces $\bar{f} = f = f^* = 1$. Si $k \neq 0$, \bar{f} es una integral a periodos en funciones trigonométricas, luego es igual a 0. Por otra parte

$$\int_0^T e^{i\langle k, \phi_0 + \omega t \rangle} dt = e^{i\langle k, \phi_0 \rangle} \int_0^T e^{i\langle k, \omega \rangle t} dt = e^{i\langle k, \phi_0 \rangle} \frac{e^{i\langle k, \omega \rangle T} - 1}{i \langle k, \omega \rangle}.$$

Por tanto, el promedio temporal será

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{e^{i\langle k, \phi_0 \rangle} \frac{e^{i\langle k, \omega \rangle T} - 1}{i \langle k, \omega \rangle}}{T} = 0.$$

Como los promedios dependen linealmente de f , también coincidirán para los polinomios trigonométricos

$$f = \sum_{|k| < N} f_k e^{i\langle k, \omega \rangle}.$$

Dado $\varepsilon > 0$, si f es continua y real por el teorema de Weierstrass podemos aproximarla por un polinomio trigonométrico P que cumpla $|f - P| < \frac{1}{2}\varepsilon$. Sean $P_1 = P - \frac{1}{2}\varepsilon$, $P_2 = P + \frac{1}{2}\varepsilon$ entonces

$$\bar{P}_2 - \bar{P}_1 = \frac{1}{(2\pi)^n} \int_{\mathbb{T}^n} (P_2 - P_1) d\phi = \frac{1}{(2\pi)^n} \varepsilon (2\pi)^n = \varepsilon.$$

Dado $\varepsilon > 0$, si f es real e integrable Riemann, entonces existen dos funciones continuas f_1, f_2 tales que $f_1 < f < f_2$ y $\int_{\mathbb{T}^n} \frac{1}{(2\pi)^n} (f_2 - f_1) d\phi < \frac{1}{3}\varepsilon$. Tomando ahora P_1, P_2 polinomios trigonométricos tales que $P_1 < f_1 < f_2 < P_2$ y $\int_{\mathbb{T}^n} \frac{1}{(2\pi)^n} (P_i - f_i) d\phi < \frac{1}{3}\varepsilon$, para $i = 1, 2$, entonces

$$\bar{P}_2 - \bar{P}_1 = \frac{1}{(2\pi)^n} \int_{\mathbb{T}^n} (P_2 - P_1) d\phi = \frac{1}{(2\pi)^n} \varepsilon (2\pi)^n = \varepsilon.$$

Por último, sea $\varepsilon > 0$, entonces existen dos polinomios trigonométricos P_1, P_2 tales que $P_1 < f < P_2$ y $\bar{P}_2 - \bar{P}_1 < \varepsilon$. Ahora, como $f < P_2$,

$$\frac{1}{T} \int_0^T f(\phi(t)) dt < \frac{1}{T} \int_0^T P_2(\phi(t)) dt,$$

luego

$$\left| \frac{1}{T} \int_0^T f(\phi(t)) dt - \bar{f} \right| < \left| \frac{1}{T} \int_0^T P_2(\phi(t)) dt - \bar{f} \right| < \left| \frac{1}{T} \int_0^T P_2(\phi(t)) dt - \bar{P}_2 \right| + |\bar{P}_2 - \bar{f}|.$$

Pero, como $P_1 < f < P_2$, por la monotonía de la integral $\bar{P}_1 < f < \bar{P}_2$, luego $|\bar{P}_2 - \bar{f}| < |\bar{P}_2 - \bar{P}_1| < \varepsilon$. Además, como P_2 es un polinomio trigonométrico existe un T_0 tal que, si $T > T_0$

$$\left| \frac{1}{T} \int_0^T P_2(\phi(t)) dt - \bar{P}_2 \right| < \varepsilon.$$

Finalmente, obtenemos lo que queríamos probar

$$\left| \frac{1}{T} \int_0^T f(\phi(t)) dt - \bar{f} \right| < \left| \frac{1}{T} \int_0^T P_2(\phi(t)) dt - \bar{P}_2 \right| + |\bar{P}_2 - \bar{f}| < \varepsilon + \varepsilon = 2\varepsilon,$$

luego $f^*(\phi_0) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T f(\phi(t)) dt = \bar{f}$. □

Corolario 4.4.4. *Si las frecuencias son independientes, entonces, para todo $\phi_0 \in \mathbb{T}^n$,*

$$\{\phi(t) = \phi_0 + \omega t | t \in \mathbb{R}\}$$

es denso en el toro \mathbb{T}^n .

Demostración. En caso contrario, podemos tomar un abierto D del toro que no tiene ningún punto de la trayectoria $\phi(t)$. Construimos la función

$$f(\phi) = \begin{cases} 0 & \text{si } \phi \notin D \\ \frac{(2\pi)^n}{\int_D d\phi} & \text{si } \phi \in D. \end{cases}$$

Claramente, $\bar{f} = 1$, pero $f^*(\phi_0) = 0$, lo que contradice el teorema de los promedios. □

Corolario 4.4.5. *Sea $D \subset \mathbb{T}^n$ un conjunto medible Jordan. Sea $A_D = \{t \in \mathbb{R} | \phi(t) \in D\}$ (que también es medible Jordan) y sea $\tau_D(T) = \int_0^T \chi_{A_D}(t) dt$. Entonces*

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\tau_D(T)}{T} = \frac{\text{Vol}(D)}{(2\pi)^n}.$$

Demostración. Aplicamos el teorema a χ_D , entonces $\int_0^T \chi_D(\phi(t)) dt = \int_0^T \chi_{A_D}(t) dt = \tau_D(t)$ y $\bar{\chi}_D = (2\pi)^{-n} \text{Vol}(D)$. Finalmente, por el teorema de los promedios

$$\bar{\chi}_D = \frac{\text{Vol}(D)}{(2\pi)^n} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \chi_D(\phi(t)) dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\tau_D(T)}{T}.$$

□

4.5. Sistemas con un grado de libertad

En esta sección damos algunas generalidades sobre los sistemas hamiltonianos con un grado de libertad que, como ya hemos visto, son todos integrables en el sentido de Liouville. Uno de los ejemplos más característicos es el péndulo simple, que estudiamos a continuación.

El péndulo simple

Consideramos un péndulo de masa $m = 1$ cuya «cuerda» es una barra rígida de masa despreciable y longitud 1. El espacio de configuración del péndulo es entonces la circunferencia unidad \mathbb{S}^1 y su espacio de fases será el fibrado tangente de \mathbb{S}^1 , que no es otra cosa que un cilindro. Tomando como coordenada generalizada el ángulo ϕ de desviación del péndulo respecto de la vertical, el hamiltoniano viene dado por

$$H(\phi, p) = \frac{1}{2}p^2 - g \cos \phi,$$

donde g es la aceleración de la gravedad y hemos tomado el centro como origen de energía potencial. Como podemos ver en la figura 4.6 las trayectorias son cerradas, luego cada curva de energía constante es compacta. Para estudiar los puntos críticos, nótese que dH es distinta de 0 en todo punto exceptuando los casos $(\phi = 0, p = 0)$ y $(\phi = \pi, p = 0)$, que corresponden a puntos de equilibrio (el primero, estable, el segundo, inestable) donde la trayectoria es sólo un punto. La curva que aparece punteada en la figura, de ecuación

$$g = H(\phi, p) = \frac{1}{2}p^2 - g \cos \phi,$$

corresponde al punto de equilibrio y a dos trayectorias que tienden asintóticamente al punto de equilibrio inestable. Este conjunto no es un toro de Liouville ya que contiene al punto crítico $(\pi, 0)$. Estas trayectorias son matemáticamente factibles aunque su realización práctica parezca una tarea imposible. Las curvas que quedan dentro de la curva punteada corresponden a movimientos de oscilación en torno al punto de equilibrio estable, mientras que las que quedan fuera corresponden a movimientos de rotación del péndulo alrededor de su centro.

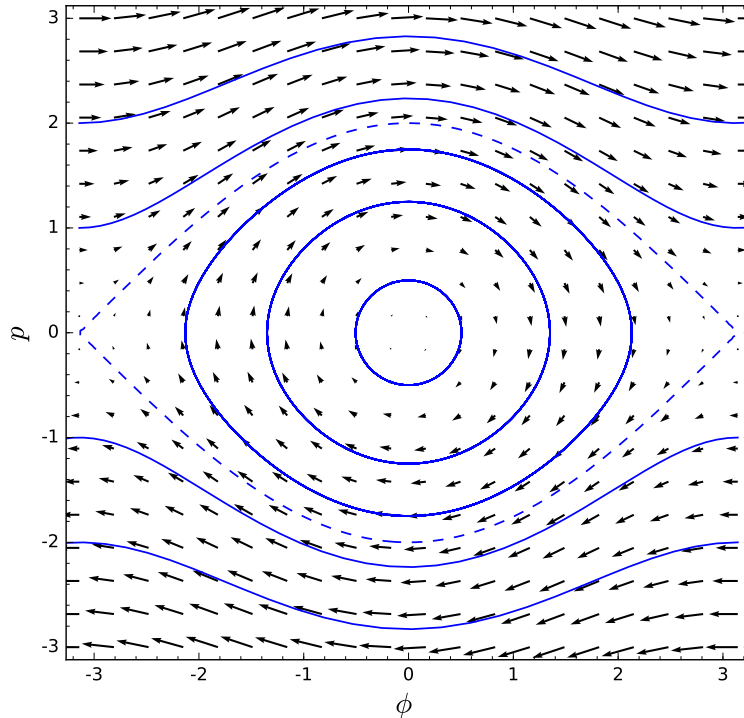


Figura 4.6: Espacio de fases del péndulo junto al campo hamiltoniano y las curvas de nivel. Nótese que el lado derecho ($\phi = \pi$) está identificado con el lado izquierdo ($\phi = -\pi$), ya que se trata de un cilindro.

Puntos críticos de los sistemas con un grado de libertad

Los dos tipos de punto crítico que presenta el péndulo simple se conocen como *centros*, para el $(0, 0)$ y *sillas*, para el $(\pi, 0)$. Podemos probar que, de hecho esos son los únicos tipos de punto crítico

que puede presentar un sistema hamiltoniano en \mathbb{R}^2 . En efecto, supongamos que $(0, 0)$ es un punto de equilibrio de un sistema hamiltoniano. Podemos escribir las ecuaciones de Hamilton en la forma

$$\begin{pmatrix} \dot{q} \\ \dot{p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial H}{\partial q} \\ \frac{\partial H}{\partial p} \end{pmatrix},$$

de modo que su versión linealizada en torno al $(0, 0)$ será

$$\begin{pmatrix} \dot{q} \\ \dot{p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 H}{\partial q^2} & \frac{\partial^2 H}{\partial p \partial q} \\ \frac{\partial^2 H}{\partial q \partial p} & \frac{\partial^2 H}{\partial p^2} \end{pmatrix} \bigg|_{(q,p)=(0,0)} \begin{pmatrix} q \\ p \end{pmatrix} = J_1 B \begin{pmatrix} q \\ p \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} q \\ p \end{pmatrix}.$$

De la simetría de la matriz de segundas derivadas B y de las propiedades de la matriz J_1 , tenemos que A ha de cumplir la condición

$$A^t J_1 + J_1 A = 0.$$

Las matrices que cumplen esta condición forman el álgebra de Lie $\mathfrak{sp}(2)$ del grupo simpléctico $\mathrm{Sp}(2)$.

Proposición 4.5.1. *Si α es un autovalor de una matriz $A \in \mathfrak{sp}(2)$ con multiplicidad algebraica k , entonces $-\alpha$ es también un autovalor de A con la misma multiplicidad. Si $\alpha = 0$ entonces su multiplicidad es par.*

Demostración. Los autovalores son los ceros del polinomio característico $P(\alpha) = \det(\alpha I - A)$. Por tanto, basta probar que $\det(\alpha I - A) = \det(\alpha I + A)$. Esto se ve de la siguiente manera,

$$\begin{aligned} P(\alpha) &= \det(\alpha I - A) = \det(-\alpha J_1^2 - J_1 B) = \det J_1 \det(-\alpha J_1 - B) \\ &= \det(-\alpha J_1 - B)^t = \det(\alpha J_1 - B) = \det(\alpha I - J_1^{-1} B) \\ &= \det(\alpha I + J_1 B) = \det(\alpha I + A). \end{aligned}$$

□

Por tanto, los autovalores de A son imaginarios, opuestos o ambos cero, luego el punto crítico $(0, 0)$ solo puede ser un centro (en el caso de autovalores imaginarios) o un punto de silla (en el caso de autovalores reales opuestos). Como consecuencia de esto tenemos que el sistema hamiltoniano no puede tener puntos *asintóticamente estables*, lo que tal vez era de esperar a la vista de la conservación de la energía y del teorema de Liouville: los puntos asintóticamente estables funcionarían como «fuentes» o «sumideros» del área de Liouville.

4.6. Más sistemas integrables

Cuando estudiamos sistemas con varios grados de libertad, la integrabilidad requiere de la existencia de cantidades conservadas adicionales. Como ya vimos en el apartado de simetrías y leyes de conservación, una forma útil de encontrar cantidades conservadas es observar las simetrías del sistema, siguiendo el mecanismo de Noether. En esta sección veremos dos ejemplos donde podemos ver directamente esta relación entre las simetrías y la integrabilidad del sistema.

El péndulo esférico

Un péndulo esférico consiste en una partícula (aquí supondremos de masa $m = 1$) enganchada por una barra rígida de masa despreciable y de longitud 1 a un punto del espacio y bajo la acción de la gravedad. Es decir, es como un péndulo simple, solo que no está restringido a oscilar en un solo plano, sino que puede moverse libremente, ver figura 4.7.

Podemos considerar el sistema inmerso en \mathbb{R}^3 , de modo que el espacio de fases en principio será el espacio simpléctico estándar 6-dimensional (\mathbb{R}^6, Ω_3) . Ahora, la ligadura del péndulo restringe el

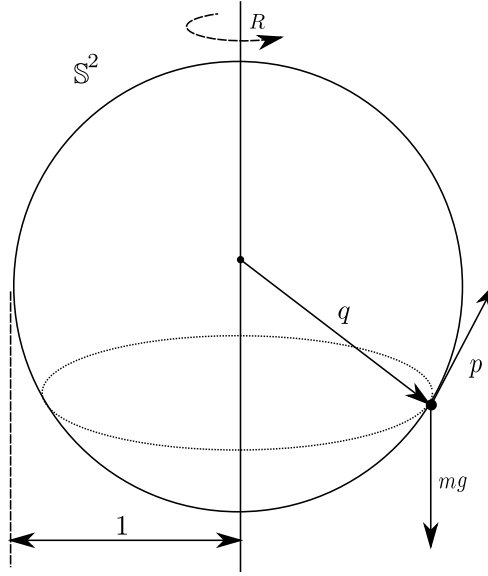


Figura 4.7: Péndulo esférico

movimiento espacial a una esfera de radio 1, y las velocidades serán siempre tangentes a esta esfera. De este modo, el espacio de fases será

$$M = \{(q, p) \in \mathbb{R}^6 : \|q\| = 1, \langle q, p \rangle = 0\},$$

que claramente es difeomorfo al fibrado tangente de la esfera, $T\mathbb{S}^2$. La forma simpléctica en M será simplemente la restricción de Ω_3 a M . El hamiltoniano será la restricción a M de la función

$$\begin{aligned} H : \mathbb{R}^6 &\longrightarrow \mathbb{R} \\ (q, p) &\longmapsto \frac{1}{2m}\|p\|^2 + mgq_3, \end{aligned}$$

donde q_3 es la componente vertical del vector $q = (q_1, q_2, q_3)$.

Observemos ahora que el sistema es invariante bajo las rotaciones en torno a la vertical. En efecto, si $R \in \text{SO}(3)$ es una rotación en torno a la vertical, como la tercera componente no varía respecto de las rotaciones en torno a la vertical y las rotaciones preservan la norma,

$$H(R(q), R(p)) = \frac{1}{2m}\|R(p)\|^2 + mgq_3 = \frac{1}{2m}\|p\|^2 + mgq_3 = H(q, p).$$

Por tanto, la tercera componente del momento angular $L_3 = q_1p_2 - q_2p_1$ es una cantidad conservada del sistema (M, H) . Como $\dim(M) = 4$ y hemos encontrado una cantidad conservada del sistema a parte del propio hamiltoniano, no es difícil comprobar que H y L_3 son independientes para casi todo punto, luego el sistema (M, H) será integrable en el sentido de Liouville.

El potencial central

Consideremos el caso genérico de una partícula moviéndose en el espacio sujeta a una fuerza central, es decir, dirigida siempre hacia el origen y cuyo valor dependa solo de la distancia de la partícula a este. Un ejemplo típico sería el de una partícula moviéndose en un potencial kepleriano $V(r) = -k/r$ (por ejemplo, la Tierra alrededor del Sol). El espacio de fases del sistema es el espacio simpléctico estándar 6-dimensional (\mathbb{R}^6, Ω_3) y el hamiltoniano viene dado por la función

$$H(q, p) = \frac{1}{2m}\|p\|^2 + V(\|q\|).$$

Claramente, el sistema es invariante bajo rotaciones ya que, si $R \in \text{SO}(3)$ es una rotación, entonces, como las rotaciones preservan la norma

$$H(R(q), R(p)) = \frac{1}{2m}\|R(p)\|^2 + V(\|R(q)\|) = \frac{1}{2m}\|p\|^2 + V(\|q\|) = H(q, p).$$

Como consecuencia, se conserva el momento angular $L = q \times p$. En particular, se conservarán $L^2 = \langle L, L \rangle$ y $L_3 = q_1 p_2 - q_2 p_1$. Ahora, si calculamos el corchete de Poisson

$$\{L^2, L_3\} = \sum_{i=1}^3 \{L_i^2, L_3\} = \sum_{i=1}^3 2L_i \{L_i, L_3\},$$

por la regla de Leibniz. Como $\{L_3, L_3\} = 0$, tenemos

$$\{L^2, L_3\} = 2L_1 \{L_1, L_3\} + 2L_2 \{L_2, L_3\}.$$

Basta entonces hallar

$$\{L_1, L_3\} = \{q_2 p_3 - q_3 p_2, q_1 p_2 - q_2 p_1\},$$

que, usando la linealidad del corchete de Poisson y la identidad de Jacobi y teniendo en cuenta que $\{q_i, q_j\} = \{p_i, p_j\} = 0$ podemos desarrollar hasta llegar a

$$\{L_1, L_3\} = -p_3 q_1 \{q_2, p_2\} - q_3 p_1 \{p_2, q_2\} = +p_3 q_1 - q_3 p_1 = -L_2.$$

Un cálculo análogo muestra que $\{L_2, L_3\} = L_1$, de modo que

$$\{L^2, L_3\} = -2L_1 L_2 + 2L_2 L_1 = 0.$$

Por tanto, H , L^2 y L_3 son 3 funciones en involución y además es posible comprobar que son independientes en casi todo punto de \mathbb{R}^6 , de modo que el sistema (M, H) es integrable en el sentido de Liouville.

Bibliografía

- [1] R. Abraham and J. E. Marsden. *Foundations of Mechanics*. Benjamin/Cummings, 1978.
- [2] V. I. Arnold. *Mathematical Methods of Classical Mechanics*. Springer-Verlag, 1989. [10](#)
- [3] Michèle Audin. *Torus actions on Symplectic Manifolds*. Birkhäuser, 2012.
- [4] A. V. Bolsinov and A.T. Fomenko. *Integrable Hamiltonian systems: geometry, topology, classification*. CRC Press, 2004.
- [5] J.F. Fernando, J.M. Gamboa, and J.M. Ruiz. *Álgebra lineal (vol. 2)*. Sanz y Torres, 2010. [23](#)
- [6] J.M. Gamboa and J.M. Ruiz. *Introducción al estudio de las Variedades Diferenciables*. Sanz y Torres, 2016. [15](#)
- [7] H. Goldstein, C.P. Poole, and J.L. Safko. *Classical Mechanics*. Pearson Education India, 2011. [10](#)
- [8] L.D. Landau and E.M. Lifshitz. *Curso de física teórica (vol. 1): Mecánica*. Reverté, 1985. [10](#)
- [9] John M. Lee. *Introduction to Smooth Manifolds*. Springer, 2003. [19](#)
- [10] Mircea Puta. The completeness of some Hamiltonian vector fields on a Poisson manifold. *An. Univ. Timisoara Ser. Mat.-Inform*, 32:93–98, 1994. [42](#)
- [11] Florian Scheck. *Mechanics: from Newton's laws to deterministic chaos*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [12] Michael Spivak. *Physics for Mathematicians: Mechanics I*. Publish or Perish, 2010.