La interpretación modal-Hamiltoniana y la naturaleza relacional del tiempo

Matías Pasqualini – Sebastian Fortin

CONICET
Universidad Nacional de Rosario – Universidad de Buenos Aires

Grupo de Filosofía de las Ciencias - 02 de junio de 2021

John Templeton Foundation

CONICET

CONTENIDO

1. Tiempo clásico y relacionalismo
2. El tiempo en mecánica cuántica
3. El tiempo en la interpretación modal-Hamiltoniana
4. Reconstrucción secuencial del tiempo de eventos
5. Relatividad del tiempo de eventos respecto de la TPS

CONTENIDO

1. Tiempo clásico y relacionalismo
2. El tiempo en mecánica cuántica
3. El tiempo en la interpretación modal-Hamiltoniana
4. Reconstrucción secuencial del tiempo de eventos
5. Relatividad del tiempo de eventos respecto de la TPS

Debate Leibniz - Newton

Debate Leibniz - Newton

- Para Leibniz, los objetos físicos solo tienen posición temporal y espacial relativa a otros objetos.

- Para Newton, los objetos físicos tienen posición temporal y espacial absoluta.

Debate Leibniz - Newton

- Para Leibniz, los objetos físicos solo tienen posición temporal y espacial relativa a otros objetos.
- Para Newton, los objetos físicos tienen posición temporal y espacial absoluta.

RELACIONALISMO VS **SUSTANCIALISMO**

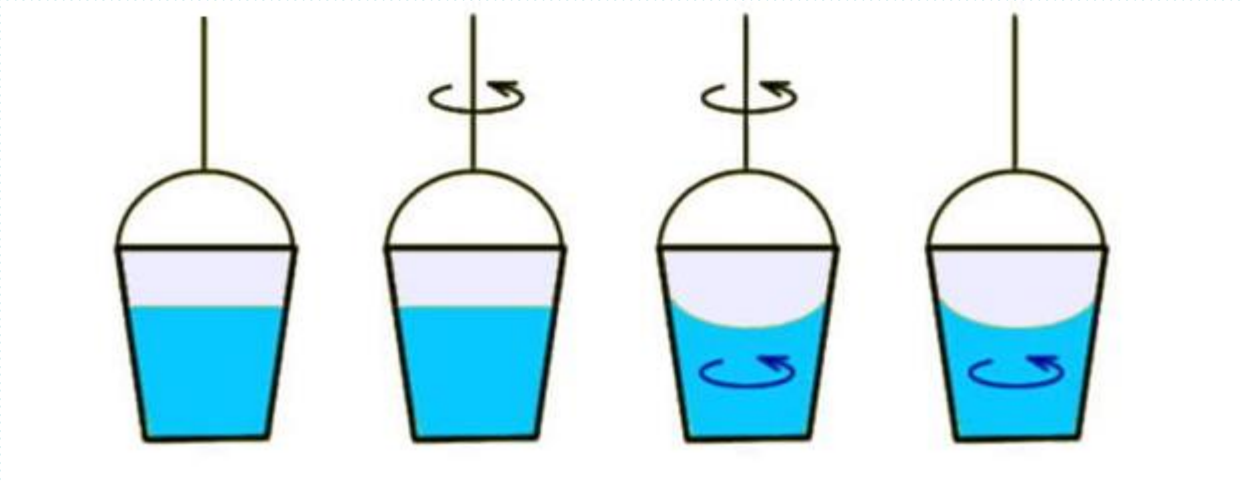
Debate Leibniz - Newton

- Para Leibniz, los objetos físicos solo tienen posición temporal y espacial relativa a otros objetos.
- Para Newton, los objetos físicos tienen posición temporal y espacial absoluta.

RELACIONALISMO VS **SUSTANCIALISMO**

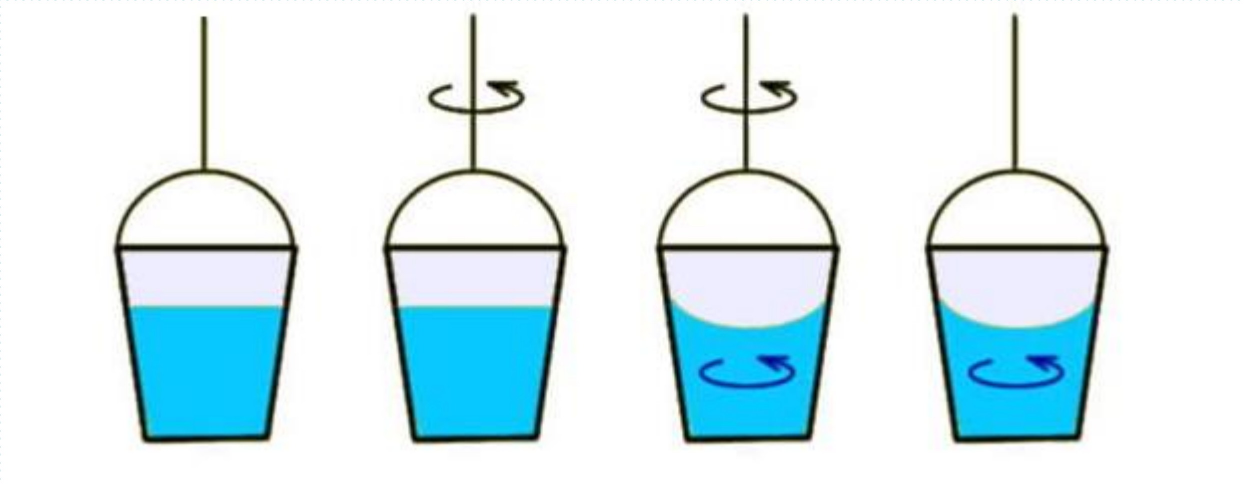
Experimento del balde de agua de Newton

Experimento del balde de agua de Newton



Experimento del balde de agua de Newton

- Aparecen fuerzas centrífugas en el agua con independencia de su orientación relativa al balde:



Principio de Mach

Principio de Mach

- Las fuerzas centrífugas que aparecen en los objetos en rotación son consecuencia de su orientación relativa respecto a la distribución de masa del universo y no respecto al espacio absoluto.

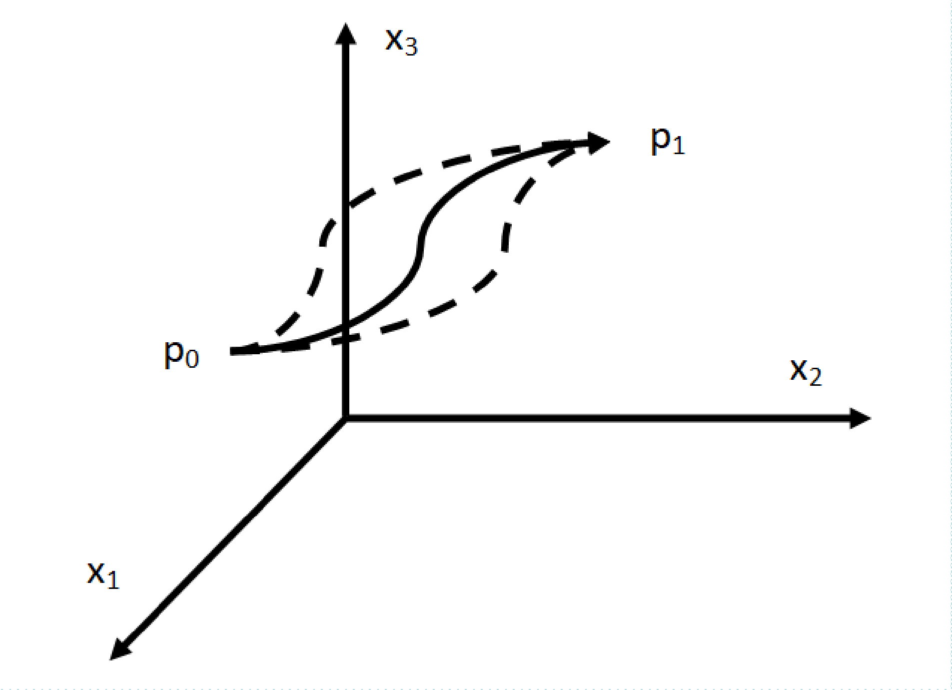
- Este principio motivará la aparición de la teoría de la relatividad especial y general, aunque diferentes motivos impiden considerar a la relatividad como una teoría completamente relacionalista del espacio-tiempo.

Julian Barbour y el programa relacionalista

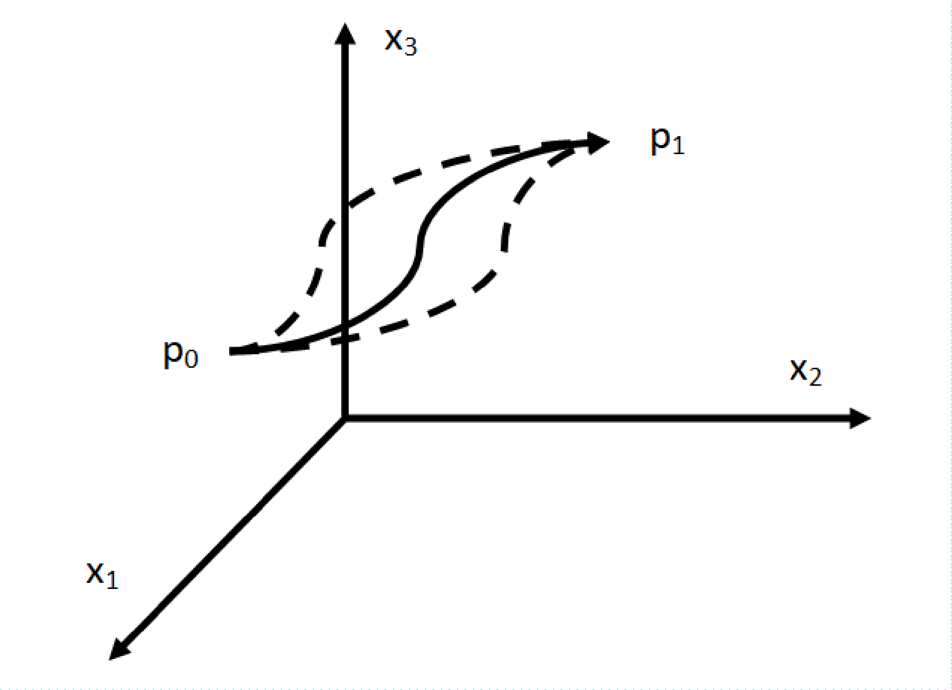
Julian Barbour y el programa relacionalista

- Junto con Bruno Bertotti (1982) proponen una reformulación de la mecánica clásica prerrelativista que prescinde del espacio y del tiempo absolutos.
- En mecánica clásica se necesitan habitualmente dos magnitudes (posición y momento) por cada grado de libertad para definir las trayectorias dinámicas.
- Sin embargo, por medio de lo que los autores llaman *best-matching* (Pooley y Brown 2002) logran definir una dinámica sobre un espacio de configuración.

Julian Barbour y el programa relacionalista



Julian Barbour y el programa relacionalista



¿Cuál es es la trayectoria dinámicamente admisible entre la posición inicial p_0 y la posición final p_1?

Pareciera que sin conocer el momento lineal (y angular) del sistema esa cuestión no puede ser resuelta.

Julian Barbour y el programa relacionalista

- La reformulación predice que el conjunto del universo deberá tener momento angular cero (de modo consistente con las observaciones).
- Es decir, la reformulación relacionalista admite para el universo solo un subconjunto de todas las trayectorias dinámicas admitidas por Newton.
- Sin embargo, admite la aparición de fenómenos dinámicos para subsistemas del universo (como los del balde de Newton) en función de la distribución y movimiento del resto del universo.

CONTENIDO

1. Tiempo clásico y relacionalismo
2. El tiempo en mecánica cuántica
3. El tiempo en la interpretación modal-Hamiltoniana
4. Reconstrucción secuencial del tiempo de eventos
5. Relatividad del tiempo de eventos respecto de la TPS

El programa relacionalista en cuántica

El programa relacionalista en cuántica

- No abundan intentos de extender el programa relacionalista al tiempo y espacio empleados en mecánica cuántica.
- Se acepta que las conclusiones que se obtienen en clásica se trasladan sin más a la cuántica no relativista.
- Las transformaciones temporales y espaciales empleadas en cuántica son las mismas que en clásica (grupo de Galileo).

Las peculiaridades del tiempo en cuántica

Las peculiaridades del tiempo en cuántica

1. Distinción entre tiempo externo (t) y tiempo de eventos (τ)

2. Relación de indeterminación energía y tiempo

3. El tiempo de eventos no se puede definir en el formalismo

Tiempo externo (t)

Tiempo externo (t)

- El tiempo externo es el parámetro t que aparece en la ley dinámica de la teoría (ecuación de Schrödinger).

- Se mide con un reloj externo e independiente del sistema bajo estudio.

- Representa en general el intervalo entre el instante de preparación de un sistema y el instante de su medición.

Tiempo externo (t)

- El tiempo externo es un parámetro que se corresponde con un arreglo experimental particular.

- Se pueden fijar todos los otros parámetros y variar solamente t, con el resultado de que variarán las probabilidades correspondientes a los posibles resultados de la medición.

Tiempo externo (t)

- El tiempo externo es un parámetro que se corresponde con un arreglo experimental particular.
- Se pueden fijar todos los otros parámetros y variar solamente t, con el resultado de que variarán las probabilidades correspondientes a los posibles resultados de la medición.

El parámetro t controla <u>probabilidades</u>
pero no la ocurrencia de <u>eventos</u>

Tiempo de eventos (τ)

Tiempo de eventos (τ)

- La variación en el tiempo externo de una probabilidad cuántica no es inmediatamente observable. Los eventos cuánticos sí son inmediatamente observables.
- Definimos al evento cuántico $\left(H^S : \omega_\Omega^S, \tau_1\right)$ como la adquisición en el instante τ_1 del valor definido ω_Ω para el observable H de un sistema S.

Tiempo de eventos (τ)

- La variación en el tiempo externo de una probabilidad cuántica no es inmediatamente observable. Los eventos cuánticos sí son inmediatamente observables.

- Definimos al evento cuántico $\left(H^S : \omega_\Omega^S, \tau_1\right)$ como la adquisición en el instante τ_1 del valor definido ω_Ω para el observable H de un sistema S.

Tiempo de eventos (τ)

- La variación en el tiempo externo de una probabilidad cuántica no es inmediatamente observable. Los eventos cuánticos sí son inmediatamente observables.

- Definimos al evento cuántico $\left(H^S : \omega_\Omega^S, \tau_1\right)$ como la adquisición en el instante τ_1 del valor definido ω_Ω para el observable H de un sistema S.

Tiempo de eventos (τ)

- La variación en el tiempo externo de una probabilidad cuántica no es inmediatamente observable. Los eventos cuánticos sí son inmediatamente observables.

- Definimos al evento cuántico $\left(H^{S}:\omega_{\Omega}^{S},\tau_{1}\right)$ como la adquisición en el instante τ_1 del valor definido ω_{Ω} para el observable H de un sistema S.

Indeterminación energía y tiempo

Indeterminación energía y tiempo

- En general existe en cuántica una relación de indeterminación entre observables incompatibles.
- El ejemplo más conocido es la indeterminación entre posición y momento:

$$\Delta Q \Delta P \geq \tfrac{1}{2}\hbar$$

- Se lee: el producto de la desviación del valor medio de Q y la desviación del valor medio de P no puede ser menor a cierta constante.

Indeterminación energía y tiempo

- La ecuación de Schrödinger muestra que la variación del estado del sistema respecto al tiempo externo t depende de su operador Hamiltoniano, es decir, su energía

$$\hbar \frac{\partial \left| \Psi \right\rangle}{\partial t} = -iH \left| \Psi \right\rangle$$

Indeterminación energía y tiempo

- La ecuación de Schrödinger muestra que la variación del estado del sistema respecto al tiempo externo t depende de su operador Hamiltoniano, es decir, su energía

$$\hbar \frac{\partial \left|\Psi\right\rangle}{\partial t} = -iH\left|\Psi\right\rangle$$

Indeterminación energía y tiempo

- La ecuación de Schrödinger muestra que la variación del estado del sistema respecto al tiempo externo t depende de su operador Hamiltoniano, es decir, su energía

$$\hbar \frac{\partial |\Psi\rangle}{\partial t} = -iH|\Psi\rangle$$

Indeterminación energía y tiempo

- La ecuación de Schrödinger muestra que la variación del estado del sistema respecto al tiempo externo t depende de su operador Hamiltoniano, es decir, su energía

$$\hbar \frac{\partial |\Psi\rangle}{\partial t} = -iH|\Psi\rangle$$

Indeterminación energía y tiempo

- En el caso de sistema cerrados, se aplica la ecuación de Schrödinger independiente del tiempo:

$$H\left|\Psi\right\rangle = E\left|\Psi\right\rangle$$

- Las soluciones de esta ecuación son los estados donde la energía tiene un valor definido, llamados también estados estacionarios.

- Si un sistema tiene valor definido de energía, la distribución de probabilidades para el resto de los observables no puede variar.

Indefinición del tiempo de eventos

Indefinición del tiempo de eventos

- Las consideraciones anteriores pueden llevar a pensar que es posible establecer una relación de indeterminación entre el operador energía H y un hipotético operador tiempo T.

- Sin embargo, W. Pauli probó que no es posible formular un operador T sin generar inconsistencias.

- Como consecuencia, al tiempo de eventos no se lo puede representar en el formalismo como a un observable. No se lo puede vincular con el tiempo externo. Queda indefinido por la teoría.

Sustancialismo vs. relacionalismo en cuántica

Sustancialismo vs. relacionalismo en cuántica

- Asumir un enfoque sustancialista respecto al tiempo externo resulta no problemático y hasta natural.

- Definir de modo relacionalista al tiempo externo supone reformular la cuántica para que en su dinámica el parámetro t sea sustituido por alguna correlación entre las variables dinámicas del sistema.

Sustancialismo vs. relacionalismo en cuántica

- Sin embargo, en cuántica el parámetro t de la ley dinámica no tiene la misma relevancia física que en clásica. En cuántica t no es el tiempo de eventos.

- Si quisiéramos buscar una definición relacional del tiempo de eventos, nos encontramos con el problema de que el tiempo de eventos no se puede siquiera definir en el formalismo de la cuántica.

- No obstante, veremos a continuación que si al formalismo de la mecánica cuántica añadimos ciertos postulados interpretativos, sí será posible definir al tiempo de eventos.

CONTENIDO

Postulados de la MHI

Postulados de la MHI

- Postulado de sistemas:

Un sistema cuántico *S* está representado por un par (*O*, *H*) tal que (i) *O* es el espacio de operadores autoadjuntos que representa los observables de un sistema, (ii) *H* es el Hamiltoniano independiente del tiempo del sistema *S*.

Postulados de la MHI

- Postulado de sistemas compuestos:

Un sistema cuántico representado por S: (O, H) es compuesto cuando puede ser particionado en dos sistemas cuánticos S^1: (O^1, H^1) y S^2: (O^2, H^2) tal que $O = O^1 \otimes O^2$ y $H = H^1 \otimes I^2 + I^1 \otimes H^2$
En este caso, decimos que S^1 y S^2 son subsistemas del sistema compuesto. Si el sistema no es compuesto, entonces es elemental.

Postulados de la MHI

- Regla de actualización:

Dado un sistema cuántico elemental representado por S: (O, H) , los observables de S que adquieren valores actuales son H y todos los observables que conmutan con H y tienen al menos las mismas simetrías que H.

Características de la MHI

Características de la MHI

- Como todas las interpretaciones modales, distingue entre un estado dinámico y un estado valor. El estado dinámico es el definido por el formalismo de la cuántica y evoluciona frente al tiempo externo según la ecuación de Schrödinger. Solo asigna probabilidades a los valores posibles de cada observable.

- Al mismo tiempo, el sistema tiene un estado valor que asigna valores definidos a ciertos observables. Cada interpretación modal tiene una regla de actualización particular para asignar dichos valores definidos.

Estado valor y tiempo de eventos

Estado valor y tiempo de eventos

- La MHI es la única interpretación modal para la cual el estado valor de un sistema no varía en el tiempo una vez constituido el sistema.

- Esto se debe a que el sistema por definición tiene Hamiltoniano independiente del tiempo y valor definido de energía.

Estado valor y tiempo de eventos

- Esta característica única del estado valor de la MHI permite referenciar el instante de ocurrencia de los eventos cuánticos con el tiempo externo:

Estado valor y tiempo de eventos

- Esta característica única del estado valor de la MHI permite referenciar el instante de ocurrencia de los eventos cuánticos con el tiempo externo:

> Los eventos cuánticos de un sistema S tienen lugar en el instante inicial de su evolución dinámica.

Estado valor y tiempo de eventos

- Sin embargo, la interpretación también hace posible referenciar al tiempo de eventos respecto de alguna otra variable dinámica relevante, haciendo prescindible así al tiempo externo.

CONTENIDO

1. Tiempo clásico y relacionalismo
2. El tiempo en mecánica cuántica
3. El tiempo en la interpretación modal-Hamiltoniana
4. Reconstrucción secuencial del tiempo de eventos
5. Relatividad del tiempo de eventos respecto de la TPS

Modelo de mediciones consecutivas

Modelo de mediciones consecutivas

- Sobre la base del modelo que la MHI propone para las mediciones consecutivas (Ardenghi, Lombardi y Narvaja 2011), montamos nuestra reconstrucción de las interacciones que pueden darse entre múltiples subsistemas cuánticos, dando lugar a eventos cuánticos.

- En mediciones consecutivas no es posible tomar trazas parciales para obtener los estados reducidos de los subsistemas después de cada interacción, sino recién al final, una vez que el arreglo experimental como un todo interactuó con el sistema objeto.

Esquema del arreglo experimental

Esquema del arreglo experimental

- Pensemos en un arreglo experimental donde un sistema objeto S: (O^S, H^S) interactúa con dos aparatos de medición M^1: (O^{M1}, H^{M1}) y M^2: (O^{M2}, H^{M2}). El arreglo es un sistema total compuesto U: (O^U, H^U) donde $O^U = O^S \otimes O^{M^1} \otimes O^{M^2}$

- El sistema S se encuentra en una superposición de estados $\sum_{i=1}^{n} c_i \left| a_i \right\rangle$ en el contexto de medición del observable A^S. El observable "puntero" de M^1 es P^{M1} y $\left| p_0^{M^1} \right\rangle$ es el estado en que el aparato está listo para medir, y "puntero" de M^2 es P^{M1} con estado listo para medir $\left| p_0^{M^2} \right\rangle$.

Esquema del arreglo experimental

- El Hamiltoniano H^{U} del sistema total U tendrá la forma:

$$H^{U} = H^{S} \otimes I^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^{S} \otimes H^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^{S} \otimes I^{M^1} \otimes H^{M^2} + H^{\text{int}}_{S-M^1} \otimes I^{M^2} + H^{\text{int}}_{S-M^2} \otimes I^{M^1}$$

- Los Hamiltonianos de interacción deberán cumplir:

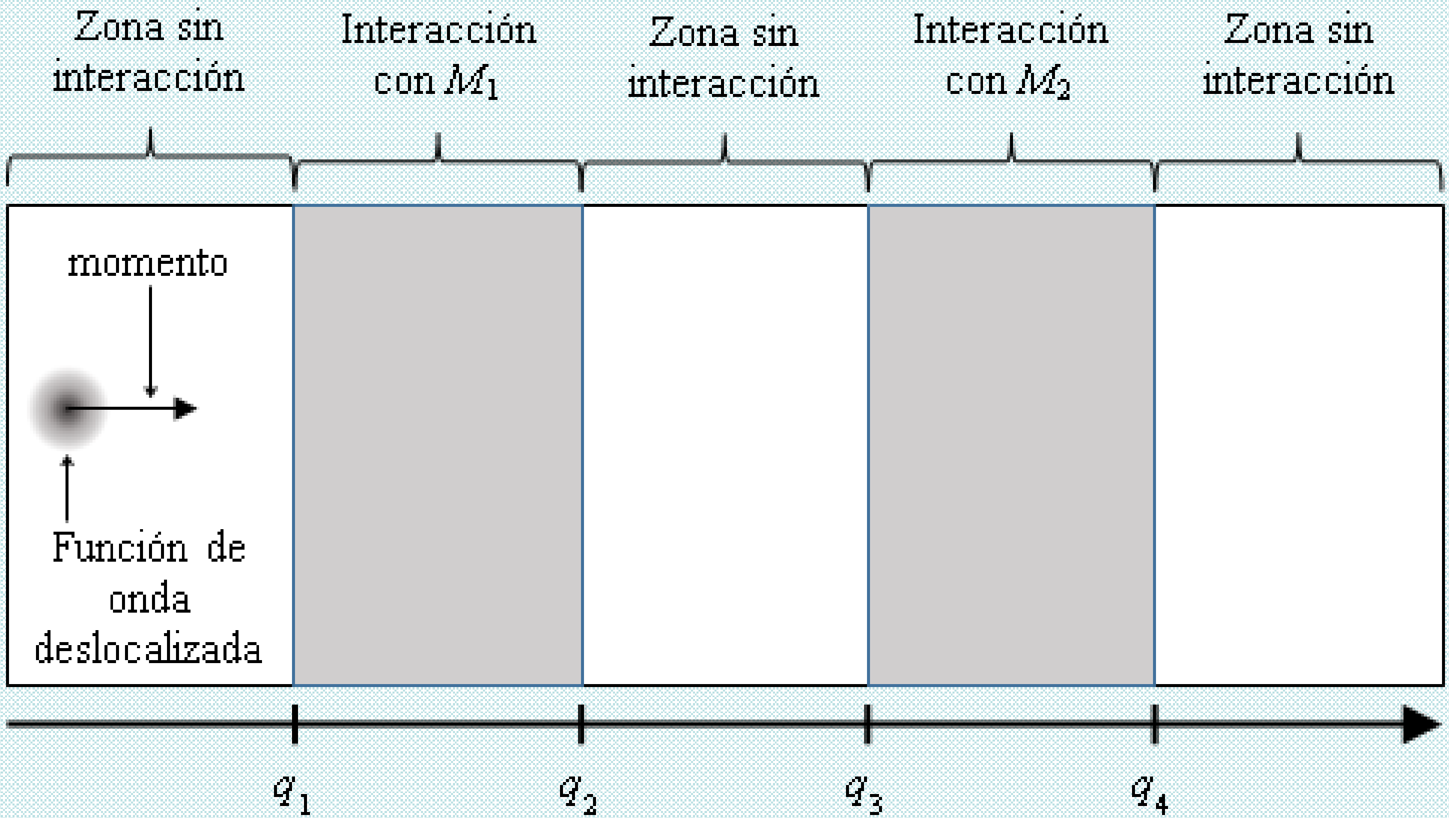
$$H^{\text{int}}_{S-M^1} = \Theta(q, q_1, q_2) H_{S-M^1} \qquad H^{\text{int}}_{S-M^2} = \Theta(q, q_3, q_4) H_{S-M^2}$$

- Donde $\Theta(q, q_1, q_2)$ y $\Theta(q, q_3, q_4)$ son funciones doble escalón:

$$\Theta(q, q_1, q_2) = \begin{cases} 0 & si \quad q < q_1 \\ 1 & si \quad q_1 \le q \le q_2 \\ 0 & si \quad q > q_2 \end{cases} \qquad \Theta(q, q_3, q_4) = \begin{cases} 0 & si \quad q < q_3 \\ 1 & si \quad q_3 \le q \le q_4 \\ 0 & si \quad q > q_4 \end{cases}$$

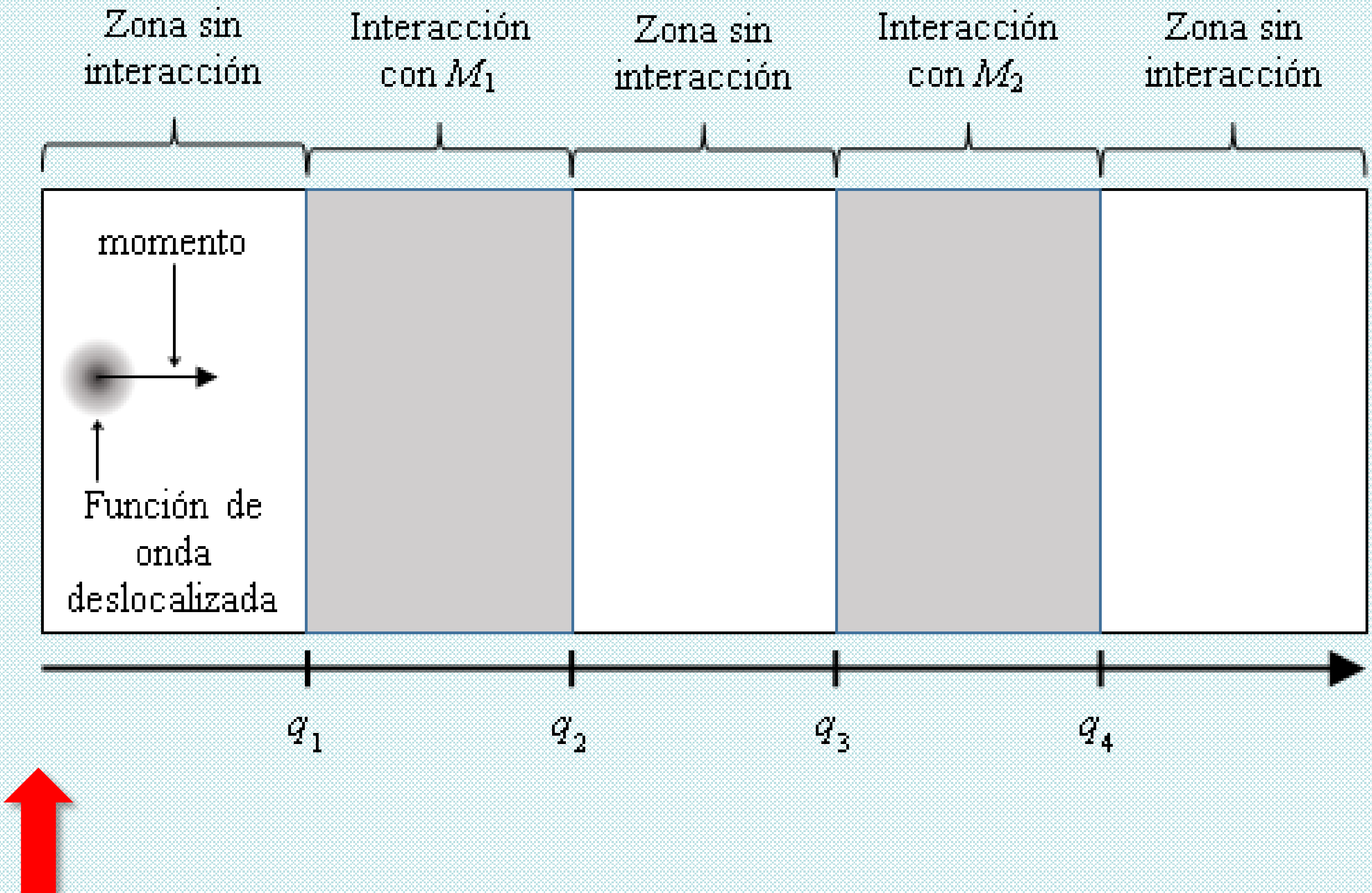
- La variable espacial q está vinculada a la disposición de los elementos del arreglo experimental.

Esquema del arreglo experimental



Condición inicial

Condición inicial



Condición inicial

- El sistema objeto S y los aparatos de medición M^1 y M^2, se constituyen como partes de un sistema total $U^{(I)}:\left(O^{(I)},H^{(I)}\right)$ con estado

$$\left|\Psi^{(I)}\right\rangle=\left(\sum_{i=1}^{n}c_i\left|a_i\right\rangle\right)\otimes\left|p_0^{M^1}\right\rangle\otimes\left|p_0^{M^2}\right\rangle$$

- Y Hamitoniano

$$H^{(I)}=H^S\otimes I^{M^1}\otimes I^{M^2}+I^S\otimes H^{M^1}\otimes I^{M^2}+I^S\otimes I^{M^1}\otimes H^{M^2}$$

- Se produce el evento $\left(H^{(I)}:\omega_\Omega^{(I)},\tau_0\right)$

Condición inicial

- El sistema objeto S y los aparatos de medición M^1 y M^2, se constituyen como partes de un sistema total $U^{(I)}:\left(O^{(I)},H^{(I)}\right)$ con estado

$$\left|\Psi^{(I)}\right\rangle=\left(\sum_{i=1}^{n}c_i\left|a_i\right\rangle\right)\otimes\left|p_0^{M^1}\right\rangle\otimes\left|p_0^{M^2}\right\rangle$$

- Y Hamitoniano

$$H^{(I)}=H^S\otimes I^{M^1}\otimes I^{M^2}+I^S\otimes H^{M^1}\otimes I^{M^2}+I^S\otimes I^{M^1}\otimes H^{M^2}$$

- Se produce el evento $\left(H^{(I)}:\omega_{\Omega}^{(I)},\tau_0\right)$

Condición inicial

- El sistema objeto S y los aparatos de medición M^1 y M^2, se <u>constituyen</u> como partes de un sistema total $U^{(I)}:\left(O^{(I)},H^{(I)}\right)$ con estado

$$\left|\Psi^{(I)}\right\rangle=\left(\sum_{i=1}^{n}c_i\left|a_i\right\rangle\right)\otimes\left|p_0^{M^1}\right\rangle\otimes\underline{\left|p_0^{M^2}\right\rangle}$$

- Y Hamitoniano

$$H^{(I)}=H^S\otimes I^{M^1}\otimes I^{M^2}+I^S\otimes H^{M^1}\otimes I^{M^2}+I^S\otimes I^{M^1}\otimes H^{M^2}$$

- Se produce el evento $\left(H^{(I)}:\omega_\Omega^{(I)},\tau_0\right)$

Condición inicial

- El sistema objeto S y los aparatos de medición M^1 y M^2, se constituyen como partes de un sistema total $U^{(I)}:\left(O^{(I)},H^{(I)}\right)$ con estado

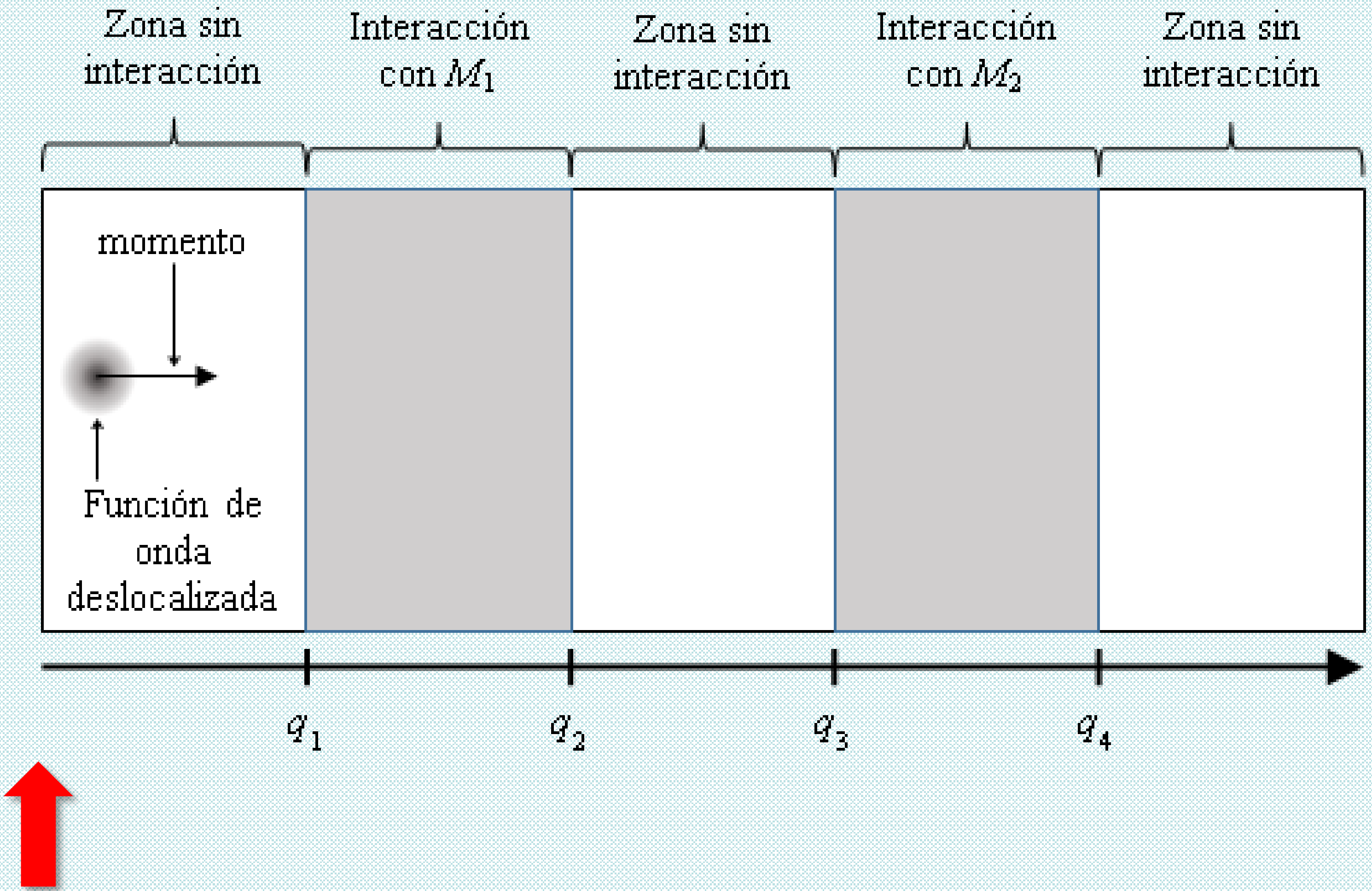
$$\left|\Psi^{(I)}\right\rangle=\left(\sum_{i=1}^{n}c_i\left|a_i\right\rangle\right)\otimes\left|p_0^{M^1}\right\rangle\otimes\left|p_0^{M^2}\right\rangle$$

- Y Hamitoniano

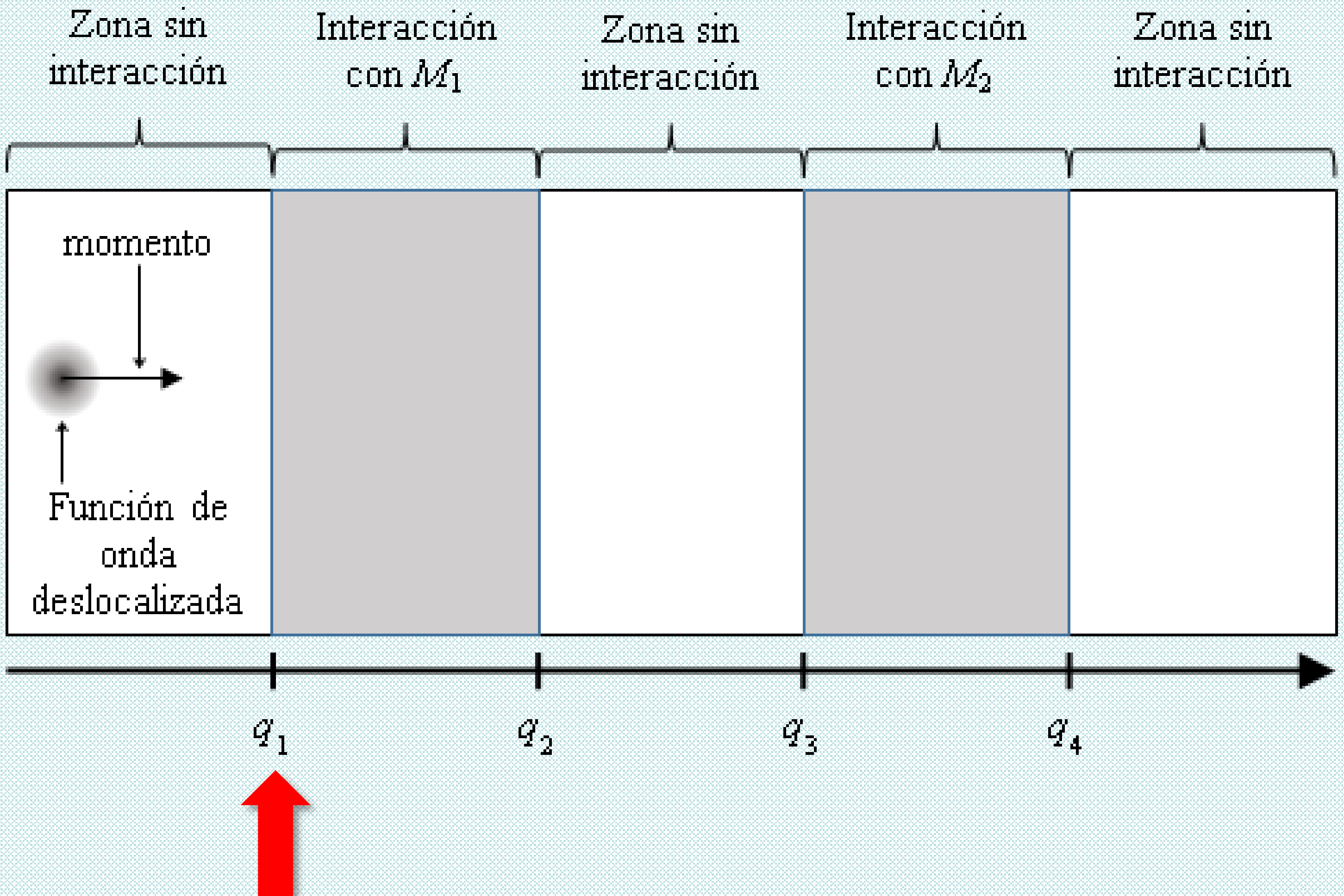
$$H^{(I)}=H^S\otimes I^{M^1}\otimes I^{M^2}+I^S\otimes H^{M^1}\otimes I^{M^2}+I^S\otimes I^{M^1}\otimes H^{M^2}$$

- Se produce el evento $\left(H^{(I)}:\omega_\Omega^{(I)},\tau_0\right)$

Condición inicial



Interacción S - M^1



Interacción S - M^1

- Los sistemas S y M^1 interactúan y forman un sistema elemental. Se constituye un nuevo sistema total $U^{(II)}$, con estado

$$\left|\Psi^{(II)}\right\rangle = \left(\sum_{i=1}^{n} c_i \left|a_i\right\rangle \otimes \left|p_i^{M^1}\right\rangle \right) \otimes \left|p_0^{M^2}\right\rangle$$

- Y Hamitoniano

$$H^{(II)} = H^S \otimes I^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes H^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes I^{M^1} \otimes H^{M^2} + H_{S-M^1}^{\text{int}} \otimes I^{M^2}$$

- Se produce el evento $\left(H^{(II)} : \omega_\Omega^{(II)}, \tau_1 \right)$

Interacción S - M^1

- Los sistemas S y M^1 interactúan y forman un sistema elemental. Se constituye un nuevo sistema total $U^{(II)}$, con estado

$$\left|\Psi^{(II)}\right\rangle = \left(\sum_{i=1}^{n} c_i \left|a_i\right\rangle \otimes \left|p_i^{M^1}\right\rangle\right) \otimes \left|p_0^{M^2}\right\rangle$$

- Y Hamitoniano

$$H^{(II)} = H^S \otimes I^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes H^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes I^{M^1} \otimes H^{M^2} + \underline{H_{S-M^1}^{\text{int}} \otimes I^{M^2}}$$

- Se produce el evento $\left(H^{(II)} : \omega_\Omega^{(II)}, \tau_1\right)$

Interacción S - M^1

- Los sistemas S y M^1 interactúan y forman un sistema elemental. Se constituye un nuevo sistema total $U^{(II)}$, con estado

$$\left|\Psi^{(II)}\right\rangle = \left(\sum_{i=1}^{n} c_i \left|a_i\right\rangle \otimes \left|p_i^{M^1}\right\rangle\right) \otimes \left|p_0^{M^2}\right\rangle$$

- Y Hamitoniano

$$H^{(II)} = H^S \otimes I^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes H^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes I^{M^1} \otimes H^{M^2} + H_{S-M^1}^{\text{int}} \otimes I^{M^2}$$

- Se produce el evento $\left(H^{(II)} : \omega_{\Omega}^{(II)}, \tau_1\right)$

Interacción S - M^1

- Los sistemas S y M^1 interactúan y forman un sistema elemental. Se constituye un nuevo sistema total $U^{(II)}$, con estado

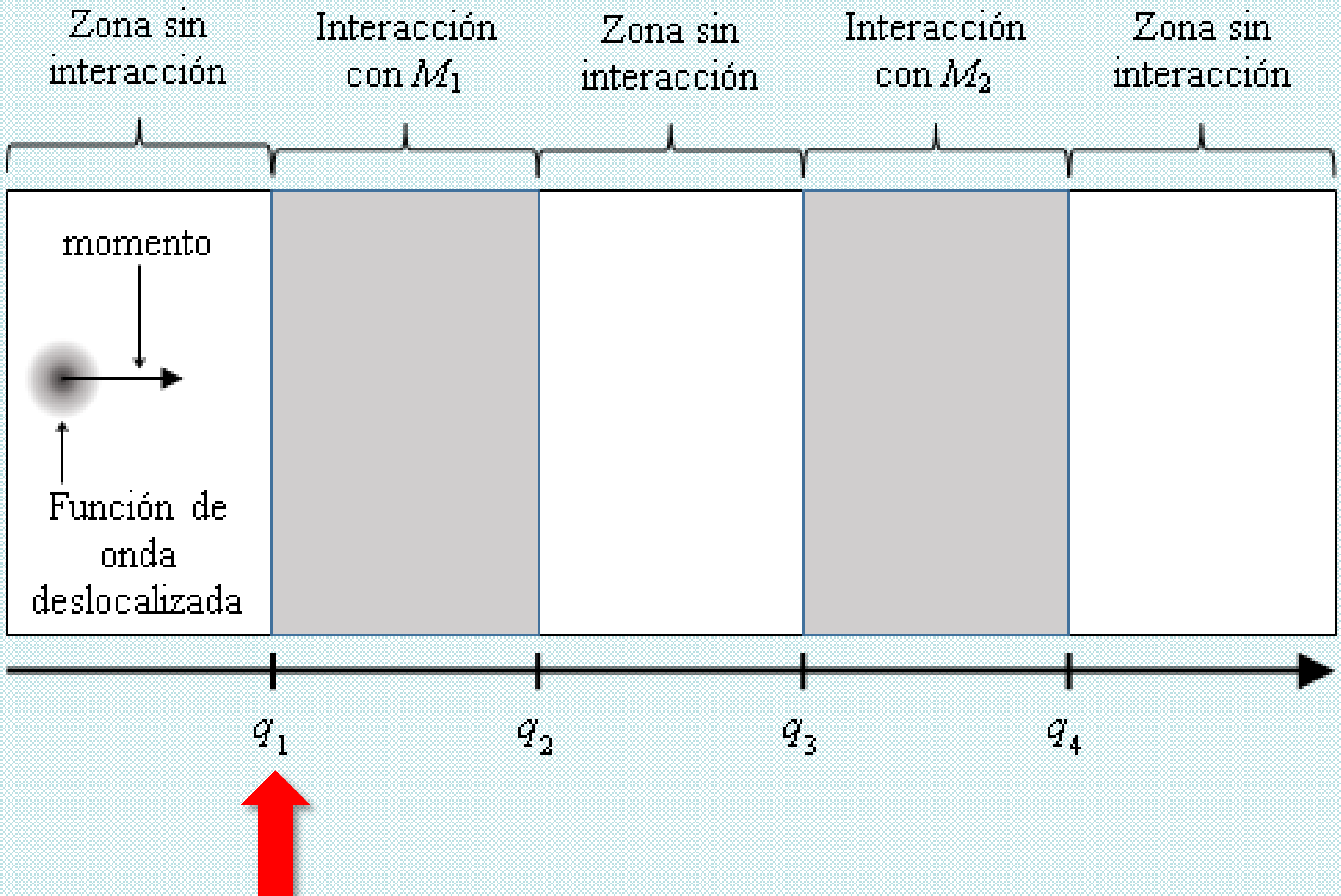
$$\left|\Psi^{(II)}\right\rangle = \left(\sum_{i=1}^{n} c_i \left|a_i\right\rangle \otimes \left|p_i^{M^1}\right\rangle\right) \otimes \left|p_0^{M^2}\right\rangle$$

- Y Hamitoniano

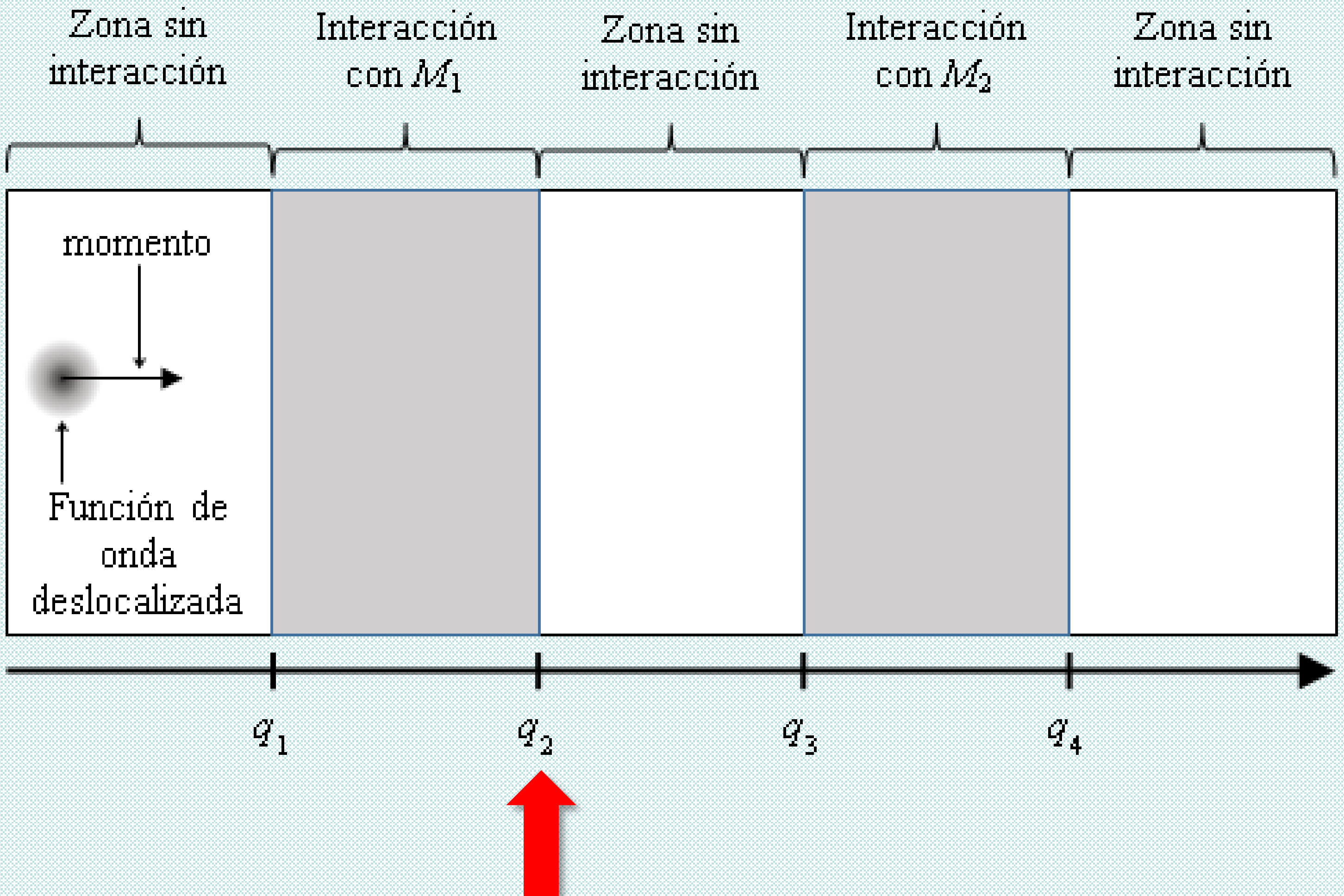
$$H^{(II)} = H^S \otimes I^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes H^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes I^{M^1} \otimes H^{M^2} + H^{\text{int}}_{S-M^1} \otimes I^{M^2}$$

- Se produce el evento $\left(H^{(II)} : \omega_\Omega^{(II)}, \tau_1\right)$

Interacción S - M^1



Lectura de M^1



Lectura de M^1

- Los sistemas S y M^1 dejan de interactuar y se constituye un nuevo sistema total $U^{(III)}$, con estado

$$\left|\Psi^{(III)}\right\rangle = \left|\Psi^{(II)}\right\rangle = \left(\sum_{i=1}^{n} c_i \left|a_i\right\rangle \otimes \left|p_i^{M^1}\right\rangle\right) \otimes \left|p_0^{M^2}\right\rangle$$

- Y Hamitoniano

$$H^{(III)} = H^S \otimes I^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes H^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes I^{M^1} \otimes H^{M^2}$$

- Se producen los eventos $\left(H^{(III)} : \omega_\Omega^{(III)}, \tau_2\right)$ y $\left(P^{M^1} : p_k^{M^1}, \tau_2\right)$

Lectura de M^1

- Los sistemas S y M^1 dejan de interactuar y se constituye un nuevo sistema total $U^{(III)}$, con estado

$$\left|\Psi^{(III)}\right\rangle = \left|\Psi^{(II)}\right\rangle = \left(\sum_{i=1}^{n} c_i \left|a_i\right\rangle \otimes \left|p_i^{M^1}\right\rangle\right) \otimes \left|p_0^{M^2}\right\rangle$$

- Y Hamitoniano

$$H^{(III)} = H^S \otimes I^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes H^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes I^{M^1} \otimes H^{M^2}$$

- Se producen los eventos $\left(\underline{H^{(III)} : \omega_\Omega^{(III)}, \tau_2}\right)$ y $\left(P^{M^1} : p_k^{M^1}, \tau_2\right)$

Lectura de M^1

- Los sistemas S y M^1 dejan de interactuar y se constituye un nuevo sistema total $U^{(III)}$, con estado

$$\left|\Psi^{(III)}\right\rangle = \left|\Psi^{(II)}\right\rangle = \left(\sum_{i=1}^{n} c_i \left|a_i\right\rangle \otimes \left|p_i^{M^1}\right\rangle\right) \otimes \left|p_0^{M^2}\right\rangle$$

- Y Hamitoniano

$$H^{(III)} = H^S \otimes I^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes H^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes I^{M^1} \otimes H^{M^2}$$

- Se producen los eventos $\left(H^{(III)} : \omega_\Omega^{(III)}, \tau_2\right)$ y $\underline{\left(P^{M^1} : p_k^{M^1}, \tau_2\right)}$

Lectura de M^1

- Los sistemas S y M^1 dejan de interactuar y se constituye un nuevo sistema total $U^{(III)}$, con estado

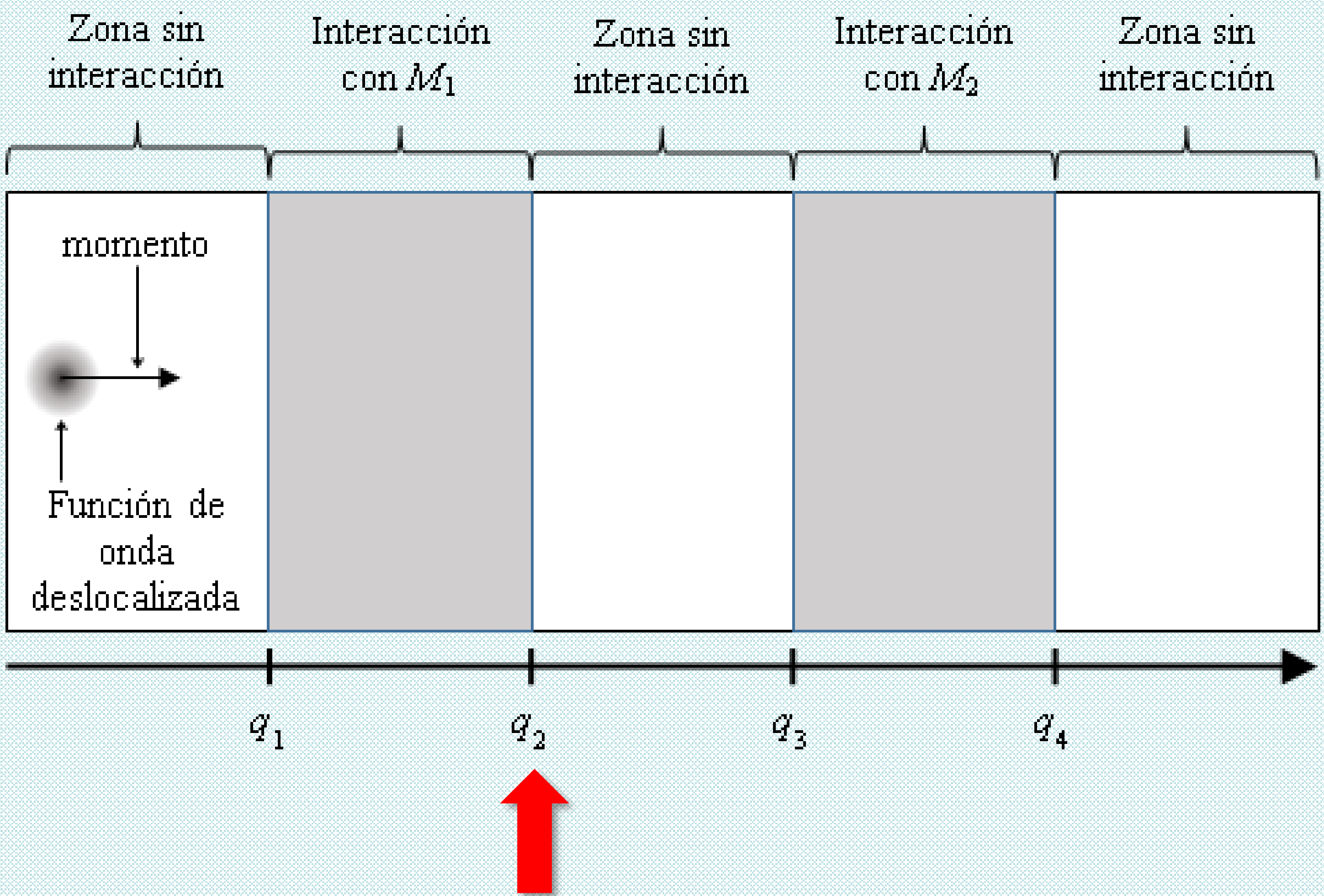
$$\left|\Psi^{(III)}\right\rangle = \left|\Psi^{(II)}\right\rangle = \left(\sum_{i=1}^{n} c_i \left|a_i\right\rangle \otimes \left|p_i^{M^1}\right\rangle \right) \otimes \left|p_0^{M^2}\right\rangle$$

- Y Hamitoniano

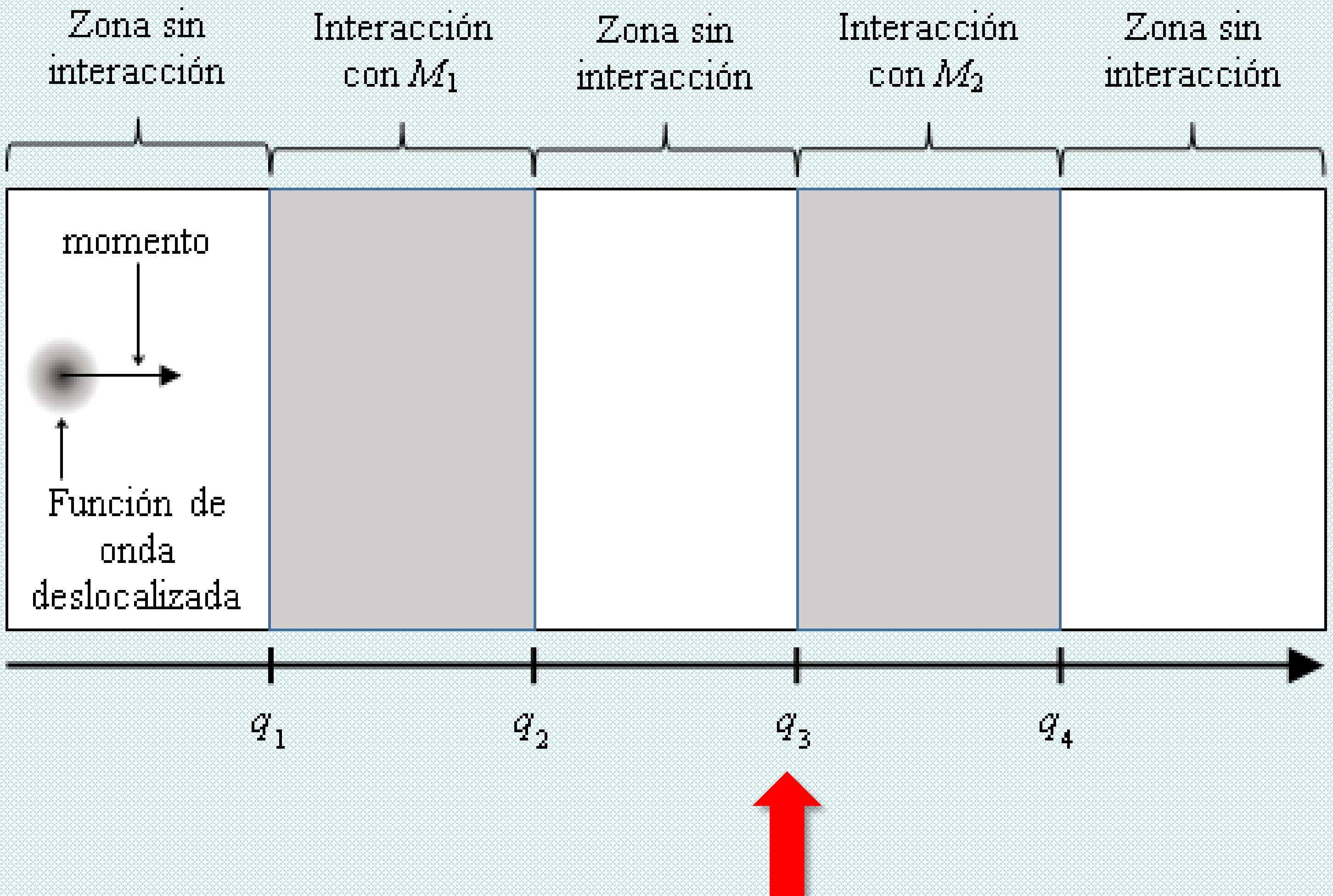
$$H^{(III)} = H^S \otimes I^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes H^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes I^{M^1} \otimes H^{M^2}$$

- Se producen los eventos $\left(H^{(III)} : \omega_{\Omega}^{(III)}, \tau_2\right)$ y $\left(P^{M^1} : p_k^{M^1}, \tau_2\right)$

Lectura de M^1



Interacción S - M^2



Interacción S - M^2

- Los sistemas S y M^2 interactúan y forman un sistema elemental. Se constituye un nuevo sistema total $U^{(IV)}$, con estado

$$\left|\Psi^{(IV)}\right\rangle = \left(\sum_{i=1}^{n} c_i \left|a_i\right\rangle \otimes \left|p_i^{M^1}\right\rangle \otimes \left|p_i^{M^2}\right\rangle \right)$$

- Y Hamitoniano

$$H^{(IV)} = H^S \otimes I^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes H^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes I^{M^1} \otimes H^{M^2} + H^{\text{int}}_{S-M^2} \otimes I^{M^1}$$

- Se produce el evento $\left(H^{(IV)} : \omega_\Omega^{(IV)}, \tau_3 \right)$

Interacción S - M^2

- Los sistemas S y M^2 interactúan y forman un sistema elemental. Se constituye un nuevo sistema total $U^{(IV)}$, con estado

$$\left|\Psi^{(IV)}\right\rangle = \left(\sum_{i=1}^{n} c_i \left| a_i \right\rangle \otimes \left| p_i^{M^1} \right\rangle \otimes \left| p_i^{M^2} \right\rangle \right)$$

- Y Hamitoniano

$$H^{(IV)} = H^S \otimes I^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes H^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes I^{M^1} \otimes H^{M^2} + \underline{H_{S-M^2}^{\text{int}} \otimes I^{M^1}}$$

- Se produce el evento $\left(H^{(IV)} : \omega_{\Omega}^{(IV)}, \tau_3 \right)$

Interacción S - M^2

- Los sistemas S y M^2 interactúan y forman un sistema elemental. Se constituye un nuevo sistema total $U^{(IV)}$, con estado

$$\left|\Psi^{(IV)}\right\rangle = \left(\sum_{i=1}^{n} c_i \left|a_i\right\rangle \otimes \left|p_i^{M^1}\right\rangle \otimes \left|p_i^{M^2}\right\rangle\right)$$

- Y Hamitoniano

$$H^{(IV)} = H^S \otimes I^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes H^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes I^{M^1} \otimes H^{M^2} + H^{\text{int}}_{S-M^2} \otimes I^{M^1}$$

- Se produce el evento $\left(H^{(IV)} : \omega_{\Omega}^{(IV)}, \tau_3\right)$

Interacción S - M^2

- Los sistemas S y M^2 interactúan y forman un sistema elemental. Se constituye un nuevo sistema total $U^{(IV)}$, con estado

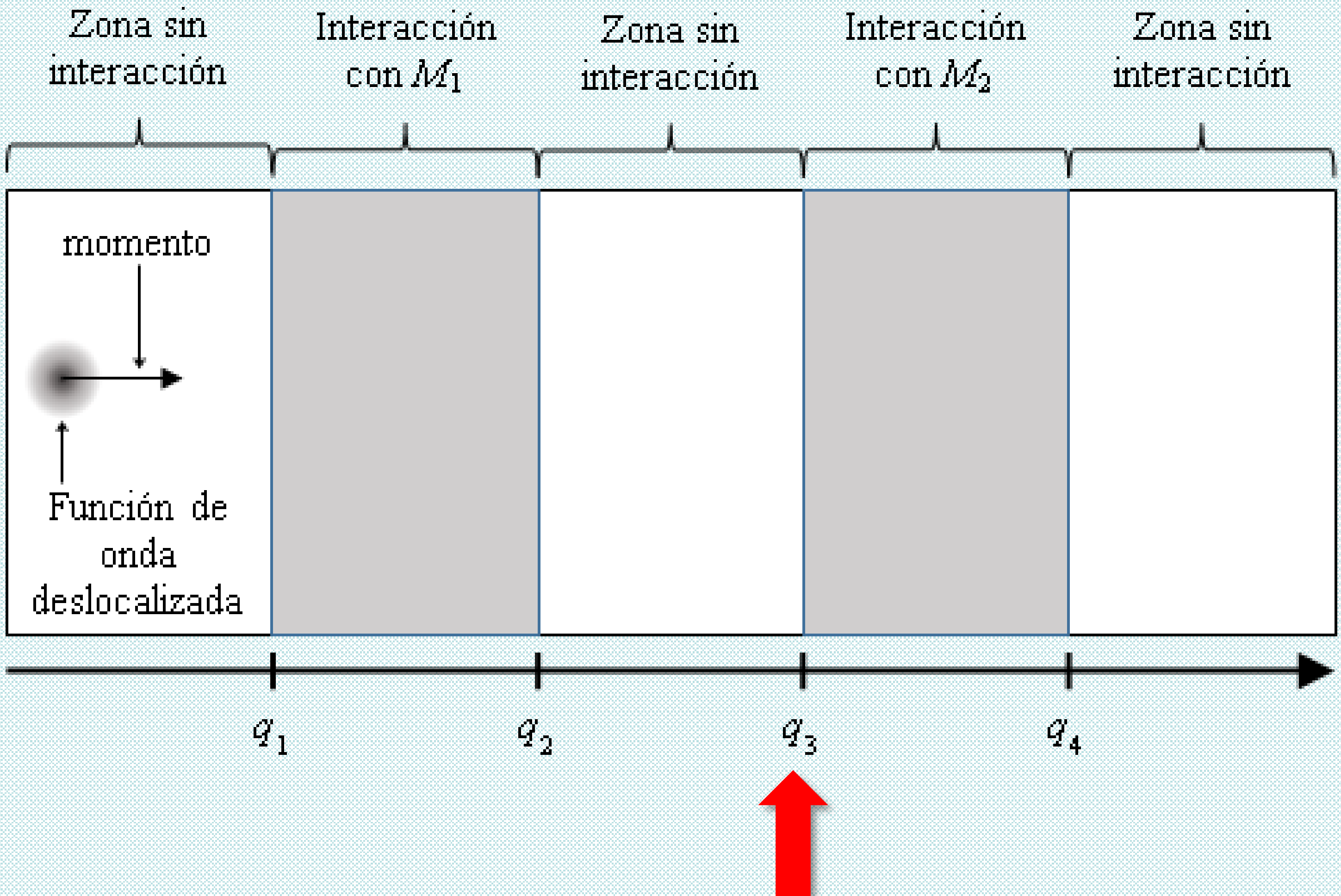
$$\left|\Psi^{(IV)}\right\rangle = \left(\sum_{i=1}^{n} c_i \left| a_i \right\rangle \otimes \left| p_i^{M^1} \right\rangle \otimes \left| p_i^{M^2} \right\rangle \right)$$

- Y Hamitoniano

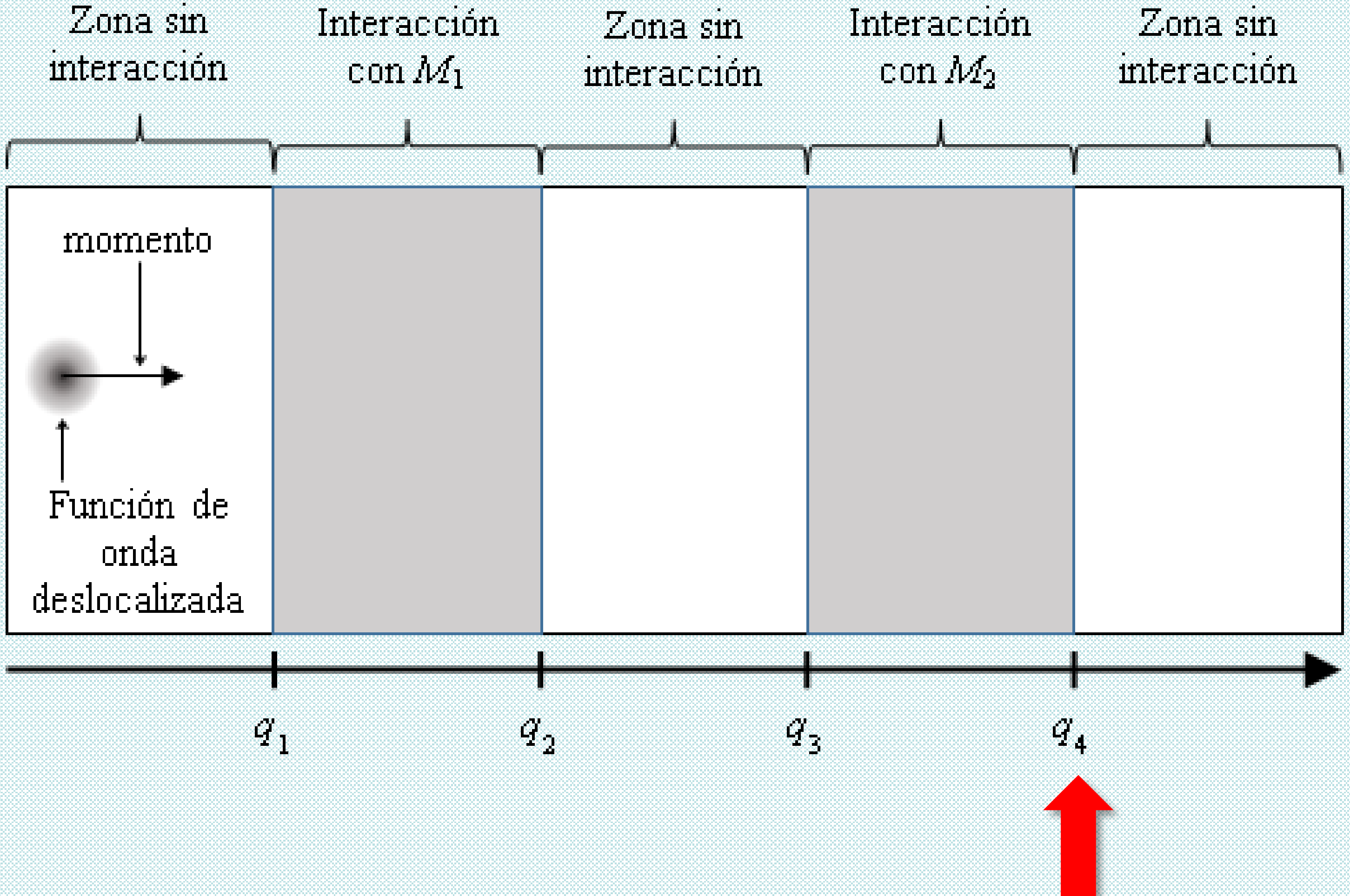
$$H^{(IV)} = H^S \otimes I^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes H^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes I^{M^1} \otimes H^{M^2} + H^{\text{int}}_{S-M^2} \otimes I^{M^1}$$

- Se produce el evento $\left(H^{(IV)} : \omega_\Omega^{(IV)}, \tau_3 \right)$

Interacción S - M^2



Lectura de M^2



Lectura de M^2

- Los sistemas S y M^2 dejan de interactuar y se constituye un nuevo sistema total $U^{(V)}$, con estado

$$\left|\Psi^{(V)}\right\rangle = \left|\Psi^{(IV)}\right\rangle = \left(\sum_{i=1}^{n} c_i \left|a_i\right\rangle \otimes \left|p_i^{M^1}\right\rangle \otimes \left|p_i^{M^2}\right\rangle\right)$$

- Y Hamitoniano

$$H^{(V)} = H^S \otimes I^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes H^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes I^{M^1} \otimes H^{M^2}$$

- Se producen los eventos $\left(H^{(V)} : \omega_\Omega^{(V)}, \tau_4\right)$ y $\left(P^{M^2} : p_k^{M^2}, \tau_4\right)$

Lectura de M^2

- Los sistemas S y M^2 dejan de interactuar y se constituye un nuevo sistema total $U^{(V)}$, con estado

$$\left|\Psi^{(V)}\right\rangle = \left|\Psi^{(IV)}\right\rangle = \left(\sum_{i=1}^{n} c_i \left|a_i\right\rangle \otimes \left|p_i^{M^1}\right\rangle \otimes \left|p_i^{M^2}\right\rangle\right)$$

- Y Hamitoniano

$$H^{(V)} = H^S \otimes I^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes H^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes I^{M^1} \otimes H^{M^2}$$

- Se producen los eventos $\left(H^{(V)} : \omega_\Omega^{(V)}, \tau_4\right)$ y $\left(P^{M^2} : p_k^{M^2}, \tau_4\right)$

Lectura de M^2

- Los sistemas S y M^2 dejan de interactuar y se constituye un nuevo sistema total $U^{(V)}$, con estado

$$\left|\Psi^{(V)}\right\rangle = \left|\Psi^{(IV)}\right\rangle = \left(\sum_{i=1}^{n} c_i \left|a_i\right\rangle \otimes \left|p_i^{M^1}\right\rangle \otimes \left|p_i^{M^2}\right\rangle \right)$$

- Y Hamitoniano

$$H^{(V)} = H^S \otimes I^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes H^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes I^{M^1} \otimes H^{M^2}$$

- Se producen los eventos $\left(H^{(V)} : \omega_\Omega^{(V)}, \tau_4\right)$ y $\underline{\left(P^{M^2} : p_k^{M^2}, \tau_4\right)}$

Lectura de M^2

- Los sistemas S y M^2 dejan de interactuar y se constituye un nuevo sistema total $U^{(V)}$, con estado

$$\left|\Psi^{(V)}\right\rangle = \left|\Psi^{(IV)}\right\rangle = \left(\sum_{i=1}^{n} c_i \left| a_i \right\rangle \otimes \left| p_i^{M^1} \right\rangle \otimes \left| p_i^{M^2} \right\rangle \right)$$

- Y Hamitoniano

$$H^{(V)} = H^S \otimes I^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes H^{M^1} \otimes I^{M^2} + I^S \otimes I^{M^1} \otimes H^{M^2}$$

- Se producen los eventos $\left(H^{(V)} : \omega_\Omega^{(V)}, \tau_4\right)$ y $\left(P^{M^2} : p_k^{M^2}, \tau_4\right)$

4. Reconstrucción secuencial del tiempo de eventos

Constitu-ción del sistema	Evento/s	Tiempo de eventos (τ)	Valor medio de q	Tiempo externo (t)
$U^{(\mathrm{I})}$	$\left(H^{(I)} : \omega_{\Omega}^{(I)}, \tau_0\right)$	τ_0	q_0	t_0
$U^{(\mathrm{II})}$	$\left(H^{(II)} : \omega_{\Omega}^{(II)}, \tau_1\right)$	τ_1	q_1	t_1
$U^{(\mathrm{III})}$	$\left(H^{(III)} : \omega_{\Omega}^{(III)}, \tau_2\right)$ $\left(P^{M^1} : p_k^{M^1}, \tau_2\right)$	τ_2	q_2	t_2
$U^{(\mathrm{IV})}$	$\left(H^{(IV)} : \omega_{\Omega}^{(IV)}, \tau_3\right)$	τ_3	q_3	t_3
$U^{(\mathrm{V})}$	$\left(H^{(V)} : \omega_{\Omega}^{(V)}, \tau_4\right)$ $\left(P^{M^2} : p_k^{M^2}, \tau_4\right)$	τ_4	q_4	t_4

CONTENIDO

1. Tiempo clásico y relacionalismo
2. El tiempo en mecánica cuántica
3. El tiempo en la interpretación modal-Hamiltoniana
4. Reconstrucción secuencial del tiempo de eventos
5. Relatividad del tiempo de eventos respecto de la TPS

5. Relatividad del tiempo de eventos respecto de la TPS

TPS o partición

TPS o partición

- Una TPS (*tensor product structure*) es un modo particular (entre muchos posibles) de particionar el álgebra de observables de un sistema.

TPS o partición

- Una TPS (*tensor product structure*) es un modo particular (entre muchos posibles) de particionar el álgebra de observables de un sistema.

- En las consideraciones anteriores, por ejemplo, utilizamos la siguiente partición del álgebra de observables del sistema total *U*

$$O^{U} = O^{S} \otimes O^{M^1} \otimes O^{M^2}$$

5. Relatividad del tiempo de eventos respecto de la TPS

Constitu-ción del sistema	Evento/s		Tiempo de eventos (τ)	Valor medio de q	Tiempo externo (t)
$U^{(\mathrm{I})}$	$\left(H^{(I)}:\omega_{\Omega}^{(I)},\tau_0\right)$		τ_0	q_0	t_0
$U^{(\mathrm{II})}$	$\left(H^{(II)}:\omega_{\Omega}^{(II)},\tau_1\right)$		τ_1	q_1	t_1
$U^{(\mathrm{III})}$	$\left(H^{(III)}:\omega_{\Omega}^{(III)},\tau_2\right)$	$\left(P^{M^1}:p_k^{M^1},\tau_2\right)$	τ_2	q_2	t_2
$U^{(\mathrm{IV})}$	$\left(H^{(IV)}:\omega_{\Omega}^{(IV)},\tau_3\right)$		τ_3	q_3	t_3
$U^{(\mathrm{V})}$	$\left(H^{(V)}:\omega_{\Omega}^{(V)},\tau_4\right)$	$\left(P^{M^2}:p_k^{M^2},\tau_4\right)$	τ_4	q_4	t_4

5. Relatividad del tiempo de eventos respecto de la TPS

Constitu-ción del sistema	Evento/s		Tiempo de eventos (τ)	Valor medio de q	Tiempo externo (t)
$U^{(\mathrm{I})}$	$\left(H^{(I)}:\omega_{\Omega}^{(I)},\tau_0\right)$		τ_0	q_0	t_0
$U^{(\mathrm{II})}$	$\left(H^{(II)}:\omega_{\Omega}^{(II)},\tau_1\right)$		τ_1	q_1	t_1
$U^{(\mathrm{III})}$	$\left(H^{(III)}:\omega_{\Omega}^{(III)},\tau_2\right)$	$\left(P^{M^1}:p_k^{M^1},\tau_2\right)$	τ_2	q_2	t_2
$U^{(\mathrm{IV})}$	$\left(H^{(IV)}:\omega_{\Omega}^{(IV)},\tau_3\right)$		τ_3	q_3	t_3
$U^{(\mathrm{V})}$	$\left(H^{(V)}:\omega_{\Omega}^{(V)},\tau_4\right)$	$\left(P^{M^2}:p_k^{M^2},\tau_4\right)$	τ_4	q_4	t_4

Distintas configuraciones del sistema total *U*

5. Relatividad del tiempo de eventos respecto de la TPS

Constitu-ción del sistema	Evento/s		Tiempo de eventos (τ)	Valor medio de q	Tiempo externo (t)
$U^{(\mathrm{I})}$	$\left(H^{(I)}:\omega_{\Omega}^{(I)},\tau_0\right)$		τ_0	q_0	t_0
$U^{(\mathrm{II})}$	$\left(H^{(II)}:\omega_{\Omega}^{(II)},\tau_1\right)$		τ_1	q_1	t_1
$U^{(\mathrm{III})}$	$\left(H^{(III)}:\omega_{\Omega}^{(III)},\tau_2\right)$	$\left(P^{M^1}:p_k^{M^1},\tau_2\right)$	τ_2	q_2	t_2
$U^{(\mathrm{IV})}$	$\left(H^{(IV)}:\omega_{\Omega}^{(IV)},\tau_3\right)$		τ_3	q_3	t_3
$U^{(\mathrm{V})}$	$\left(H^{(V)}:\omega_{\Omega}^{(V)},\tau_4\right)$	$\left(P^{M^2}:p_k^{M^2},\tau_4\right)$	τ_4	q_4	t_4

Determinan una secuencia de eventos

5. Relatividad del tiempo de eventos respecto de la TPS

Constitución del sistema	Evento/s		Tiempo de eventos (τ)	Valor medio de q	Tiempo externo (t)
$U^{(\mathrm{I})}$	$\left(H^{(I)}:\omega_{\Omega}^{(I)},\tau_0\right)$		τ_0	q_0	t_0
$U^{(\mathrm{II})}$	$\left(H^{(II)}:\omega_{\Omega}^{(II)},\tau_1\right)$		τ_1	q_1	t_1
$U^{(\mathrm{III})}$	$\left(H^{(III)}:\omega_{\Omega}^{(III)},\tau_2\right)$	$\left(P^{M^1}:p_k^{M^1},\tau_2\right)$	τ_2	q_2	t_2
$U^{(\mathrm{IV})}$	$\left(H^{(IV)}:\omega_{\Omega}^{(IV)},\tau_3\right)$		τ_3	q_3	t_3
$U^{(\mathrm{V})}$	$\left(H^{(V)}:\omega_{\Omega}^{(V)},\tau_4\right)$	$\left(P^{M^2}:p_k^{M^2},\tau_4\right)$	τ_4	q_4	t_4

Depende de la partición de $O^U = O^S \otimes O^{M^1} \otimes O^{M^2}$

5. Relatividad del tiempo de eventos respecto de la TPS

Constitu-ción del sistema	Evento/s		Tiempo de eventos (τ)	Valor medio de q	Tiempo externo (t)
$U^{(\mathrm{I})}$	$\left(H^{(I)} : \omega_{\Omega}^{(I)}, \tau_0\right)$		τ_0	q_0	t_0
$U^{(\mathrm{II})}$	$\left(H^{(II)} : \omega_{\Omega}^{(II)}, \tau_1\right)$		τ_1	q_1	t_1
$U^{(\mathrm{III})}$	$\left(H^{(III)} : \omega_{\Omega}^{(III)}, \tau_2\right)$	$\left(P^{M^1} : p_k^{M^1}, \tau_2\right)$	τ_2	q_2	t_2
$U^{(\mathrm{IV})}$	$\left(H^{(IV)} : \omega_{\Omega}^{(IV)}, \tau_3\right)$		τ_3	q_3	t_3
$U^{(\mathrm{V})}$	$\left(H^{(V)} : \omega_{\Omega}^{(V)}, \tau_4\right)$	$\left(P^{M^2} : p_k^{M^2}, \tau_4\right)$	τ_4	q_4	t_4

Depende de la partición de $O^U = \underline{O^S} \otimes \underline{O^{M^1}} \otimes O^{M^2}$

5. Relatividad del tiempo de eventos respecto de la TPS

Constitución del sistema	Evento/s		Tiempo de eventos (τ)	Valor medio de q	Tiempo externo (t)
$U^{(\mathrm{I})}$	$\left(H^{(I)}:\omega_{\Omega}^{(I)},\tau_0\right)$		τ_0	q_0	t_0
$U^{(\mathrm{II})}$	$\left(H^{(II)}:\omega_{\Omega}^{(II)},\tau_1\right)$		τ_1	q_1	t_1
$U^{(\mathrm{III})}$	$\left(H^{(III)}:\omega_{\Omega}^{(III)},\tau_2\right)$	$\left(P^{M^1}:p_k^{M^1},\tau_2\right)$	τ_2	q_2	t_2
$U^{(\mathrm{IV})}$	$\left(H^{(IV)}:\omega_{\Omega}^{(IV)},\tau_3\right)$		τ_3	q_3	t_3
$U^{(\mathrm{V})}$	$\left(H^{(V)}:\omega_{\Omega}^{(V)},\tau_4\right)$	$\left(P^{M^2}:p_k^{M^2},\tau_4\right)$	τ_4	q_4	t_4

Depende de la partición de $O^U = \underline{O^S} \otimes O^{M^1} \otimes \underline{O^{M^2}}$

TPS o partición

- La interacción y el *entanglement* entre subsistemas depende de la elección de una TPS particular (Harshman y Wickramasekara 2007).

- Si al enfoque basado en TPS añadimos los postulados interpretativos de la MHI, obtenemos que la ocurrencia de eventos, y por tanto, el tiempo de eventos, también depende de una TPS particular.

TPS o partición

- ¿Qué ocurre en el límite en que nuestra TPS no distingue subsistemas en *U*?

TPS o partición

- ¿Qué ocurre en el límite en que nuestra TPS no distingue subsistemas en *U*?

Constitu-ción del sistema	Evento/s	Tiempo de eventos (τ)	Valor medio de q	Tiempo externo (t)
U	$\left(H:\omega_{\Omega},\tau_0\right)$ $\left(P^1:p_k^1,\tau_0\right)$ $\left(P^2:p_k^2,\tau_0\right)$	τ_0	q_0	t_0

TPS o partición

- ¿Qué ocurre en el límite en que nuestra TPS no distingue subsistemas en *U*?

Constitu-ción del sistema	Evento/s	Tiempo de eventos (τ)	Valor medio de q	Tiempo externo (t)
U	$\left(H:\omega_\Omega,\tau_0\right)$ $\left(P^1:p_k^1,\tau_0\right)$ $\left(P^2:p_k^2,\tau_0\right)$	τ_0	q_0	t_0

$$P^1 \in O^U : P^1 = I^S \otimes P^{M^1} \otimes I^{M^2}$$

TPS o partición

- ¿Qué ocurre en el límite en que nuestra TPS no distingue subsistemas en *U*?

Constitu-ción del sistema	Evento/s	Tiempo de eventos (τ)	Valor medio de q	Tiempo externo (t)
U	$\left(H:\omega_\Omega,\tau_0\right)\ \left(P^1:p_k^1,\tau_0\right)\ \left(P^2:p_k^2,\tau_0\right)$	τ_0	q_0	t_0

$$P^2 \in O^U : P^2 = I^S \otimes I^{M^1} \otimes P^{M^2}$$

TPS o partición

- ¿Qué ocurre en el límite en que nuestra TPS no distingue subsistemas en *U*?

Constitu-ción del sistema	Evento/s	Tiempo de eventos (τ)	Valor medio de q	Tiempo externo (t)
U	$\left(H:\omega_{\Omega},\tau_0\right)\left(P^1:p_k^1,\tau_0\right)\left(P^2:p_k^2,\tau_0\right)$	τ_0	q_0	t_0

El sistema *U* tiene naturaleza intemporal, de acuerdo a los postulados de la MHI.

Conclusiones

Conclusiones

- Para un sistema dado es posible reconstruir una secuencia de eventos y definir un tiempo de eventos referenciable en alguna variable dinámica (no necesariamente en el tiempo externo *t*).

- Sin embargo, lo anterior es posible de modo relativo a un TPS elegido. Por tanto, los eventos cuánticos no tienen posición temporal absoluta. La MHI nos ofrece una concepción relacional del tiempo de eventos

- Como consecuencia, si adoptamos una perspectiva holista (si no distinguimos subsistemas) el sistema resulta intemporal (no hay secuencia de eventos).

Referencias

Ardenghi, J. S., Lombardi, O. y Narvaja, M. (2011). “Modal interpretations and consecutive measurements” *EPSA 2011: Perspectives and Foundational Problems in Philosophy of Science*, Lugar: Dordrecht, 207 – 217

Barbour, J. (1982). “Relational Concepts of Space and Time.” *The British Journal for the Philosophy of Science* 33(3): 251-274.

Busch, P. (2008). “The Time–Energy Uncertainty Relation”. In: Muga J., Mayato R.S., Egusquiza Í. (eds) *Time in Quantum Mechanics. Lecture Notes in Physics*, vol 734. Springer, Berlin, Heidelberg.

Earman, J. (2015). “Some Puzzles and Unresolved Issues About Quantum Entanglement.” *Erkenn* 80, 303–337. https://doi.org/10.1007/s10670-014-9627-8

Lombardi, O. y Castagnino, M. (2008). “A modal-Hamiltonian Interpretation of Quantum Mechanics.” *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 39: 380-443

Lombardi, O. y Dieks, D., "Modal Interpretations of Quantum Mechanics", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Spring 2017 Edition)*, Edward N. Zalta (ed.), URL = <https://plato.stanford.edu/archives/spr2017/entries/qm-modal/>.

Pooley, O. y Brown, H. (2002). “Relationalism Rehabilitated? I: Classical Mechanics.” *The British Journal for the Philosophy of Science* 53:2, 183-204

La interpretación modal-Hamiltoniana y la naturaleza relacional del tiempo

Matías Pasqualini – Sebastian Fortin

CONICET
Universidad Nacional de Rosario – Universidad de Buenos Aires

Grupo de Filosofía de la Ciencia - 02 de junio de 2021