

3

2019

PREDICCIÓN


(Simple & HW): FISICA \equiv CIENCIA EXPERIMENTAL

DONDE LAS PREDICCIONES

TEORICAS SON COMPARADAS

CON LOS EXPERIMENTOS

(PAPEL CRUCIAL DE LA MATEMÁTICA)

- 
- DEDUCCIÓN DE FENÓMENOS POR MEDIOS MATEMÁTICOS
 - PREDICCIONES A PARTIR DE RAZONAMIENTOS MATEMÁTICOS



IMPORTANCIA CENTRAL DE LA PALABRA:

PREDICCIÓN

¿SIGNIFICADO EVIDENTE? NO

CAMBIÓ EN EL PASADO Y ESTÁ CAMBIANDO

ORIGENES (MECÁNICA CLÁSICA)

- ESTADO DE UN SISTEMA } $X(t)$: VECTOR DE
AL TIEMPO t } N COMPONENTES

[PARTÍCULA PUNTUAL $X(t) \equiv \{\vec{x}(t), \vec{v}(t)\}$]

- EXPERIENCIA : DETERMINAR O IMPONER \vec{x} y \vec{v}
A UN SADO t Y MEDIR A UN
TIEMPO POSTERIOR $t + \Delta t$

CRUCIAL: PODER REALIZAR LA EXPERIENCIA
MUCHAS VECES CON LAS MISMAS
CONDICIONES INICIALES

SI Δt ES FIJO \rightarrow EL SISTEMA ESTARA
SIEMPRE EN EL MISMO
ESTADO FINAL!

PRINCIPAL
TECNICO: PREDICIR ESE RESULTADO UNICO

¿Cómo?

UTILIZANDO LAS ECUACIONES DE
MOVIMIENTO QUE DESCRIBEN LA
EVOLUCION DE $X(t)$

MECANICA CLASICA:

$$\vec{F} = m \vec{a}$$

DADO \vec{F}



PROBLEMA MATEMATICO BIEN
PUESTO!





EXTENSION A SISTEMAS MAS COMPLICADOS

(MAS LONJITUDES Y VELOCIDADES)

EN GENERAL A TRAVES DE

$$\frac{dx}{dt} = G(x(t))$$

DADO $G(x)$ (POR LA "TEORIA") SE CALCULA

X A UN TIEMPO FINAL Y SE COMPARA

CON LA EXPERIENCIA

LAS DIFFICULTADES MATEMÁTICAS PUEDEN
SER SUSTANCIALES (AUN EN UN SISTEMA DE
TRES CUERPOS !)

LAPLACE DIXIT : "UN MATEMÁTICO "∞ MENTE"
INTELIGENTE SERÍA CAPAZ DE PREDECIR
EL FUTURO EXACTAMENTE OBSERVANDO EL
ESTADO DEL UNIVERSO Y PONIENDO EN
JUEGO SU CONOCIMIENTO DE LAS LEYES
DE MOVIMIENTO"



PUNTO DE VISTA CLASICO - DETERMINISTA



PREDICCION



SENTIDO BIEN CLARO

- NO somos "COMENTE" INTELIGENTES
- NO DISPONEMOS DEL EXPERIMENTO PARA MEDIR EL ESTADO CON TOTAL PRECISION



- NEWTON-LAPLACE : DE APLICAR SOLO A UN CONJUNTO PEQUEÑO DE FENOMENOS



"CAMBIO DE FILOSOFIA"



(INTRODUCIR)

PREDICCIONES PROBABILÍSTICAS



(REVOLUCIONES !)

- MECANICA ESTADISTICA
- MECANICA CUANTICA
- SISTEMAS COMPLEJOS

EL SENTIDO DE LA PALMILA PREDICION

SE DEBILITA !

MECANICA CUANTICA

AQUI COMIENZA LA DIFERENCIACION
("DIFICULTADES") DE LA FÍSICA DEL
ATOMO \equiv MECANICA CUANTICA

LOS CONCEPTOS DE OBSERVACION
Y COINCIDENCIA ESPACIO-TEMPORAL
REQUIEREN REVISION



INTERACCION OBSERVADOR - OBJETO



CAUSA CAMBIOS INCONTROLABLES Y

GRANDES (DETECTABLES) EN EL SISTEMA

BAJO CONSIDERACION (DEBIDO A LOS

CAMBIOS DISCONTINUOS CARACTERISTICOS

DE LOS PROCESOS ATOMICOS)

(SALTOS CUANTICOS)

MEHA UNA MAGNITUD TORNA IWSOMO
EL CONOCIMIENTO DE OTRAS

* CUANTITATIVAMENTE :

EN MUCHOS CASOS ES IMPOSIBLE OBTENER
UNA DETERMINACION EXACTA DE LOS
VALORES SIMULTANEOS DE DOS VARIABLES

(IMPOSIBLE PRECISION TOTAL EN SU
CONOCIMIENTO SIMULTANEO)





$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{h}{2}$$

LIMITE EN LA PRECISION \equiv

LEY DE LA NATURALEZA

RELACIONES DE INCERTEZA

EQUIVALENTE A LA LEY DE LA NATURALEZA:

" NO EXISTE VELOCIDAD DE SEÑAL MAYOR
A LA VELOCIDAD DE LA LUZ (C) "

DUALIDAD ONDA - PARTICULA

EL OBSERVADOR

- * Física clásica → " DIVISIBILIDAD " DE
LOS PROCESOS COMPUTACIONALES
(SUCECIÓN DE PROCESOS PARALELOS)
(TRAYECTORIA)
- ONDA: MOVIMIENTO ORBITAL
CONTINUO EN TODA UNA
REGION DEL ESPACIO]

* FISICA CUANTICA → NO DIVISIBILIDAD

$$\lambda \sim \frac{1}{E}$$

$$c = \lambda \cdot \nu$$

$$E = h \cdot \nu$$

"GRANUJIDAD" DE LA LUZ
PARA VER DETALLES NECESITAMOS
LUZ ALMOHADA (LONGITUD
DE ONDA DEL TAMAÑO DEL
ATOMO → FRECUENCIA
ALTA)

↓
CAMBIA EL ESTADO DEL
ATOMO

LUZ COMO EL ELECTRON "DESTROYE" EL
OBJETO DE OBSERVACION

→ HAYAL DE PROBABILIDADES!

● Física Clásica → HOMBRE "SUPERFLUO"
AL UNIVERSO

● Física Cuántica → HOMBRE "ESENCIAL"

OBSERVADOR DEL EXPERIMENTO
IMPLICADO PARA LA
FÍSICA



— PAPEL DEL "HOMBRE" EN EL COSMOS
POTENCIADO POR EL ATOMO... —

↓
* INTERPRETACION PROBABILISTICA

DE LA MECANICA CUANTICA *

~~TRAYECTORIA~~



PROBABILIDAD DE
PRESENCIA EN UN
DADO PUNTO

$|\psi(x)|^2$

ECUACION DE SCHRÖDINGER (PARTICULA LIBRE)

* $\frac{1}{2} \left(\frac{\hbar}{i} \right)^2 \nabla^2 \psi(\vec{r}, t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{r}, t) \cdot$

* SI (?) ESTADO FÍSICO



ELIMINACION DE TODA PERTURBACION



(MECANICA CUANTICA)

IMPOSIBLE CUALQUIER OBSERVACION



* OBSEVACION \equiv INTERACCION CON
AGENTES DE MEDIDA

(NO PERTENECIENTES AL SISTEMA)

↓

{ IMPOSIBLE DEFINIR AL SISTEMA }

SIN AMBIGÜEDADES }

- ↑
- TRASPASANDO LA INTERPRETACION PROBABILISTICA •

" NO SE PUEDE ABOGAR UNA REALIDAD INDEPENDIENTE NI A LOS FENOMENOS NI A LOS AGENTES DE OBSERVACION "

(N. Bohr)

MUCHAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS
SISTEMAS ATÓMICOS NO EXISTEN
ANTES DEL ACTO DE OBSERVACION



* PRINCIPIO DE INCERTeza

NO ES POSIBLE DETERMINAR SIMULTANEAMENTE
REALIDAD FÍSICA INDEPENDIENTE Δ
TODAS LAS PROPIEDADES QUE UN
ELECTRON PUEDA TENER

$$\Delta x \Delta p_x \sim h$$

↓
* ESTADOS DEL ATOMO (ESTADOS CUANTICOS)
EXISTEN EN CUANTO NO SON "ATACADOS"
POR MEDIOS PENETRANTES DE
OBSERVACION

- ESTADO CUANTICO ES AJUSTADO POR EL ATOMO SI SE LO DEJA SOLO ...

SI SE TRATA DE MEDIR LA POSICION DE UN ELECTRON (CON MEDIOS PENETRANTES \equiv $h\nu$) \rightarrow SE DESTRUYE EL ESTADO CUANTICO

CERTAMENTE SE ENCONTRARA AL
ELECTRON EN ALGUNA PARTE
PERO ESE LUGAR NO ES PREDICIBLE

PROBABILIDAD



POSICION ES UN CONCEPTO CLASICO

* RESULTADO DE MEDIDAS TAMBIEN CLASICO *
(POSICION, VELOCIDAD, ENERGIA,...)



TO DO LO QUE PUEDE PREDICARSE
SON PROBABILIDADES

✿ CIENTAS ALEVENACIONES SOBRE EL ATOMO
DEBEN SER PROBABILISTICAS

● PORQUE LOS CONCEPTOS CLASICOS ^(DETERMINISTAS) NO
SON APLICADOS EN UN ESTADO CUANTICO



* FONDA LOS CONCEPTOS CLASICOS AL
ATONO → **PROBABILIDAD COMO
RESPUESTA**

• "A PREGUNTAS TONTAS, RESPUESTAS TONTAS"



• "Δ PREGUNTAS INAPROPIADAS (Δ ESCALA ATONICA)
RESPUESTAS PROBABILISTICAS"

DEFINIDA POR LAS RELACIONES DE INCERTeza

COORDENADA Y VELOCIDAD
NO PUEDEN MEDIRSE CON
EXACTITUD SIMULTANEAMENTE

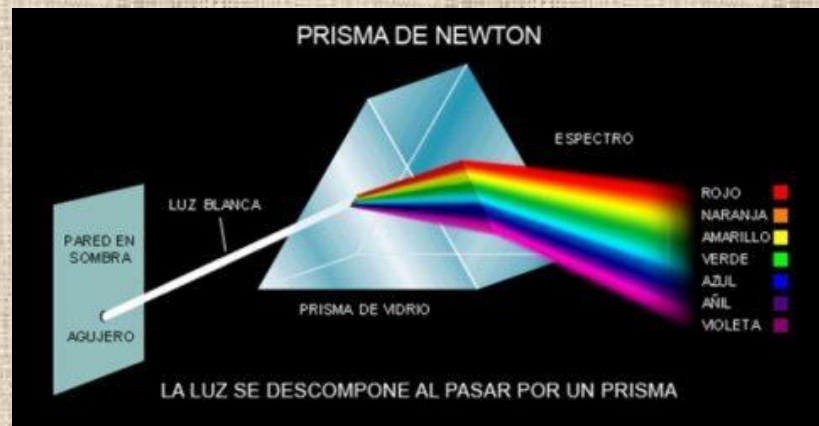
PRIO. DE INCERTeza

↓
MENOR NUMERO DE VARIABLES ⇒ PROBABILIDADES

ESPECTROS

- NEWTON: LUZ DEL SOL A TRAVÉS DE UN PRISMA → ESPECTRO

(COLORES DIFERENTES → DIFERENTE DISPERSION)



- LUZ BLANCA ANTES DEL PRISMA POR UN GAS → ESPECTRO CON LINEAS OSCURAS
ABSORCION

— UBICACION DE LAS LINEAS: UNICA PARA
CADA ELEMENTO

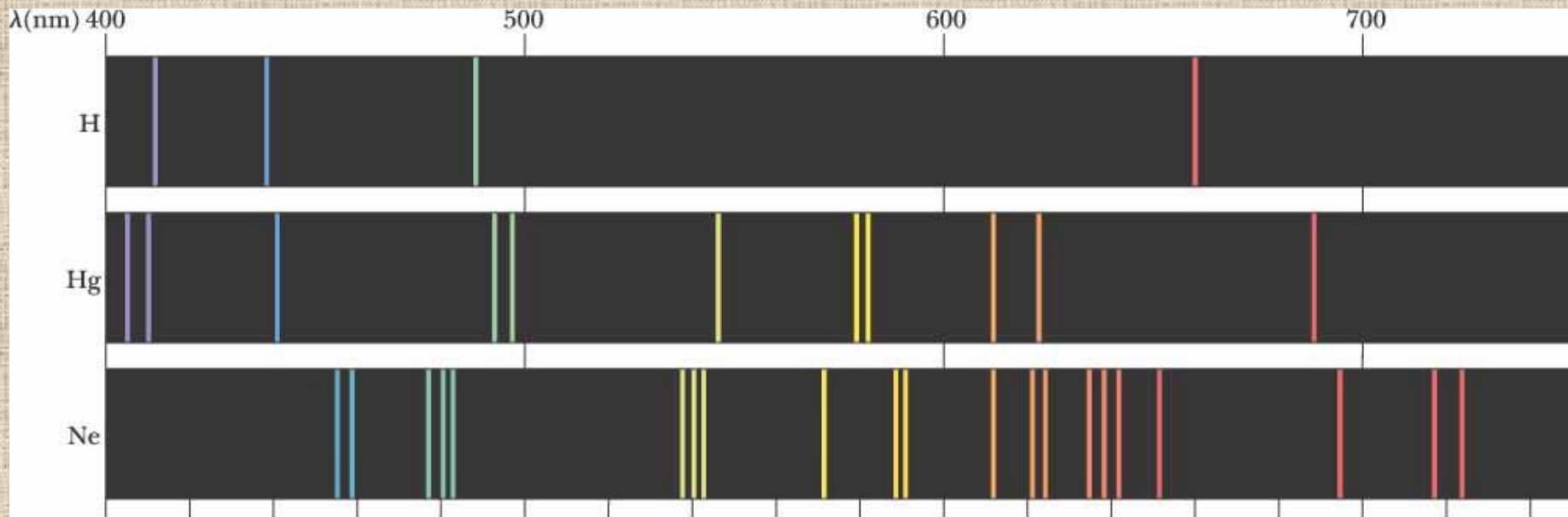


* LINEAS DE ABSORCION \equiv "IMPRESION DIGITAL".

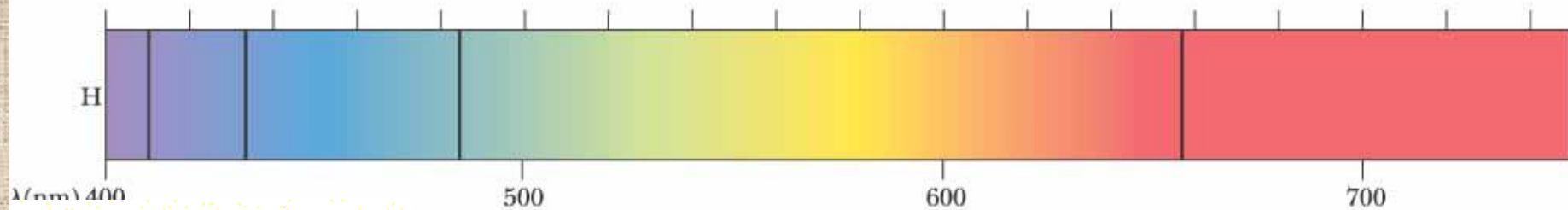


- ATOMOS EXCITADOS (CAENTADOS)
EMITEN Y PRODUCEN LINEAS BRILLANTES
EMISION

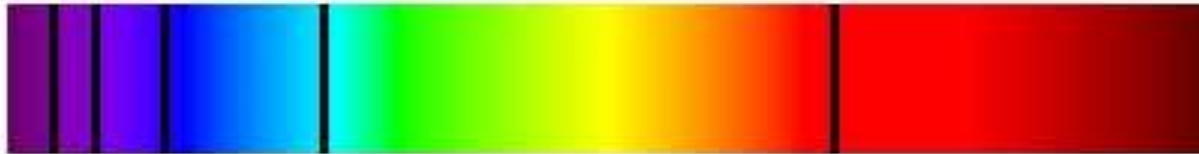
ESPECTROS



(a)



Hydrogen Absorption Spectrum



Hydrogen Emission Spectrum



● RADIACION DE CUERPO NEGRO

● EFECTO FOTOELECTRICO



CUANTOS

- RADIACION EMITIDA EN "PAQUETES"
- RADIACION TRANSPORTA ENERGIA EN "PAQUETES"

"PAQUETES" \equiv FOTONES

(PROYECTILES DE LUZ)

● ENERGIA (FOTON) = $h f$ $E = h \cdot \nu$

CONSTANTE DE
PLANCK

FRECUENCIA
DE LA
RADIACION
(DE LA WZ)

— $h = 6,626 \times 10^{-34}$ Joule . seg —

MODELO DEL ATOMO

EL MAS SIMPLE : H (HIDROGENO)
(1e + 1p)

- BOHR : e ALREDEDOR DE p
COMO
PLANETA ALREDEDOR DEL SOL

- LUZ SOBRE EL ATOMO AFECTA e

$$(m_e = \frac{1}{1836} m_p)$$

(FOTON CHOCA e)

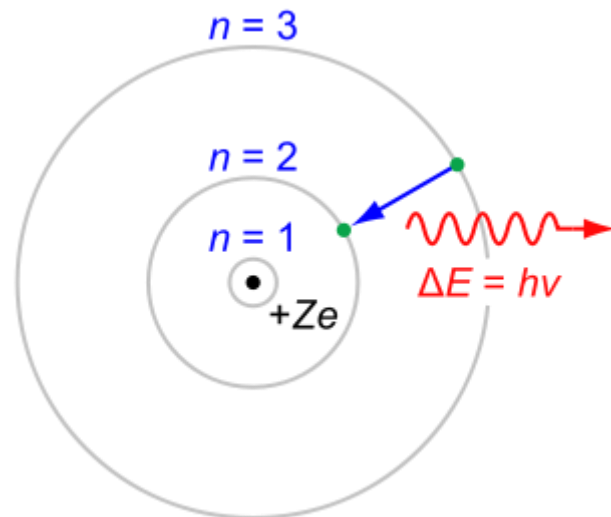
→ e SE ALEJA DE p (ABSORBE hf)
(SE EXCITA)



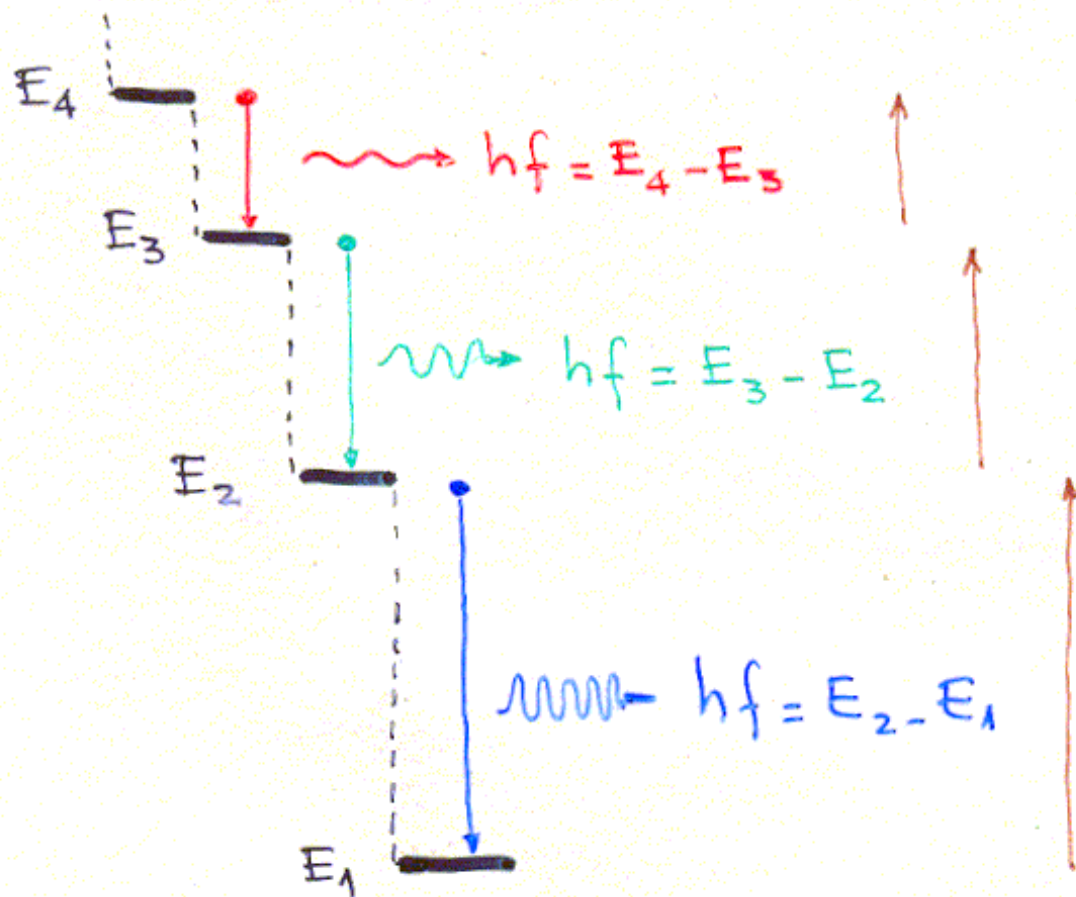
e VUELVE A "SU LUGAR" (EMITE hf)

SALTOS CUANTIFICADOS

hf



NIVELES DE ENERGIA



➔ ESPECTROS

RESULTADO DE LAS TRANSICIONES

- RESULTADOS CORRECTOS A PALTIL DE HIPOTESIS INCORRECTAS !

MECANICA CUANTICA

- EINSTEIN : LUZ ACTUA ONDULATORIA
A VECES

LUZ ACTUA COMO PARTICULAS
A VECES (FOTONES)

- DE BROGLIE : PARTICULAS (e, p)
PUEDEN "ACTUAR" COMO
ONDAS ($\lambda = h/mv$)



DIFRACCION DE ELECTRONES



SIMETRIA



ECUACION PARA LAS ONDAS DE MATERIA

SCHRÖDINGER

MECANICA ONDULATORIA

- ONDAS DE MATERIA LIGADAS A
PROBABILIDAD DE PRESENCIA
INCERTEZA

* FISICA SIGLO XIX :

- COMPORTAMIENTO ONDULATORIO DE LA LUZ (RADIACION ELECTROMAGNETICA)

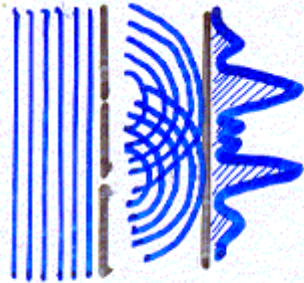
(II)

- COMPORTAMIENTO COMPUSCULAR DE LOS OBJETOS MATERIALES

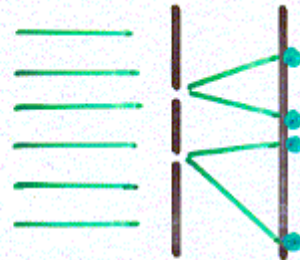


EVOLUCION TEMPORAL :

- CONTINUA PARA LA ONDA
- DISCRETA PARA LA PARTICULA



INTERFERENCIA



EVENTOS INDIVIDUALES

* FISICA SIGLO XX :

* MECANICA CUANTICA

DUALISMO ONDA - PARTICULA

NO DICOTOMIZA EL UNIVERSO

DE ENTIDADES FISICAS →

CUALQUIER ENTIDAD LOS PRESENTA

EN DIFERENTES SITUACIONES



CUALQUIER ENTIDAD : LUZ (RADIACION)

O ELECTRONES (MATERIA) TIENE

COMPORTAMIENTO DE ONDA (EN LA

PROPAGACION) Y COMPORTAMIENTO

DE PARTICULA (EN SU DETECCION)

DETECCION DE 1 EVENTO: TIPO INDIVIDUAL
(Luz o ELECTRON)

DISTRIBUCION (ESTADISTICA): TIPO INTERFERENCIA

~~X~~ AMBAS IMAGENES INCOMPLETAS!



TIENEN VALDEZ DE ANALOGIA:
CIENTAS EN CASOS LIMITE



{ MANTENIDA PORQUE EN NUESTRO
Lenguaje NO HAY PALABRAS }

* LENGUAJE INVENTADO PARA LO COTIDIANO

(NÚMERO INTENSO DE ÁTOMOS)

PALABRAS → IMÁGENES MENTALES
(EXPERIENCIA COTIDIANA)



} MUY DIFÍCIL MODIFICAR EL LENGUAJE
PARA DESCRIBIR PROCESOS ATÓMICOS }

MATEMÁTICA SIN LIMITACIONES →

TEORÍA CUÁNTICA ADECUADA PARA
EL TRATAMIENTO DE PROCESOS ATÓMICOS

FENOMENOLOGIA

* POR QUÉ?

1) SOLIDO AL CALENTAMIENTO PASA POR
ROJO - AMARILLO - BLANCO

CALOR \Rightarrow MOVIMIENTO \Rightarrow VIBRACIONES
(ATOMOS)
 \downarrow
LUZ

PERO LUZ CUANTIFICADA EN "PAQUETES"
("PARTICULAS") hf

SI LA ENERGIA TERMICA NO ALCANZA
A PRODUCIR UN "CUANTO" DE LUZ ROJA

\Rightarrow NO SE ILUMINA

(SIEMPRE A TEMPERATURA AUMENTANTE NO BRILLA)

T CRECE \Rightarrow SE ALCANZA E VISIBLE

$hf_{\text{rojo}} < hf_{\text{amarillo}} < hf_{\text{blanco}}$
(AZUL)

● 2) ATOMOS ESTABLES Y ESPECIFICOS

(ELECTRONES "ONDAS")

↗
ONDAS CONFINADAS

DE PROBABILIDAD

— ONDAS RESTRICTAS A UNA REGION ESPACIAL



SOLO ALGUNAS POSIBILIDADES

● CUERDA DE VIOLIN (DOS EXTREMOS FIJOS)

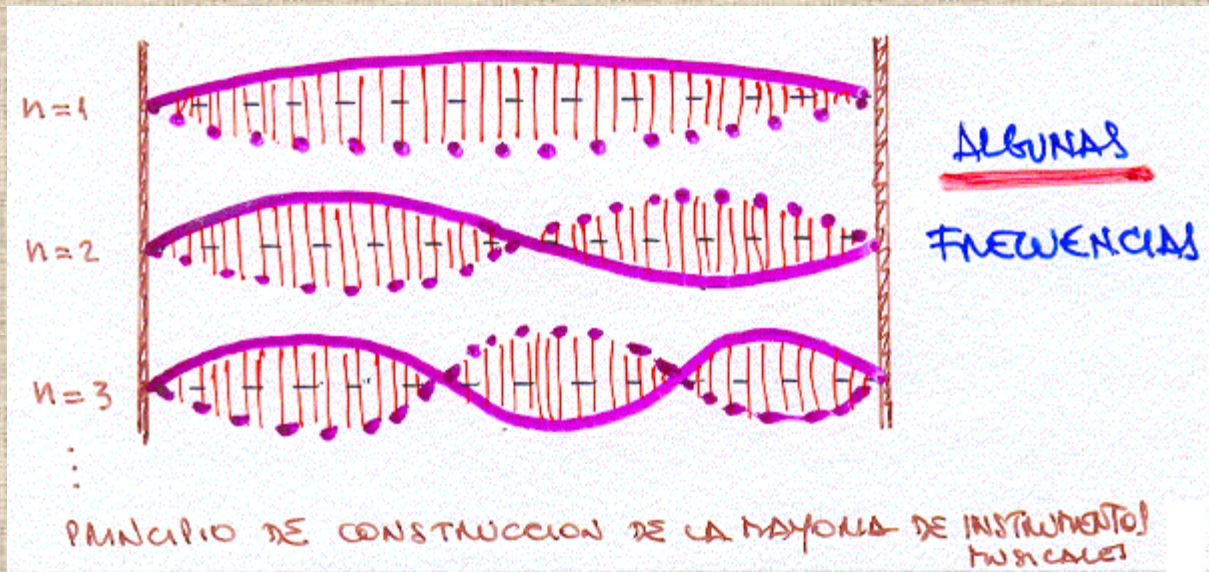
SOLO MANTIENE VIBRACIONES CUYA

* $\frac{\text{LONGITUD DE ONDA}}{2} = \underline{n} \times \text{LONGITUD}$

($n = 1, 2, 3, \dots$)

$$\ast \frac{\text{LONGITUD DE ONDA}}{2} = \underline{n} \times \text{LONGITUD}$$

($n = 1, 2, 3, \dots$)



↓

"ONDAS" ELECTRON CONFINADAS EN UN ATOMO

— (NUCLEO ATRAE LOS ELECTRONES Y LOS MANTIENE EN SU ENTORNO) —



ELECTRONES EN UNA SERIE DE VIBRACIONES DIFERENTES CLASIFICADAS POR LA FRECUENCIA → $(E = hf)$
CLASIFICADAS POR LA ENERGIA

↓
NIVELES DE ENERGIA

↓
ESPECTROS

$(E_2 - E_1 = hf_2 - hf_1)$

* EL ELECTRON SOLO PUEDE VIBRAR EN ALGUNAS FRECUENCIAS: FORMAS PRIMARIAS



* ESTABILIDAD NO HAY CAMBIO A MENOS
QUE CHOQUES O PERTURBACIONES ENTREGUEN
SUFICIENTE ENERGIA PARA CAMBIAR DE
MODO DE VIBRACION
(TEMPERATURA ALZANTE EN GENERAL
NO ALCANZA)

- PERTURBACION → CAMBIO DE FRECUENCIA
(DE ESTADO)
- CESA PERTURBACION → VUELTA A LA SITUACION
ORIGINAL
(SACA LA PRESION DEL DEDO EN LA CUERDA)

● 3) VARIEDAD DE ELEMENTOS

PRINCIPIO DE PAULI: NO MAS DE DOS
ELECTRONES PUEDEN VIAJAR DE LA
MISMA MANERA (UNO CON UN SPIN Y OTRO
CON EL OPUESTO)



LEY DE "LLENADO" DE LOS ATOMOS
TABLA DE MENDELEEV

EJ

≠

NEON (10 ELECTRONES)

Ne

SODIO (11 ELECTRONES)

Na

Ne: (PAUU →) 5 MODOS DE VIBRACION



FORMA ESFERICA

(QUIMICAMENTE INACTIVO)

(GAS NOBLE)

Na: 11 avo. VIBRA DIFERENTE

ELECTRON DESLIZADO → ACTIVO

(SANTA FACIL A OTROS ATOMOS)



CANTIDAD DETERMINA CALIDAD

EJ

PLUTONIO (Pu)

(94 ELECTRONES)

(NO EXISTE EN LA NATURALEZA)

(RADIOACTIVO)

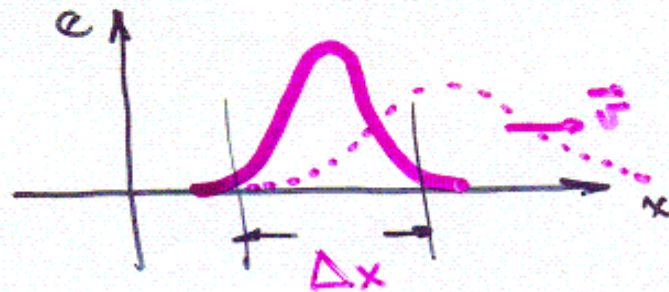
(CUANDO CREADO: MUY POCO \Rightarrow DIFÍCIL DETERMINAR PROPIEDADES)

DENSA SÍM: METAL, $\rho = 20 \text{ g/cm}^3$, HALLOW ... Y LO FUE

POSICION DEL ELECTRON (EN EL INSTANTE t)

CONOCIDA CON PRECISION Δx →

VISUALIZABLE COMO "PAQUETE DE ONDAS"
("PULSO")
DE EXTENSION Δx



SE DISTORCIONA AL MOVERSE !

* DIFUSION DEL "PAQUETE" → DIFICULTAD PARA
DEFINIR LA
VELOCIDAD

INDETERMINACION EN LA VELOCIDAD

↓
 Δv

$$(\Delta v)_0 = \frac{1}{m} (\Delta p)_0$$

$t=0$ EN UNO STOMO ($m=10^{-23}$ g) → 15' : 3 km

$$(p = m\dot{v} \rightarrow \Delta v \Rightarrow \Delta p)$$

RELACION DE INCERTIDUMBRA:

$$\Delta x \cdot \Delta p \sim h$$

HEISENBERG

↓
* LIMITES DE APLICACION DE LA IMAGEN PARTICULA

USAR LAS PALABRAS POSICION Y VELOCIDAD
CON MAYOR PRECISION ES ABSOLUTAMENTE
SIN SENTIDO

THE PHYSICAL PRINCIPLES OF THE QUANTUM THEORY

W. HEISENBERG

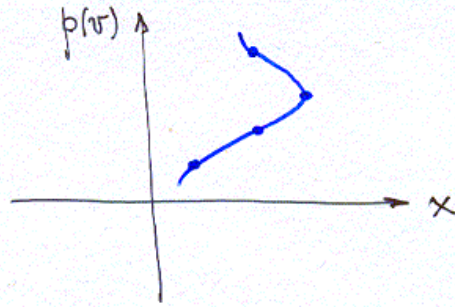
This uncertainty relation specifies the limits within which the particle picture can be applied. Any use of the words "position" and "velocity" with an accuracy exceeding that given by equation (1) is just as meaningless as the use of words whose sense is not defined.

$$\Delta x \Delta p_x \geq h$$

¹ In this connection one should particularly remember that the human language permits the construction of sentences which do not involve any consequences and which therefore have no content at all—in spite of the fact that these sentences produce some kind of picture in our imagination; e.g., the statement that besides our world there exists another world, with which any connection is impossible in principle, does not lead to any experimental consequence, but does produce a kind of picture in the mind. Obviously such a statement can neither be proved nor disproved. One should be especially careful in using the words "reality," "actually," etc., since these words very often lead to statements of the type just mentioned.

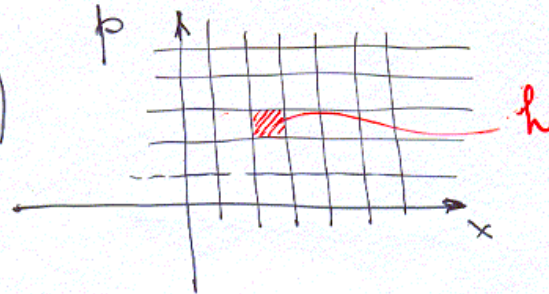
CLASSICA

(OBSERVADOR)
(IGNORANTE)



CUANTICA

(OBSERVADOR)
(PROTAGONISTA)



NO HAY TRAYECTORIAS

• EN AUSENCIA DE OBSERVACION → EVOLUCION CONTINUA (ONDAS)

• MEDIDA (OBSERVACION) → COMPORTAMIENTO DISCONTINUO (REDUCCION)

↓
DESCONOCER $p(x)$

THE PRIVILEGE OF BEING A PHYSICIST

V. WEISSKOPF

W.H.FREEMAN AND CO.

Some philosophers like to say that, according to quantum mechanics, the world around us is not real and depends on our minds, because our observations disturb and change the objects. I disagree. True enough, typical quantum properties unfold only if atoms are not subject to methods of observation that penetrate their interior. But they are not exposed to such perturbations under ordinary conditions, and that is why characteristic quantum properties are manifest everywhere: in the color of objects; in the structure of crystals; in the mechanical, electrical, and chemical properties of different substances; and, in the last instance, in the phenomena of life. In most of our studies of material properties, we try to maintain, not to disturb, the quantum states, since they give rise to the reality of interest to us. Sure enough, if an atomic phenomenon is observed too closely by our clumsy instruments, we destroy the very object of interest, its quantum state, with all its seemingly contradictory properties. But just these properties are responsible for the behavior and appearance of matter in our environment. Hence, it is the quantum state that is "real" and exists independently from us. If close observations destroy it, and if we cannot describe it with our everyday concepts, too bad for those observations and concepts! What is real are the objects and their quantum states, since they represent nature. The inapplicability of some of our concepts does not make the objects less real.

CONSECUENCIAS :

(POSITIVAS !)

DEMITIAMIENTO DE
PREDICCIÓN



ALARGAMIENTO DEL
CAMPO DE LA FÍSICA
(Y SUS APLICACIONES)



ESTUDIO DE SISTEMAS DE COMPLEJIDAD

CRECIENTE



UTILIZAR PROBABILIDAD
EN UN CONTEXTO CADA
VEZ MAS GRANDE !

MECANICA ESTADISTICA

- MOTIVACION PRINCIPAL DE BOLTZMANN - GIBBS
PARA ABANDONAR NEWTON - LAPLACE :
INUTILIDAD PARA RESOLVER NUMEROSOS
PROBLEMAS

EJ: DESCOMIDA MICROSCOPICAMENTE

- SI SE LLEVA AGUA A 100°C HIERVE
- SI SE LLEVA AGUA A 0°C SE CONGELA

MICROSCÓPICAMENTE



MEDIR $\vec{x}(t), \vec{v}(t)$ DE
 $> 10^{23}$ ATOMOS Y LUEGO
CALCULAR TRAYECTORIAS
DE TODOS

EN UN SISTEMA COMPUESTO DE MUCHOS CUERPOS

(CASI) TODAS LAS CONDICIONES INICIALES (E FIJA
Ó T FIJA) CONDUCEN AL MISMO COMPORTAMIENTO
MACROSCÓPICO

↓

MEJOR (Y CALCULAR)

TODO

ES

IMPOSIBLE E

INUTIL

↓

EL AGUA HIERVE (CASI) SIEMPRE A 100°C

LA INCIERTIDUMBRE ES TAN GRANDE COMO PARA

QUE ESTA PREDICCIÓN SEGUNDA MENTE SE

VERIFICÓ DURANTE TODA LA HISTORIA

DEL UNIVERSO !

EXISTEN DOS TIPOS DE MAGNITUDES PARA
LOS SISTEMAS GRANDES

① LAS PREDECIBLES CON (CASI) CERTEZA
TOMANDO SIEMPRE EL MISMO VALOR.

$$\left(\text{VARIACION DE } p \text{ EN UN GAS} \sim \frac{1}{\sqrt{N}} \right)$$

($\sim 10^{-12}$)

② LAS QUE NO TOMAN SIEMPRE EL MISMO
VALOR \rightarrow UNA PREDICCIÓN PROBABILÍSTICA
ES POSIBLE



PREDICCIÓN → PROBABILIDAD

EN ESTE CASO DEBIDO AL
GRAN NUMERO DE
PARTICULAS

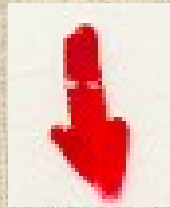
FORMALISMO PARA TRATAR DE EXPLICAR LAS
PROPIEDADES DE LA MATERIA MACROSCOPICA
SOBRE LA BASE DEL COMPORTAMIENTO DINAMICO
DE SUS CONSTITUYENTES MICROSCOPICOS

MICRO



MACRO

M.E.



* ATACA UN RANGO ILIMITADO DE
PROBLEMAS *

(TODOS LOS FENOMENOS NATURALES)

[CUALQUIER ESTADO DE LA MATERIA]

PERMITE ESTUDIAR SISTEMAS FUERA DEL
EQUILIBRIO Y LA MARCHA HACIA
EL EQUILIBRIO

BASE DEL FORMALISMO

PARA EL COMPORTAMIENTO DINAMICO DE LOS
CONSTITUYENTES MICROSCOPICOS DE LA MATERIA
A LA EXPLICACION DE SUS PROPIEDADES GLOBALES

POR QUÉ UN NUEVO FORMALISMO?

EN PRINCIPIO: SE PUEDEN ESCRIBIR LAS ECUACIONES
DE MOVIMIENTO E INTEGRALES
(Nº EC. = Nº G.L.)

PRACTICA: (CASI) IMPOSIBLE ESCRIBIRLAS Y
RESOLVERLAS. SI RESUELTAS →
INTRODUCIR LAS CONDICIONES INICIALES




TIEMPO (Y PAPEL) → ∞

ESPERANZA

A MAYOR NUMERO DE PARTICULAS
MAYOR COMPLEJIDAD. PERO

APARECEN REGULARIDADES

SI EL NUMERO ES SUFICIENTEMENTE
GRANDE


LEYES

ESTADISTICAS ..

LEYES ESTADÍSTICAS

(PREDICCIÓN DIFERENTE)

- CUALITATIVAMENTE NUEVAS
- NALEN DE LA PRESENCIA DE UN GRAN NUMERO DE GRADOS DE LIBERTAD



PIERDEN SENTIDO SI EL NUMERO DE PARTICULAS DECRECE Y SE HACE PEQUEÑO



NECESIDAD DE DIFERENCIACION

- MECANICA CUANTICA : NATURALEZA PROBABILISTICA
(EN LA BASE)

- MECANICA ESTADISTICA : NATURALEZA ESTADISTICA
(TODA) (AUN EN LA APROXIMACION CLASICA)

- FUERZAS NO CONOCIDAS (BROWNIANO)

- CONDICIONES INICIALES NO CONOCIDAS (DISPERSION)

- EN GENERAL : EL NUMERO DE GRADOS DE LIBERTAD ES ENORME EN UN WORLD MACROSCOPICO Y NO HAY ESPERANZA NI TIENE SENTIDO LA DESCRIPCION COMPLETA.

• QUE SIGNIFICA UN NUMERO ENORME DE GRADOS
↳ DE LIBERTAD?

* 1 mm³ DE GAS CONTIENE 3×10^{16} MOLECULAS

(IMPRIMIR 10^{16} NUMEROS ...)

(COMPUTADORAS: MANEJAN EL MOVIMIENTO SIMULADO
DE ALGUNOS MILES DE MOLECULAS)

* MATEMÁTICA NECESARIA:

TEMA DE PROBABILIDADES

* LOS EXPERIMENTOS ESTABLECEN RELACIONES FENOMENOLÓGICAS ENTRE MAGNITUDES FÍSICAS MACROSCÓPICAS ($V, p, T, c, \eta, n, \chi_m, \dots$)



LOS CÁLCULOS A PARTIR DE VARIABLES

MICROSCÓPICAS TERMINA EN VALORES MEDIOS

SOME CON JUNTOS DE PARTICULAS

LAS CARACTERÍSTICAS INDIVIDUALES SON INACCESIBLES

Y SIN INTERÉS

RESUMEN

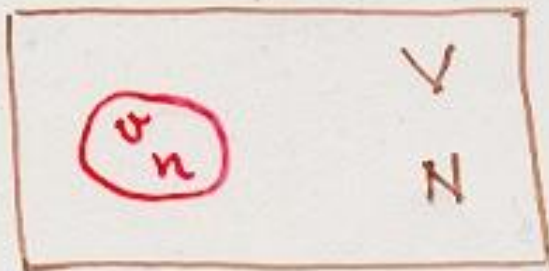
SI BIEN LAS LEYES SON CONOCIDAS
A NIVEL MICROSCOPICO, ES NECESARIO
USAR METODOS ESTADISTICOS
PARA EXPLICAR LOS FENOMENOS
MACROSCOPICOS.

BENEFICIO EL NUMERO INMENSO DE GRADOS DE LIBERTAD (VIA LA "LEY DE LOS GRANDES NUMEROS") CONDUCE A PREVISIONES (CASI) EXACTAS: CIENTOS EVENTOS SON PRACTICAMENTE CIERTOS



* DISPERSION CUADRATICA MEDIA DESPRECIABLE
FUENTE A LOS VALORES MEDIOS DE LAS
MAGNITUDES FISICAS MACROSCOPICAS *

EJ : FLUCTUACIONES DE LA DENSIDAD



RECIPIENTE DE VOLUMEN V
CON N PARTÍCULAS
(INDEPENDIENTES Y UNIFORMES)

• EN σ :

$$\underline{\langle n \rangle = N \frac{\sigma}{V}}$$

• DETERMINAR : VALOR MEDIO CUADRÁTICO DE LAS FLUCTUACIONES DE DENSIDAD EN σ

$$\underline{\langle \Delta n^2 \rangle = \langle (n - \langle n \rangle)^2 \rangle}$$

• ASOCIAMOS A CADA PARTÍCULA i LA VARIABLE

ALEATORIA

* $a_i = \begin{cases} 1 & \text{si } i \text{ ESTA EN } \nu \end{cases}$

$\begin{cases} 0 & \text{si } i \text{ NO ESTA EN } \nu \end{cases}$



PROBABILIDAD

DE

$$\begin{cases} a_i = 1 & \text{ES } \langle \frac{1}{2} \rangle \\ a_i = 0 & \text{ES } (1 - \langle \frac{1}{2} \rangle) \end{cases}$$

VALOR MEDIO:

$$\underline{\langle a_i \rangle} = 1 \times \langle \frac{1}{2} \rangle + 0 \times (1 - \langle \frac{1}{2} \rangle) = \underline{\langle \frac{1}{2} \rangle}$$

● DEFINITION :

$$\underline{N} = a_1 + a_2 + \dots + a_n = \underline{\sum_i a_i}$$



$$\underline{\langle n \rangle} = \sum \langle a_i \rangle = \underline{N \frac{1}{2}}$$



$$\begin{aligned} \langle \Delta n^2 \rangle &= \langle (\sum a_i - \sum \langle a_i \rangle)^2 \rangle = \langle (\sum (a_i - \langle a_i \rangle))^2 \rangle \\ &= \sum \langle (a_i - \langle a_i \rangle)^2 \rangle = \sum (\langle a_i^2 \rangle - \langle a_i \rangle^2) \end{aligned}$$

(ELEMENTS INDEPENDENTES)

$$a_i = 0 \text{ ó } 1 \rightarrow \langle a_i^2 \rangle = \langle a_i \rangle$$

$$\underline{\langle \Delta n^2 \rangle} = \underline{N \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{2} \right)}$$

$$\langle \Delta n^2 \rangle = N \frac{h\nu}{kT} \left(1 - \frac{h\nu}{kT} \right)$$

$$\langle n \rangle = N \frac{h\nu}{kT}$$

si $\frac{h\nu}{kT} \ll 1 \rightarrow \langle \Delta n^2 \rangle \approx \langle n \rangle$



FLUCTUACION
RELATIVA

$$\frac{\sqrt{\langle \Delta n^2 \rangle}}{\langle n \rangle} = \frac{1}{\sqrt{\langle n \rangle}}$$

EJ NUMERICO:

- CUBO DE $L = 3.3 \times 10^{-3}$ cm
- $\sigma \approx 3.8 \times 10^{-8}$ cm³

$$\frac{1}{\sqrt{\langle n \rangle}} = 10^{-6}$$

CONOCIMIENTO DE LA DENSIDAD MEDIA A 1 ppm

CONCLUSION

PARA 1 mm³ DE GAS LA FLUCTUACION RELATIVA DE LA DENSIDAD ES 0.6×10^{-8} .

POR LO TANTO $\frac{n}{V}$ PUEDE CONSIDERARSE

PERFECTAMENTE CONOCIDA (E IGUAL

Δ LA DENSIDAD $\frac{N}{V}$)



LAS FLUCTUACIONES ESTADÍSTICAS SON
DESPRECIABLES

EXTENSION:

$$\frac{\sqrt{\langle \Delta f^2 \rangle}}{\langle f \rangle} \approx \frac{1}{\sqrt{N}}$$

VALID TO ALL f

ARGUMENTO DE PLAU SIMILIDAD

SISTEMA NO SIMPLE + ACCIONES ENTRE SUS PARTES

+ TIEMPO LARGO → EL SISTEMA PASARA UN GRAN
NUMERO DE VECES POR TODOS
Y CADA UNO DE LOS ESTADOS
POSIIBLES

FORMALIZACION

S GRADOS DE LIBERTAD → ESTADO DESCRITO POR:

- S COORDENADAS q_i ($i=1, \dots, S$)
- S VELOCIDADES \dot{q}_i

VENTAJA USAR q_i Y ϕ_i (IMPULSOS)



ESPACIO DE LAS FASES

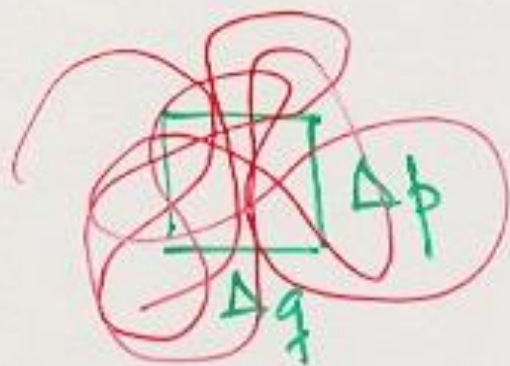
(SU DIMENSION AL N.º DE GRADOS DE LIBERTAD)



EVOLUCION TEMPORAL \rightarrow TRAYECTORIA DE FASE

$\Delta p \Delta q$: REGION DEL ESPACIO DE FASE
ALREDEDOR DE p Y q

EN TIEMPO t : LA TRAYECTORIA PASADA POR
ESA REGION MUCHAS VECES



Δt : TIEMPO EN QUE EL
SISTEMA ESTUVO EN $\Delta p \Delta q$

* EXISTE :

$$\omega = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\Delta t}{t}$$

ω \equiv PROBABILIDAD DE ENCONTRAR AL SISTEMA
EN $\Delta p \Delta q$ SI LO OBSERVAMOS A UN
TIEMPO CUALQUIERA

* SEMIBITOS

$$\underline{d\omega = f(p_1, \dots, p_s; q_1, \dots, q_s) dp dq}$$

$$\underline{(dp dq \equiv dp_1 \dots dp_s \cdot dq_1 \dots dq_s)}$$

$f(p, q)$: DENSIDAD DE PROBABILIDAD


$\rho(p, q) \equiv$ FUNCION DE DISTRIBUCION
DE PROBABILIDAD

* NORMALIZACION :

$$\int_{\text{TODO EL ESPACIO DE LAS FASES}} \rho(p, q) dp dq = 1$$


IMPORTANTE INTERACCIONES \rightarrow DORMAN EL ESTADO INICIAL

AL PASAR POR TODOS LOS ESTADOS \Rightarrow CUALQUIER ESTADO PUEDE CONSIDERARSE COMO INICIAL



PROBLEMA BÁSICO

DETERMINAR LA DISTRIBUCION ESTADISTICA




$p(p, q)$ PERMITE CALCULAR VALORES MEDIOS
DE CUALQUIER MAGNITUD FISICA f
QUE DE PENDE DEL ESTADO DEL SISTEMA


$$\langle f \rangle = \int f(p, q) p.(p, q) dp dq$$

NO SE SIGUE SU VARIACION TEMPORAL

PERO ES EQUIVALENTE

EVOLUCION TEMPORAL DE $f \equiv f(t)$


$$\langle f \rangle_t = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t f(t') dt'$$



LAS PREDICCIONES DE LA MECANICA ESTADISTICA

SOME EL COMPORTAMIENTO DE CUERPOS

MACROSCOPICOS ESTAN RELACIONADAS A

PROBABILIDADES



LAS PREDICCIONES DE LA MECANICA ESTADISTICA
SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE CUERPOS
MACROSCOPICOS ESTAN RELACIONADAS A
PROBABILIDADES

CASI SE BORRA. SOLO RARAMENTE DEVIACIONES
DETECTABLES DE $\langle f \rangle$

DISTRIBUCION DE f PICADA EN $f = \langle f \rangle$ Y
CASI COMO FUERA DE $\langle f \rangle$

(FINES DEL)

SIGLO XX:

NUMEROSOS SISTEMAS CON

POCAS PARTICULAS (PEQUEÑO

NUMERO DE GRADOS DE LIBERTAD)

* NECESITAN DEL USO DE PROGRAMIDADES

SISTEMAS CAOTICOS: LAS TRAYECTORIAS

NO SON PREDICIBLES PARA TIEMPOS LARGOS

● SUPER SENSIBLES A LAS CONDICIONES INICIALES

UNA INCERTEZA PEQUEÑÍSIMA EN LAS CONDICIONES
INICIALES \Rightarrow PÉRDIDA TOTAL (CRECIMIENTO
EXPONENCIAL) DE INFORMACIÓN WEGO
DE UN TIEMPO CARACTERÍSTICO τ . (EFECTO
HAMPOSA)



PREDICCIONES DETERMINISTAS PARA $t < \tau$

EJ:

BOLAS DE BILIAL EN MOVIMIENTO
(SIN ROCES)

WEGO DE CADA CHOQUE ES MAS DIFICIL
DE PREDICIR LA POSICION



● DIFERENCIA ENTRE :

SISTEMA SOLAR

EPIDEMIA DE SIDA

ATMOSFERA TERRESTRE

POBLACION DE GALLOS EN AFRICA

SEÑALES NERVIOSAS

MANCHAS SOLARES

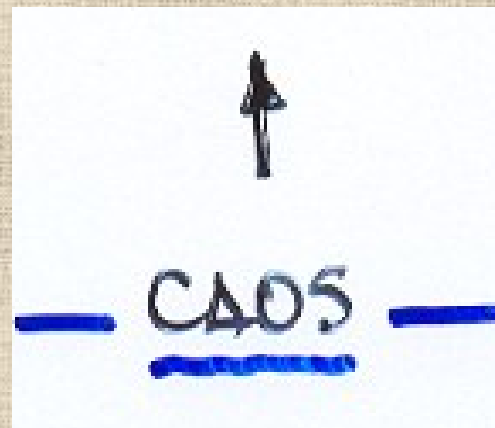
BOLSA - MERCADO CAMBIARIO

TRAFELTOMAS ESTELARES

⋮

! FINALMENTE NINGUNA !

* LA EVOLUCION DE TODOS, LUEGO DE UN
TIEMPO CARACTERISTICO (τ) ES Y ESTA
IMPREVISIBLE *



↓
ABUSO "PRIGOGINE" = "CIENCIA DEL CAOS"

SISTEMAS COMPLEJOS

EL COMPORTAMIENTO DEPENDE DE MANERA
CRUCIAL DE LOS DETALLES DEL SISTEMA

(DEPENDENCIA DIFÍCIL DE COMPRENDER)

EXTREMADAMENTE SENSIBLES A LA FORMA DE
LAS ECUACIONES DE MOVIMIENTO!



EL SISTEMA
ES COMPLEJO



NINGUNA
PREDICCIÓN
M. ESTADÍSTICA
ES POSIBLE
(NO ERGÓDICO)

MANIFIESTA DIVERSOS COMPORTAMIENTOS
(UN ANIMAL TIENE, COME, COME, CORRE, ...)

A PESAR DE LA COMPLEJIDAD: SE PUEDEN
HACER PREDICIONES SOBRE EL COMPORTAMIENTO

• PREDICIONES NO PROBABILÍSTICAS •

PREDICCIONES LIGADAS A LA DISTRIBUCION
DE PROBABILIDADES DE PROPIEDADES QUE
VALIAN CON EL SISTEMA Y NO CON LAS
PROPIEDADES DE UN DADO SISTEMA !

EJ: NO SE PUEDEN TESTEAR PROPIEDADES COMO UNA
SOLA PROTEINA (O UN PERRO)

(\equiv LA DISTRIBUCION DE v EN LAS MOLECULAS
DE UN GAS NO SE PUEDE TESTEAR
MIDIENDO UNA VELOCIDAD (v_{480}))

"CAOS" : SENSIBILIDAD EXTREMA DE LA TRAYECTORIA
A LAS CONDICIONES INICIALES →
ESTUDIAR DISTRIBUCION DE PROBABILIDAD
PARA TIEMPOS LARGOS

(COMPORTAMIENTO CALCULABLE A PARTIR DE
LAS ECUACIONES DE MOVIMIENTO)

"COMPLEJO" : SENSIBILIDAD EXTREMA DEL
COMPORTAMIENTO A LOS DETALLES
DE LA ECUACION DE MOVIMIENTO
→ ESTUDIAR DISTRIBUCION
DE PROBABILIDAD DE COMPORTAMIENTO

(CALCULABLE A PARTIR DE LA
DISTRIBUCION DE ECUACIONES DE
MOVIMIENTO)

MORALEJA

- EL CIENTIFICO NUNCA ADQUIERE ALGO EN FORMA DEFINITIVA

(CUANDO CREE TENER SU VERDAD, SE LE ESCAPA...)



CONCEPTO FUNDAMENTAL :

DOMINIO
DE
VALIDEZ

PROBLEMA : DESCONOCEMOS A PRIORI

LA " DIMENSION DEL ESPACIO TECNICO "

LOS LIMITES DEL DOMINIO DE VALORES PUEDEN

ADIRECER EN DIFERENTES DIRECCIONES

* " HACER AGUA POR MUCHOS LADOS " ... *

NEWTON

$$\underline{v \sim c}$$



EINSTEIN
(RELATIVIDAD)



$$\underline{S (= E \cdot t) \sim h}$$



PLANCK + ...
(QUANTICA)



$$\underline{d \gg R_{\text{TERRA}}}$$



EINSTEIN
(CURVATURA DEL UNIVERSO)

cgarciaacanal@fisica.unlp.edu.ar