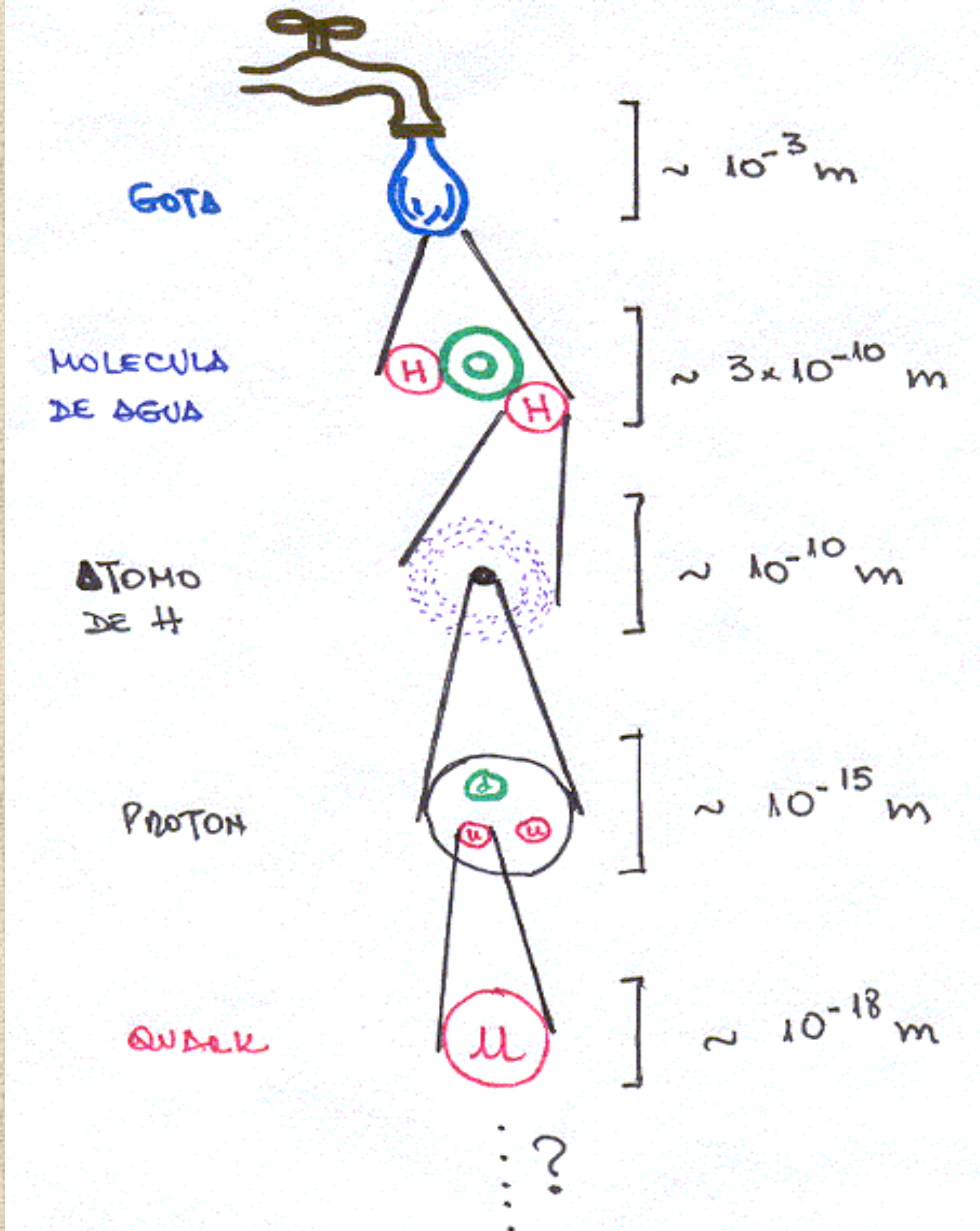
7

2019

BIG BANG

PARTICULAS


GOTA
~ 10-3 m
MOLECULA
DE AGUA
H
O
H
~ 3x10-10 m
ATOMO
DE H
~ 10-10 m
PROTON
d
u
u
~ 10-15 m
QUARK
u
~ 10-18 m
?

MECANICA CUANTICA:

- SOLUCION DE LA APARENTE PARADOJA DE LA DUALIDAD ONDA – PARTICULA

↓

- NUEVA FORMULACION DE LAS LEYES EN QUE LOS ASPECTOS ONDULATORIO Y DE PARTICULA SON **COMPLEMENTARIOS**

CONSTANTE DE PLANCK (ESCALA)

$$h = 6{,}55 \times 10^{-27} \text{ erg.seg}$$

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

CONCEPTO ONDULATORIO

PROPIEDAD DE PARTICULA

$h = 0 \Rightarrow$ FISICA CLASICA $\Rightarrow e(p)$; luz (λ)

CONCEPTOS BÁSICOS

CONTRADICCIÓN TEORÍA — EXPERIMENTO → CONSTRUIR UNA TEORÍA APLICABLE A ÁTOMOS !

EXPERIMENTO : DIFRACCIÓN DE ELECTRONES

(DONDE RENDIJA) ↓ PROCESO ONDULATORIO !

● LOS ELECTRONES NO DESCRIBEN TRAYECTORIAS

↓

PRINCIPIO DE INCERTEZA

EL PROCESO DE MEDIDA (⇒ APARATO CLÁSICO) SIEMPRE AFECTA AL ELECTRÓN

(MAYOR EXACTITUD DE MEDIDA → MAYOR EFECTO)

SI EL ELECTRON TIENE COORDENADA DEFINIDA
NO TIENE DEFINIDA SU VELOCIDAD (Y VICEVERSA)

COORDENADA Y VELOCIDAD
NO PUEDEN MEDIRSE CON
EXACTITUD SIMULTANEAMENTE

PPIO. DE INCERTEZA

⇓

MENOR NUMERO DE VARIABLES ⟹ PROBABILIDADES

POSTULADOS

PI: UN SISTEMA CON n GRADOS DE LIBERTAD ESTA COMPLETAMENTE ESPECIFICADO POR UNA FUNCION DE ONDA $\psi(q_1, q_2, \ldots, q_n)$ DE NORMA 1.

ψ CONTIENE UN FACTOR DE MODULO 1 ARBITRARIO

$$e^{i\alpha}$$

LA ELECCION DE $e^{i\alpha}$ (α REAL) EN ψ ES ARBITRARIA PERO SI UN CALCULO INVOLUCRA DIFERENTES FUNCIONES DE ONDA HAY QUE FIJAR LAS FASES CONSISTENTEMENTE

$\Downarrow$

INTERFERENCIA

TODA INFORMACION POSIBLE DEL SISTEMA CONTENIDA EN ψ !

P II: A CADA OBSERVABLE (MEDIBLE) FISICO CORRESPONDE UN OPERADOR HERMITICO (AUTO ADJUNTO) CON UN CONJUNTO COMPLETO DE AUTOFUNCIONES ORTOGONALES.

$$\hat{F}\,|\psi_n\rangle = f_n\,|\psi_n\rangle$$

$$\langle\psi_n|\psi_{n'}\rangle = \delta_{nn'}$$

$$\sum_n |\psi_n\rangle\langle\psi_n| = 1$$

$\hat{F}$ HERMITICO $\Rightarrow$ f_n REALES

P III: PARA CADA SISTEMA EXISTE EL OPERADOR HERMITICO H ≡ HAMILTONIANO QUE DETERMINA LA EVOLUCION TEMPORAL DEL SISTEMA VIA LA

ECUACION DE SCHRÖDINGER

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \hat{H} \psi$$

DETERMINISTA: DADA ψ EN $t = t_0 (=0)$ DETERMINA UNIVOCAMENTE ψ A CUALQUIER t

$$\psi(t) = \exp\left\{ -i\hbar \int_0^t H\, dt \right\} \psi_0$$

$H \neq H(t) \Rightarrow$

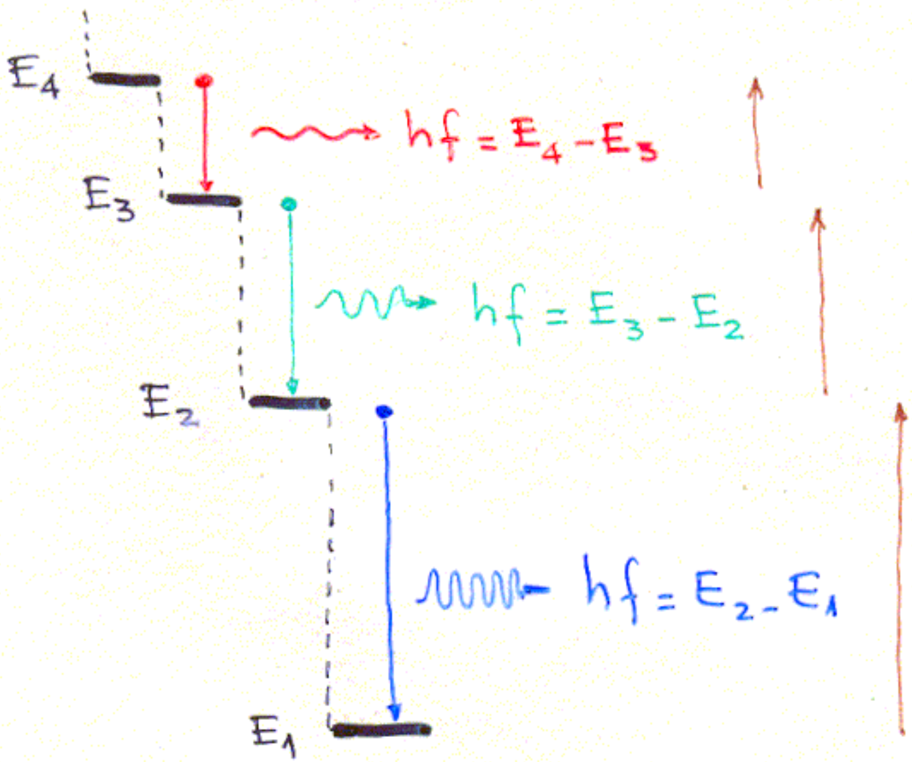
$$\psi(t) = T\, \psi_0$$

$$T = e^{-iHt/\hbar}$$

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V(\mathbf{r})\right]\psi(\mathbf{r}) = E\,\psi(\mathbf{r})$$

$$\frac{d^2\,y(x)}{dx^2} + \lambda\,y(x) = 0$$

NIVELES DE ENERGIA



➔ ESPECTROS

RESULTADO DE LAS TRANSICIONES

CUANTIFICACION ESPACIAL

(ADEMAS DE LA ENERGIA!)

— CUERPO CARGADO ROTANDO ALREDEDOR DE UN EJE —

- IMPULSO ANGULAR

$$\vec{L} = \vec{r} \wedge \vec{p}$$

- MOMENTO MAGNETICO

$$\vec{\mu}$$

- RADIO r
- AREA $A = \pi r^2$
- MASA m
- CARGA q

$$L = m v r$$

$$\mu = I A = \frac{q v}{2\pi r} \cdot \pi r^2 = \frac{q}{2m} \cdot m v r$$

- $\mu = \dfrac{q}{2m} L$

- $\dfrac{q}{2m} = g$: RELACION GIROMAGNETICA

- TORQUE EXTERNO τ: $\vec{\tau} = \dfrac{d\vec{L}}{dt}$ $\left(\vec{F} = \dfrac{d\vec{p}}{dt}\right)$

$\vec{\tau} = 0 \rightarrow \dfrac{d\vec{L}}{dt} = 0 \rightarrow \vec{L}$ CONSTANTE EN EL TIEMPO (CONSERVACION)

— MECANICA CUANTICA $\rightarrow \vec{L}$ OPERADOR

$\downarrow$

- L^2 PUEDE TOMAR SOLO LOS VALORES $\hbar^2 l(l+1)$ $(l = 0, 1, \ldots)$

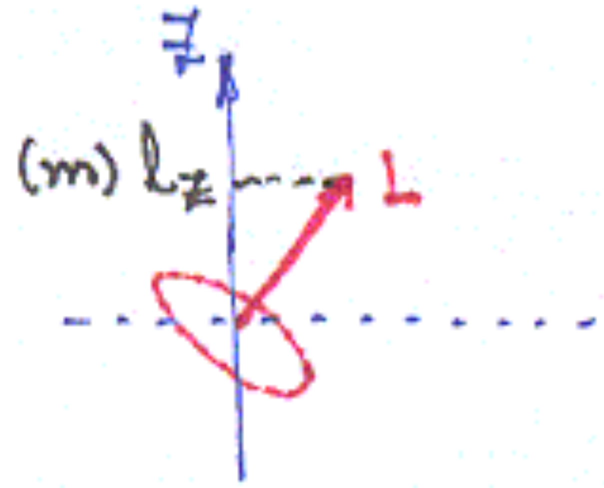
$\downarrow$

PROYECCIONES DE L SOBRE UN EJE (z)

$m: l, l-1, l-2, \ldots 0, \ldots, -l+1, -l$

• CUANTIFICACION ESPACIAL •

$m: \; l, \; l-1, \; l-2, \; \ldots \; 0, \; \ldots, \; -l+1, \; -l$

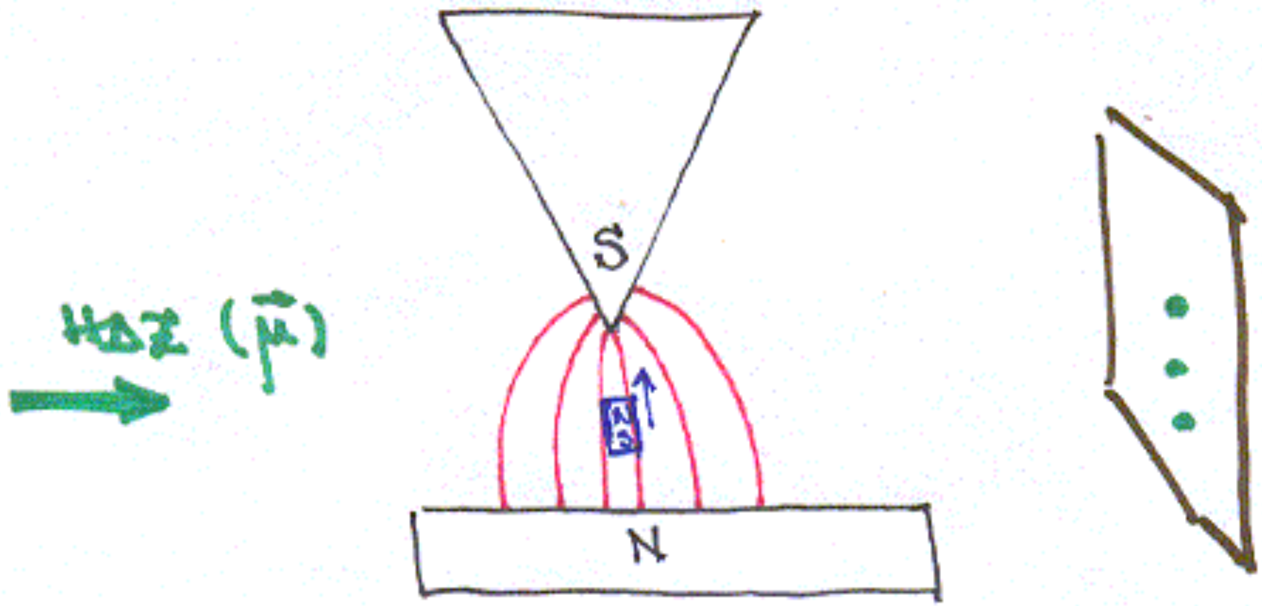


- $l=0 \rightarrow 1$ PROYECCION
- $l=1 \rightarrow 3$ "
- $l=2 \rightarrow 5$ "

⋮

$2l+1$ PROYECCIONES

EXPERIMENTO:



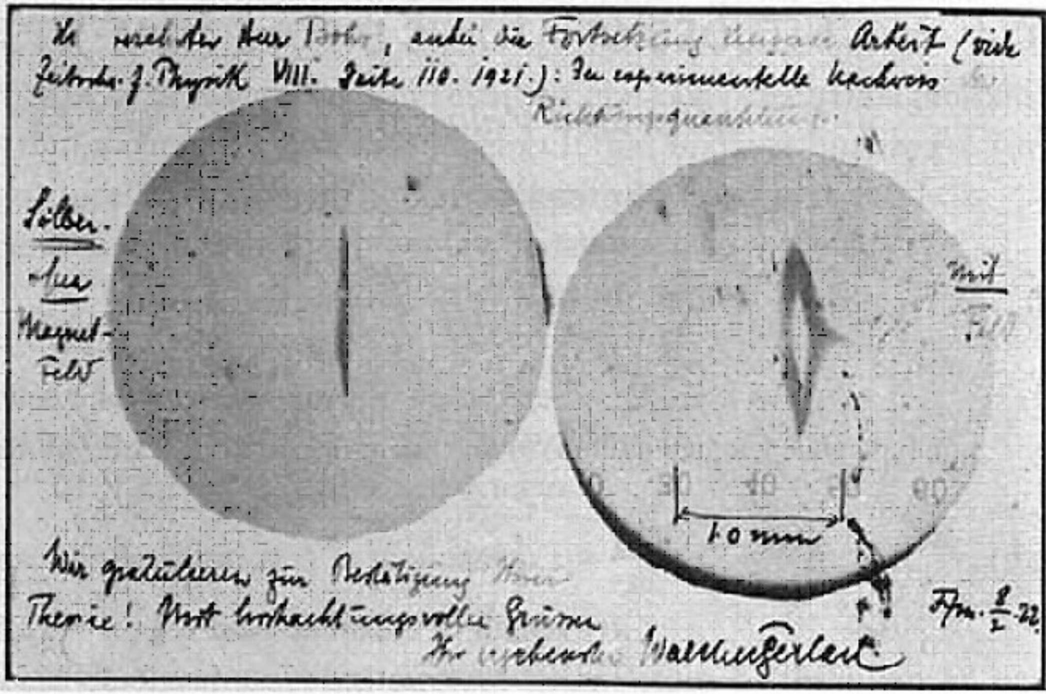
$l = 1 \Rightarrow m = -1, 0, 1 \longrightarrow$ 3 MANCHAS

• CUANTIFICACION ESPACIAL •

HAZ DE PLATA (Ag) $l = 0 \rightarrow$ 2 MANCHAS !

EXPERIMENTO

(STERN-GERLACH)



Gerlach's postcard, dated 8 February 1922, to Niels Bohr. It shows a photograph of the beam splitting, with the message, in translation: "Attached [is] the experimental proof of directional quantization. We congratulate [you] on the confirmation of your theory." (Physics Today December 2003)

- ELECTRON TIENE SPIN

$\left(s = \frac{1}{2}\hbar\right)$

- 2 PROYECCIONES : $\pm\frac{1}{2}$

ANTIPARTICULAS

- ECUACION RELATIVISTA: $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$

$\Downarrow$

ENERGIA TOTAL POSITIVA O NEGATIVA

$$E = \pm\sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}$$

- MECANICA CLASICA: $E<0$ SIN SENTIDO
- MECANICA CUANTICA: SI

* ONDA VIAJANDO HACIA $\underline{x}$ POSITIVO:

$$\psi = A\, e^{-i/\hbar\,(Et - px)}$$

$e^{i\alpha} = \cos\alpha + i \sin\alpha$

$$\left[A \cos(kx - \omega t) \right] \qquad \omega = \frac{E}{\hbar} \qquad k = \frac{p}{\hbar}$$

SI $\underline{t}$ CRECE $\Rightarrow$ LA FASE $\underline{(Et - px)}$ AVANZA HACIA x POSITIVO !

PERO ψ REPRESENTA TAMBIEN

PARTICULA DE ENERGIA $-E$ (IMPULSO $-p$)
VIAJANDO HACIA $x<0$ Y HACIA ATRAS
EN EL TIEMPO : $-t$

$$\left.\begin{aligned} Et &\rightarrow (-E)(-t) \\ px &\rightarrow (-p)(-x) \end{aligned}\right\}$$

$E>0$	$E<0$
$t_1 \rightarrow t_2$	$t_1 \leftarrow t_2$

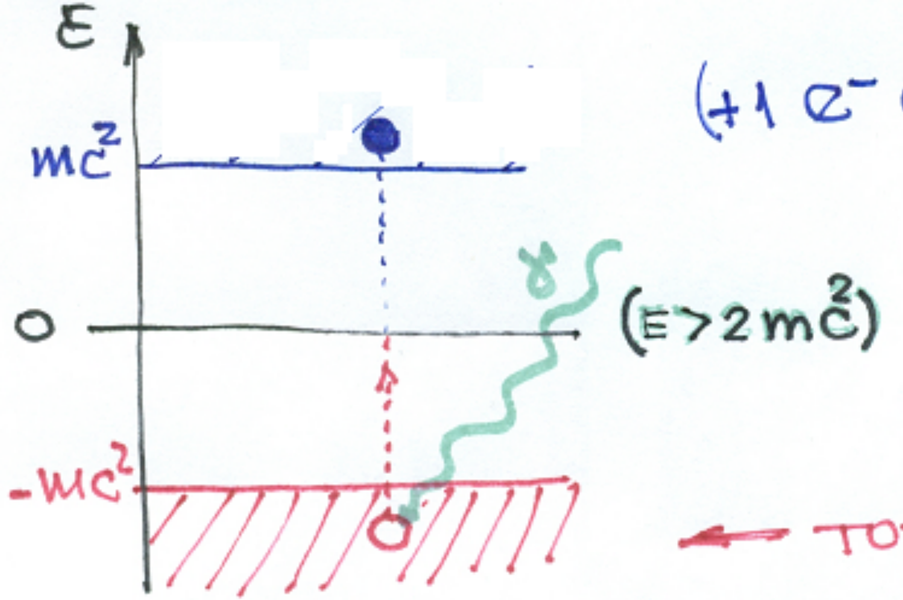
$(t_2 > t_1)$

HAZ DE ELECTRONES CON $E<0$ (CARGADOS $-$)
VIAJANDO HACIA ATRAS EN EL TIEMPO

EQUIVALENTE A

HAZ DE POSITRONES CON $E>0$ (CARGADOS $+$)
VIAJANDO HACIA ADELANTE EN EL TIEMPO

DIRAC



$(+1\ e^-$ CON $E>0)$

PAR

$L_{e^-}+L_{e^+}=0$

$+1-1=0$

← TODO LLENO !

$(-1\ e^-$ CON $E<0)$

$\equiv +1\ e^+$ CON $E>0$

SIMETRIA

ASPECTOS QUE NO CAMBIAN CAMBIANDO EL PUNTO DE VISTA

- FISICA → ABSTRAER LA IDEA GENERAL Y LIBERARLA DE LA VISION...

TRASCENDER LA SENSACION DE BALANCE, PROPORCION, REGULARIDAD, ARMONIA, BELLEZA, PERFECCION, ...

- FISICA → OBJETIVIZAR

(PROFUNDIZAR, PRECISAR, ...)

✱ OPERACION DE SIMETRIA : SE HACE "ALGO" AL OBJETO
(TRANSFORMACION) PERO NO SE PERCIBE LA ACCION

— PERMANECE INVARIANTE —

(BAJO LA ACCION DE UN GRUPO DE TRANSFORMACIONES)

- OBJETO: FIGURA GEOMETRICA
  FORMA DE OBJETO MATEMATICO } (INVARIANCIA)
  ENTIDAD MATEMATICA (ECUACION) (COVARIANCIA)
  (FORMA DE)

EJ $x^2 + y^2 + z^2 = d^2$ INVARIANTE BAJO ROTACIONES
($x=y=z=0$ FIJO)

$$\downarrow$$

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 = d^2$$

EJ$_2$: ECUACION DE ONDA

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0$$

COVARIANTE ESPACIO-TEMPORAL !

EJ$_3$ ATRACCION ELECTROSTATICA (e, ϕ)

$$V(r) \propto \frac{1}{r} \Rightarrow F(r) \propto \frac{1}{r^2}$$

SIMETRIA ESFERICA

PERO: ATOMO EN UNA MOLECULA O EN UN SOLIDO $\Rightarrow$

ELECTRON SOMETIDO A LA SIMETRIA DEL ENTORNO

($\leq$ ESFERICA)

$\Downarrow$

QUIMICA !

• LENGUAJE DE LA SIMETRIA: TEORIA DE GRUPOS

OPERACIONES DE SIMETRIA: $A, B, C, \ldots$

$AB = D$

$AC = F$

("MULTIPLICACION")

COMPOSICION

E : NO HACER NADA

(IDENTIDAD)

$A^{-1}, B^{-1}, \ldots$: INVERTIR

$A^{-1}A = E$

GRUPO

* ABELIANOS : $AB = BA$ (CONMUTATIVOS)

* NO ABELIANOS: $AB \neq BA$ (NO CONMUTATIVOS)

* SIMETRIA → RESTRICCIONES !

(EMBALDOSADA CON PENTAGONOS IMPOSIBLE POR SIMETRIA ROTACIONAL + TRASLACION)

↓

LEYES DE CONSERVACION

(ENERGIA – IMPULSO ANGULAR – CARGA – ...)

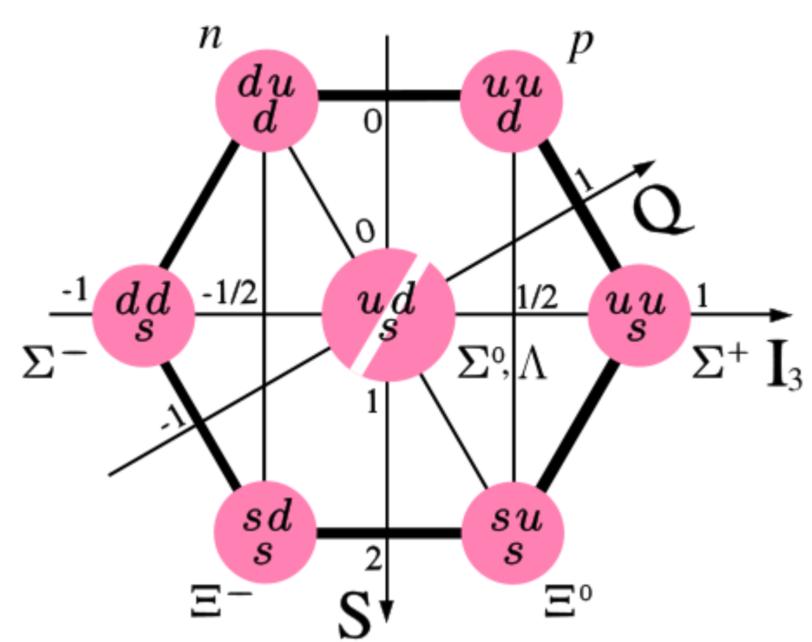
* SIMETRÍA → PREDICCIONES!

ESTADOS RELACIONADOS POR UNA SIMETRÍA
SON EQUIVALENTES

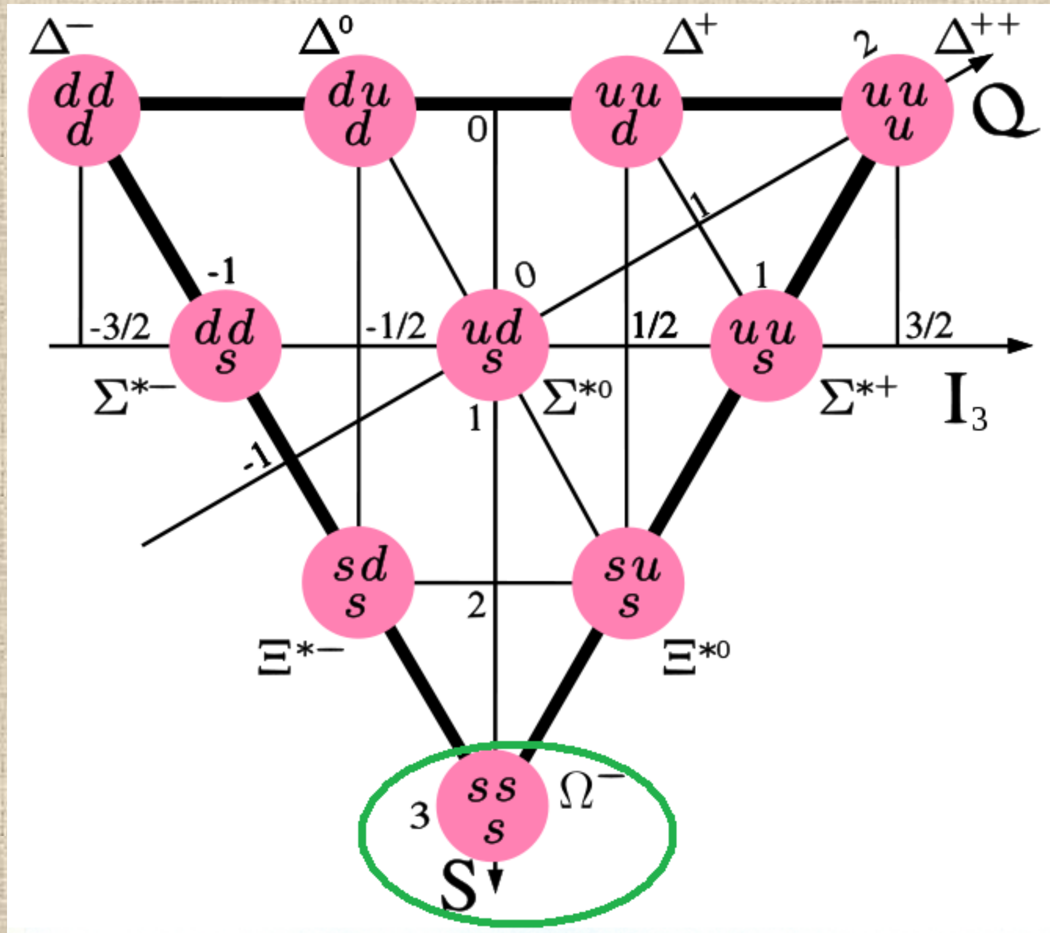
↓

SI HALLAMOS UN MIEMBRO → FALTAN OTROS QUE PREDECIMOS!

EJ PARTÍCULA HADRÓNICA Ω^-
(HABÍA 9 Y FALTABA 1)


n
p
du d
uu d
0
0
1
Q
-1
dd s
-1/2
ud s
1/2
uu s
1
Σ⁻
Σ⁰, Λ
Σ⁺
I3
-1
1
sd s
su s
2
Ξ⁻
S
Ξ⁰

SU(3)


Δ⁻
Δ⁰
Δ⁺
Δ⁺⁺
2
dd d
du d
uu d
uu u
Q
0
1
-1
0
1
-3/2
dd s
-1/2
ud s
1/2
uu s
3/2
Σ*⁻
Σ*⁰
Σ*⁺
I3
1
-1
sd s
2
su s
Ξ*⁻
Ξ*⁰
3
ss s
Ω⁻
S

* SIMETRIA → CLASIFICACION

(CONJUNTOS CON CARACTERISTICAS COMUNES)

EJ: SOLIDOS CRISTALINOS (230!)

* SIMETRIA → CLASIFICACION DE PARTICULAS

— CLASIFICACION MAS PROFUNDA:

(SIMETRIA RESPECTO A PERMUTACIONES)

FERMIONES vs. BOSONES

PARTICULAS IDENTICAS

— CLASICAMENTE: PERMUTACION → SISTEMA NO CAMBIA

PERO CONFIGURACIONES DISTINGUIBLES

(SEGUIR EL TRAZO DE LAS PARTICULAS)

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

• DISTINGUIBLES POR LA POSICION INICIAL !

— CUANTICAMENTE: NO HAY TRAYECTORIAS

(NO SE PUEDE SEGUIR EL MOVIMIENTO)

* INDISTINGUIBILIDAD DE LAS IDENTICAS *

• IDENTIDAD ≡ IGUAL MASA – IGUAL (ES) CARGA (S) – IGUAL SPIN – ...

↓

* A NIVEL CUANTICO ⇒ NUEVOS EFECTOS * !

EN MECANICA CUANTICA LAS PARTICULAS IDENTICAS PIERDEN INDIVIDUALIDAD ! (SUPERPOSICION DE PAQUETES DE ONDA)

LOCALIZAR UN ELECTRON EN UN INSTANTE NO AYUDA NADA PARA LOCALIZARLO EN UN INSTANTE POSTERIOR → ¿QUE ELECTRON ESTA DONDE ?

"PRINCIPIO DE INDISTINGUIBILIDAD DE LAS PARTICULAS IDENTICAS" *

CONSECUENCIAS IMPORTANTES !

FERMIONES

NO MAS DE 1 PUEDE OCUPAR EL MISMO ESTADO

SE EXCLUYEN!

(PRINCIPIO DE PAULI)

NO SE HUNDE LA MANO EN LA MESA!

BOSONES

CUALQUIER NUMERO PERMITIDO

SE JUNTAN!

(CONDENSACION DE BOSE)

PARTICULAS IDENTICAS $\Rightarrow$ SI INTERCAMBIO PARTICULAS (1 y 2)

$|\psi|^2$ NO PUEDE CAMBIAR (INDISTINGUIBILIDAD)

(~ PROBABILIDAD)

$\Downarrow$

- $\psi \rightarrow +\psi$ SIMETRICA : BOSONES

- $\psi \rightarrow -\psi$ ANTISIMETRICA : FERMIONES

(-) $\rightarrow$ PRINCIPIO DE PAULI

EJ: DOS PARTICULAS IDENTICAS

$\begin{cases} \text{PARTICULA } 1: & x_1, y_1, z_1, s_1, \ldots \equiv 1 \\ \quad " \quad\quad 2: & x_2, y_2, z_2, s_2, \ldots \equiv 2 \end{cases}$

$\downarrow$

SISTEMA: $\psi(1,2)$

INTERCAMBIAR $1 \leftrightarrow 2 \Rightarrow$ NO EFECTO (INDISTINGUIBLES)

- $\psi(1,2) = e^{i\alpha}\,\psi(2,1) \quad ; \quad \alpha \in \mathbb{R}$

$\left(|\psi(1,2)|^2 = |\psi(2,1)|^2 \right)$

REITERANDO PERMUTACION $\longrightarrow$ ESTADO INICIAL

$$e^{2i\alpha} = 1 \longrightarrow \alpha = n\pi$$

$$\downarrow$$

$$e^{i\alpha} = \pm 1$$

$$\psi(1,2) = \pm\, \psi(2,1)$$

* ESTADOS POSIBLES: { SIMETRICO (+) / ANTISIMETRICO (−)

* FRENTE A LA PERMUTACION $1 \longleftrightarrow 2$ *

- SIMETRICAS $\psi_S(1,2) = +\, \psi_S(2,1)$
- ANTISIMETRICAS $\psi_A(1,2) = -\, \psi_A(2,1)$

- $\psi_{\alpha}^{S}(\vec{r}_1,\vec{r}_2) = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[\phi_{\beta_1}(\vec{r}_1)\,\phi_{\beta_2}(\vec{r}_2) + \phi_{\beta_1}(\vec{r}_2)\,\phi_{\beta_2}(\vec{r}_1)\right]$
- $\psi_{\alpha}^{A}(\vec{r}_1,\vec{r}_2) = \frac{1}{\sqrt{2}}\left[\phi_{\beta_1}(\vec{r}_1)\,\phi_{\beta_2}(\vec{r}_2) - \phi_{\beta_1}(\vec{r}_2)\,\phi_{\beta_2}(\vec{r}_1)\right]$

(NORMALIZACION)

SUPONGAMOS $\vec{r}_1 \approx \vec{r}_2$ (LAS DOS PARTICULAS CON CASI IGUALES COORDENADAS)

S

- $\psi_\alpha^S(\vec{r}_1,\vec{r}_2) \simeq \frac{1}{\sqrt{2}}\, 2\, \phi_{\beta_1}(\vec{r}_1)\, \phi_{\beta_2}(\vec{r}_2)$

$$|\psi_\alpha^S(\vec{r}_1,\vec{r}_2)|^2 \simeq 2\, |\phi_{\beta_1}(\vec{r}_1)|^2\, |\phi_{\beta_2}(\vec{r}_2)|^2$$

SIN SIMETRIZACION $\Big\}$ $|\psi_\alpha(\vec{r}_1,\vec{r}_2)|^2 = |\phi_{\beta_1}(\vec{r}_1)|^2\, |\phi_{\beta_2}(\vec{r}_2)|^2$

⇒ SIMETRIA → DOBLE DENSIDAD DE PROBABILIDAD DE ENCONTRAR AL SISTEMA CON LAS 2 PARTICULAS MUY PROXIMAS !

BOSONES

A

$(\vec{r}_1 \simeq \vec{r}_2) \Rightarrow \psi_\alpha^A(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = 0$

→ ANTISIMETRIA ⇒ DENSIDAD DE PROBABILIDAD DE QUE LAS DOS PARTICULAS ESTEN EN EL MISMO ESTADO ES NULA

↑

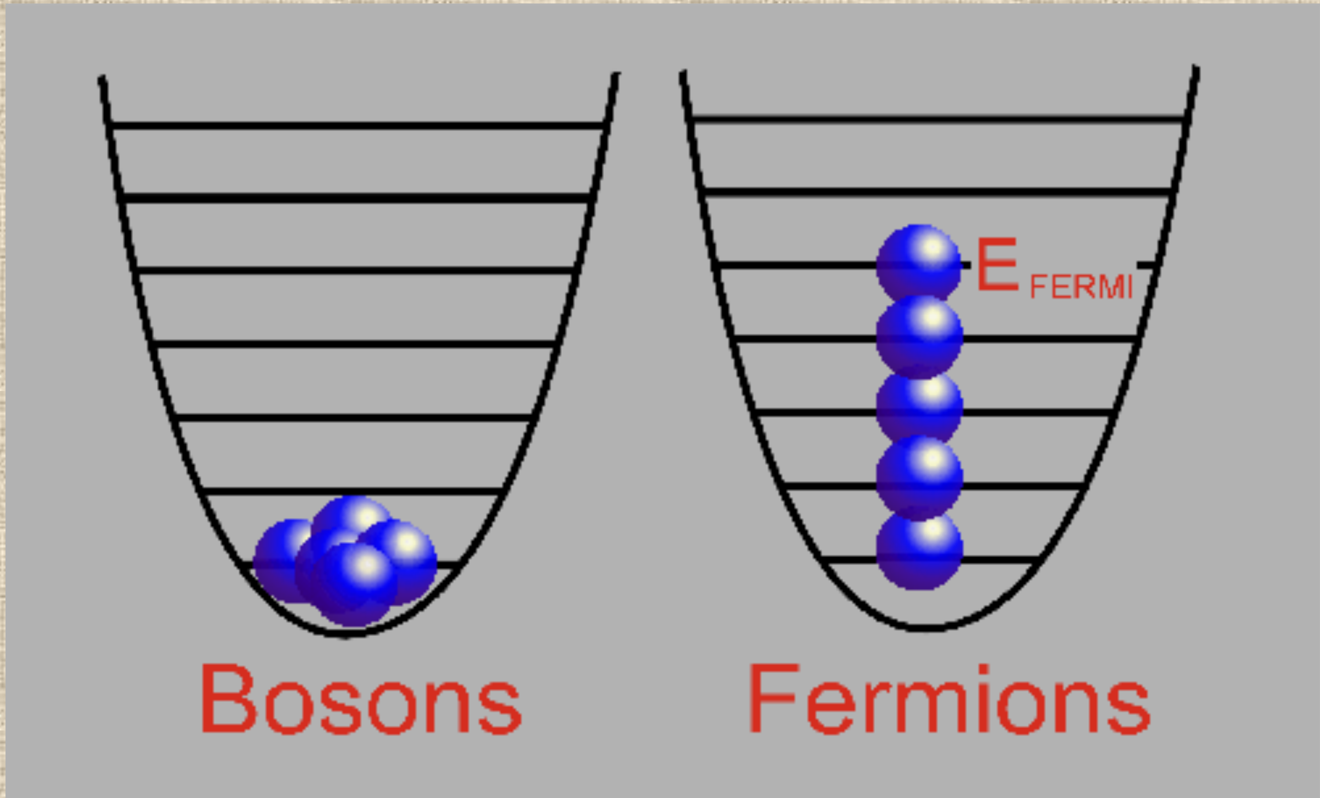
PRINCIPIO DE EXCLUSION DE PAULI

FERMIONES

SPIN ⟷ ESTADISTICA :

- SPIN ENTERO : BOSONES
- SPIN SEMIENTERO: FERMIONES

(ELECTRONES — SPIN $\frac{1}{2}$ — FERMIONES — TABLA PERIODICA — ....)


E FERMI
Bosons
Fermions

SIMETRIA DE GAUGE

SIMETRIA INTERNA

INVARIANCIA DE LAS LEYES FRENTE A TRANSFORMACIONES "EXTRAVAGANTES"

(NO DEL ESPACIO-TIEMPO)

— CUALIDADES DE LOS OBSERVABLES —

NO SITUACIONES DE OBSERVACION

↓

{ PRINCIPIO DINAMICO BASICO DE LAS INTERACCIONES FUNDAMENTALES }

TEORIA CUANTICA DE CAMPOS

— POR QUÉ ? —

- $\Delta x \downarrow$ $\Rightarrow$ MECANICA CUANTICA NO RELATIVISTA

$\Rightarrow$ PRINCIPIO DE INCERTEZA $\quad \Delta x \, \Delta p \sim \hbar$

$\Delta x \downarrow \;\rightarrow\; \Delta p \;(p) \uparrow \;\rightarrow\; v \uparrow \;(\leq c)$

$\Rightarrow$ RELATIVIDAD ESPECIAL

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} \;\rightarrow\; E_{reposo} = mc^2$$

(CONSERVACION DE E $\Rightarrow$ E_{CIN} $\longleftrightarrow$ MASA)

$\downarrow$

NO CONSERVACION DEL NUMERO DE PARTICULAS

$\downarrow$

- MECANICA CUANTICA RELATIVISTA INSUFICIENTE

$\downarrow$

* TEORIA CUANTICA DE CAMPOS *

* PRODUCCION Y ANIQUILACION DE PARTICULAS *

FORMULACION

CADA ESPECIE DE PARTICULA $\longleftrightarrow$ UN CAMPO $\psi(t, \vec{x})$

MECANICA CLASICA

- 1 MASA PUNTUAL (EN 1-D) DESCRITA POR UNA COORDENADA GENERALIZADA
  - $q(t)\ ;\ \dot{q}(t)$

TEORIA DE CAMPOS CLASICA

- 1 CAMPO DESCRITO POR 1 COORDENADA GENERALIZADA EN CADA PUNTO $\vec{x}$
  - $\phi(t,\vec{x})\ ;\ \dot{\phi}(t,\vec{x}),\ \vec{\nabla}\phi(t,\vec{x})$

TAXONOMIA

("TAXIS": ORDENAMIENTO + "NOMOS": REGLA, NORMA)

FERMIONES

h

HADRONES

(DENSO)

- FUERTES (VIEJAS Ó NUCLEARES)
- DEBILES
- E.M. (SI CARGADOS)

$(p, n, \pi, K, \rho, \Delta, \ldots)$

ℓ

LEPTONES

(LIVIANO)

- DEBILES
- E.M. (SI CARGADOS)

$(e, \mu, \tau, \underbrace{\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau}_{\text{NEUTROS}})$

- GRAVEDAD.

HADRONES

BARIONES

(PESADO)

$S = n + \frac{1}{2}$

$(n = 0, 1, \ldots)$

$(p, n, \Delta, \Omega, \ldots)$

MESONES

(SEMIPESADO)

$S = n$

$(n = 0, 1, \ldots)$

$(\pi, K, \rho, J/\psi, B, \ldots)$

* NUMERO BARIONICO *

$B = 1 \quad (\bar{B} = -1)$

$B = 0$

$\bar{q}$ ANTIPARTICULA

EXTRAÑEZA

- MESON K
- BARION Λ

⋮

- PRODUCIDOS EN PARES $(\pi^- p \rightarrow K^0 \Lambda^0)$ $(\pi^- p \not\rightarrow K^0 n)$
- PRODUCIDAS FACILMENTE PERO DECAIAN MAS LENTAMENTE

↓

NUEVO NUMERO CUANTICO: EXTRAÑEZA **S**
(ROTULO)

* CONSERVACION DE EXTRAÑEZA EN I. FUERTES *

$K \ (S = +1)$ $\quad \Lambda \ (S = -1)$

$$\underset{(S = 0 + 0 = 0)}{\pi^- p} \rightarrow \underset{(S = 1 - 1 = 0)}{K^0 \Lambda^0}$$

CHARM	c
BOTTOM	b
TOP	t

LOS HADRONES

- PARTICIPAN DE LAS INTERACCIONES (EX+) "FUERTES" HADRONICAS
  (Y DE LAS DEBILES Y DE LAS E.M.)
- MAS DE 100 (TODOS (+ ó −) IGUALMENTE IMPORTANTES)
- TIEMPO CARACTERISTICO: 10^{-23} seg.
  (UNA PARTICULA RELATIVISTA ATRAVIESA 1 fm)
- $g_H \simeq 10$ (IMPOSIBLE EL TRATAMIENTO PERTURBATIVO)

- ESPECTRO HADRONICO: $\Gamma \sim \Delta \sim M$
  (ESPECTROSCOPIA ATOMICA Y NUCLEAR $\Rightarrow$ $\Gamma \ll \Delta \ll M$)
- FISICA HADRONICA $\simeq$ FISICA DE ALTAS ENERGIAS $(W \gg M)$
  (PARA EXCITAR NIVELES (NUEVOS HADRONES) SE NECESITAN ENERGIAS SUPERIORES A LAS MASAS)

- MANIFESTACIONES DE GRADOS DE LIBERTAD INTERNOS :

(COMO EN LA ESTRUCTURA ATOMICA Y NUCLEAR)

- CARGA DEL PROTON NO PUNTUAL ($d \sim 1$ fm)
- MODELO DIFRACTIVO : PROTON ABSORBENTE DE $d \sim 1$ fm (SCATTERING ELASTICO Y EXCITACIONES DIFRACTIVAS)
- PROTON "SIMILAR" A OTRAS ∃ PARTICULAS ($SU(3)_f$)
- DEEP INELASTIC SCATTERING DE LEPTONES : CENTROS DISPERSORES PUNTUALES (RUTHERFORD)

⋮

ESTRUCTURA INTERNA : QUARKS

* DEMASIADOS HADRONES !

(SITUACION SIMILAR A PRE MENDELEYEV)

⇓

BUSCAR REGULARIDADES

(TABLA PERIODICA DE HADRONES)

- GELL-MANN + NE'EMAN ⟹ SIMETRIA SU(3)

("SABOR")

↓

{ CAMINO HACIA LA ESTRUCTURA INTERNA DE LOS HADRONES }

↓

QUARKS

(IMPORTANCIA DE LOS ACELERADORES)

(CONDENSAN ENERGIA)

(Y AUMENTAR)

Hoy

QUARKS + LEPTONES

FUERZA FUERTE: SI NO

TRES "GENERACIONES" DE QUARKS Y LEPTONES

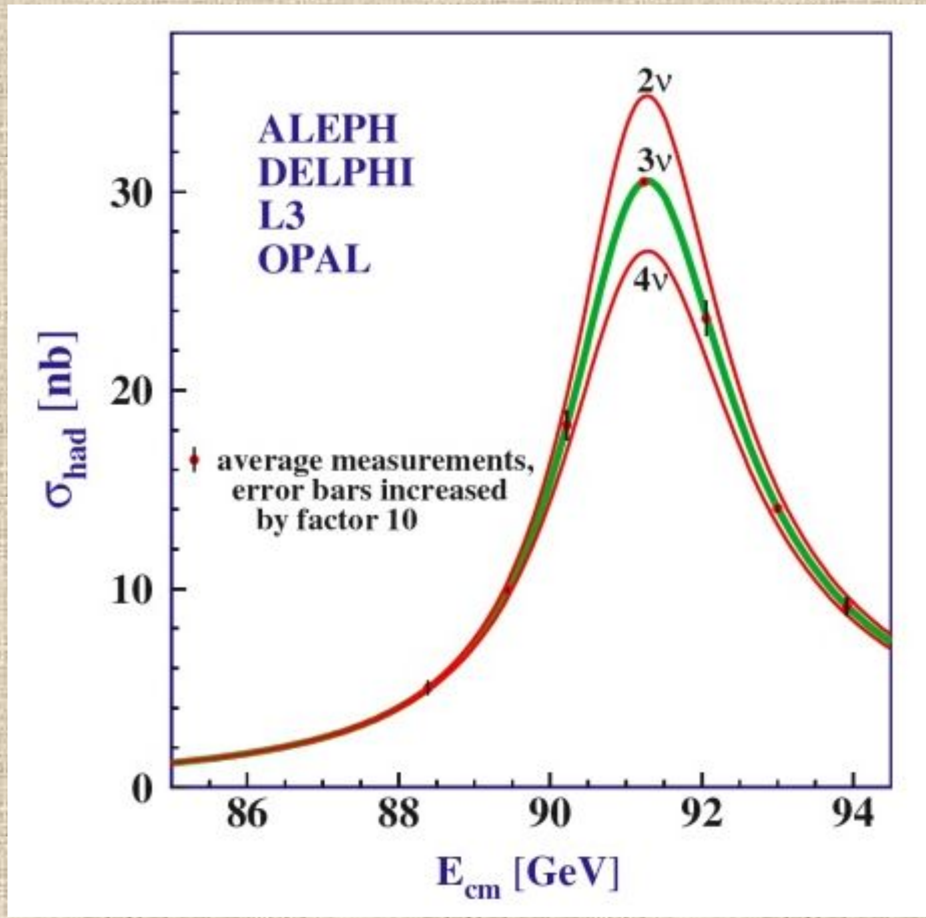
(q) (l)

"CLONES" MAS "GORDOS" UNA DE OTRA !

* MATERIA ESTÁNDAR : PRIMERA GENERACION

- SEGUNDA Y TERCERA : INESTABLES (NO SE ENCUENTRAN NATURALMENTE)

* EXPERIMENTO (LEP) → 3 GENERACIONES



3 GENERACIONES

2 QUARKS + 2 LEPTONES POR GENERACIÓN

1ª: $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}$

2ª: $\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}$

3ª: $\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$ $\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$

"ASIMETRIA":

ℓ: CARGA ± 1

q: CARGA $+\frac{2}{3}$; $-\frac{1}{3}$

FACTOR 3 "COMPENSADO" POR OTRO FACTOR 3 !

CADA TIPO DE QUARK POSEE 3 "COLORES"

↓

COLOR

COLOR

ESTADISTICA DE FERMI-DIRAC

$\Delta^{++} = |u\uparrow\, u\uparrow\, u\uparrow\rangle \qquad \Omega^{-} = |s\uparrow\, s\uparrow\, s\uparrow\rangle$

INCOMPATIBILIDAD $\left\{ \begin{array}{l} \text{SIMETRICOS !} \\ \text{FERMIONES } (S = \tfrac{3}{2}) \text{ !} \end{array} \right.$

$\downarrow$

ANTISIMETRIZAR:

$$|\text{BARION}\rangle = \frac{1}{\sqrt{6}} \sum_{i,j,k}^{3} \varepsilon_{ijk}\, |q_i\, q_j\, q_k\rangle$$

$$|\text{MESON}\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{i=1}^{3} |q_i\, \bar{q}_i\rangle$$

- DATOS EXPERIMENTALES:

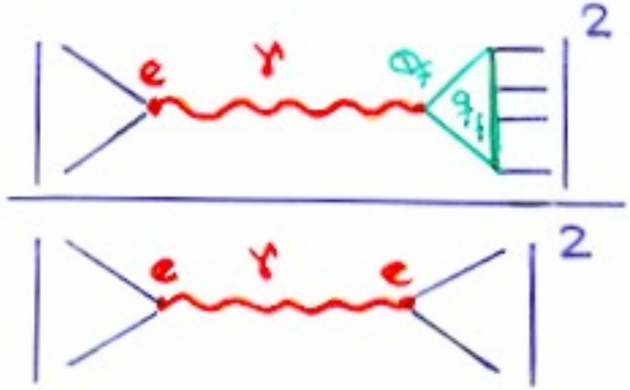
  - $$R = \frac{\sigma(e^+e^- \to \text{hadrones})}{\sigma(e^+e^- \to \mu^+\mu^-)} \simeq 3 \sum_q Q_q^2$$

  - $$\Gamma(\pi^0 \to 2\gamma) = \frac{m_\pi^2}{64\pi}\left[\frac{2\alpha}{\pi f_\pi}\, 3 \sum_q (I_3)_q\, Q_q^2\right]^2$$

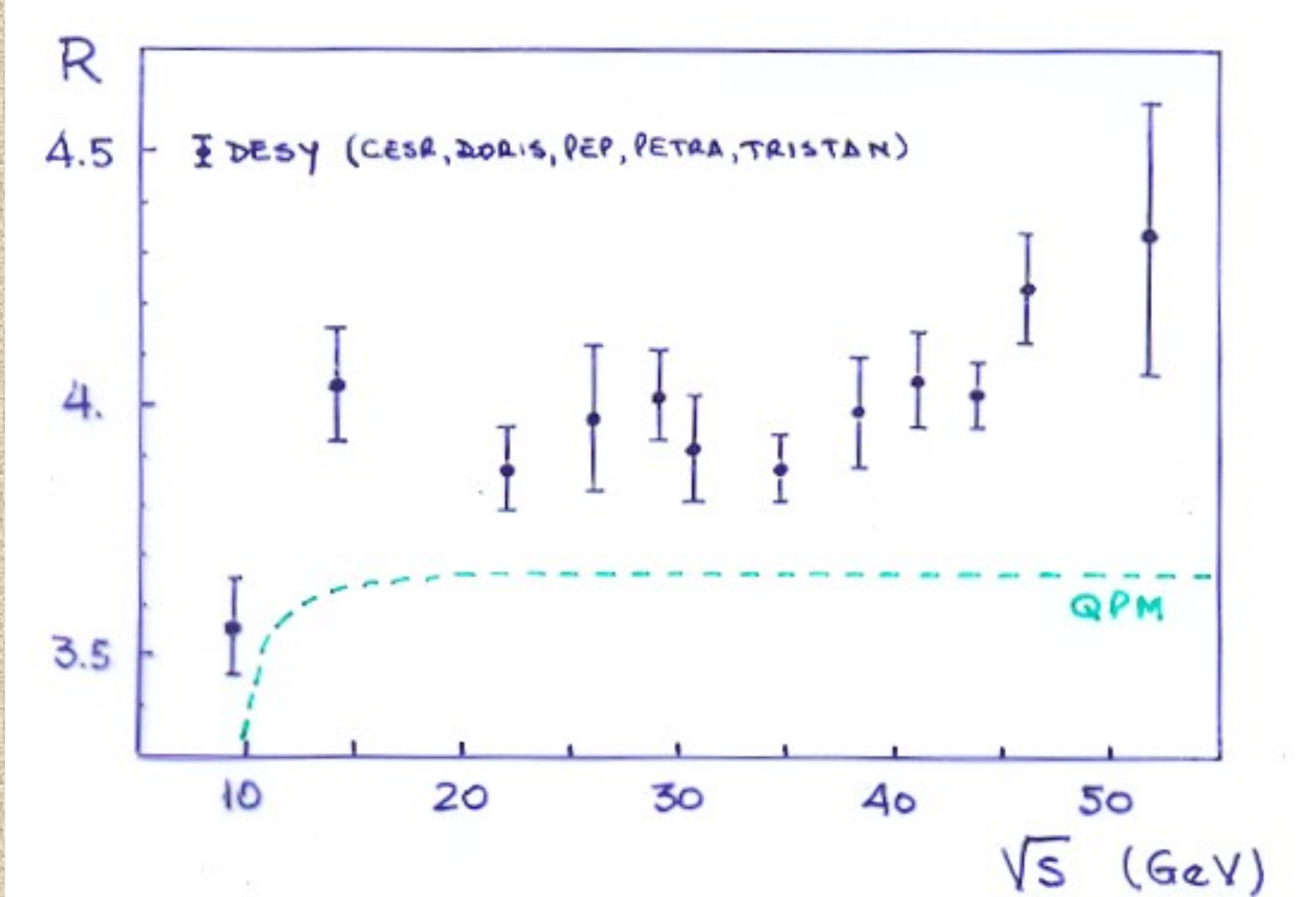
- RENORMALIZABILIDAD DE SU(2) x U(1):

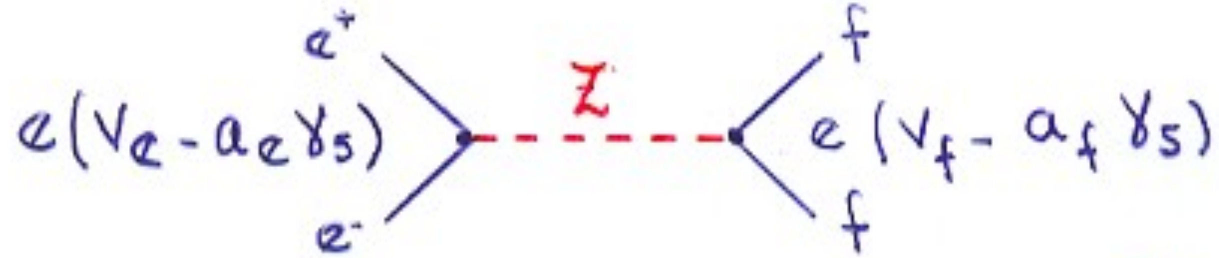
ANOMALIA = 0 si $Tr\, Q_{f+f}^{+} = Tr(Q_{lep} + 3\, Q_q) = 0$

$$R = \frac{\sigma(e^+ + e^- \rightarrow \text{HADRONES})}{\sigma(e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-)}$$

$R_{QPM} =$ 

$$R_{QPM} = 3 \sum_f Q_f^2$$


R
4.5
4.
3.5
DESY (CESR, DORIS, PEP, PETRA, TRISTAN)
QPM
10
20
30
40
50
√s (GeV)

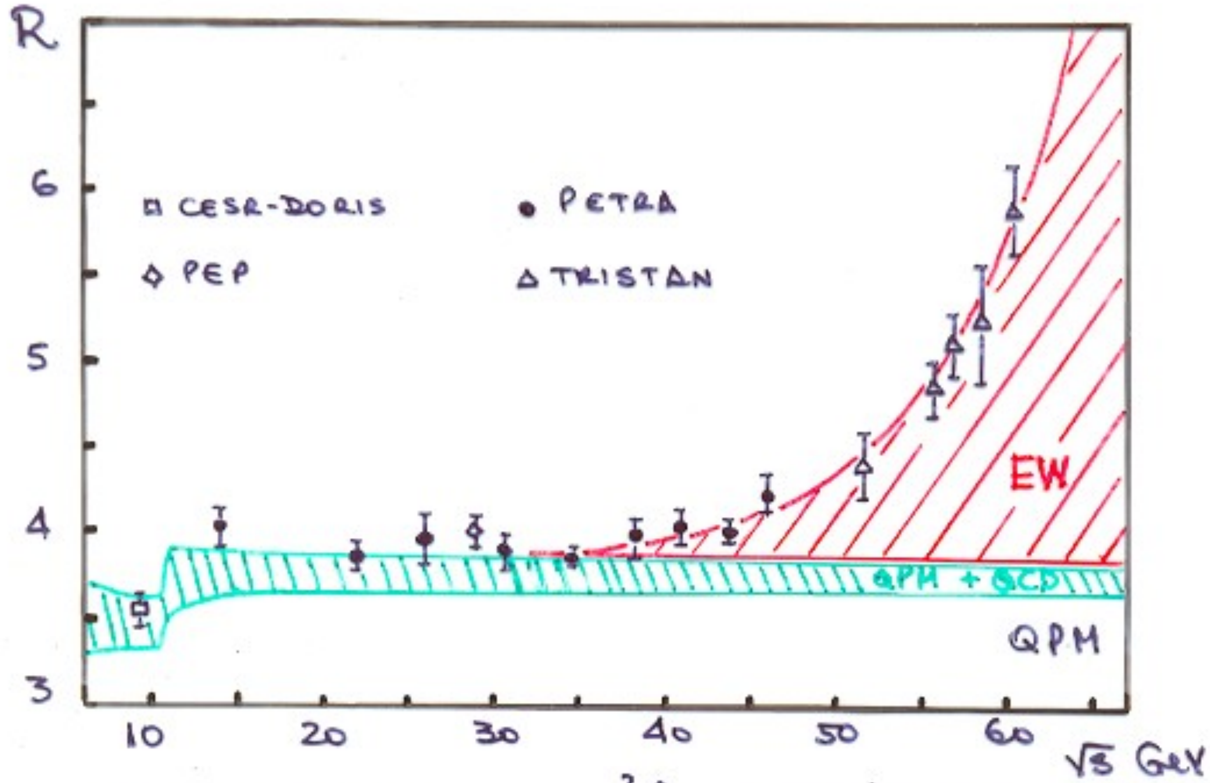


$$\boxed{R = 3\sum_f Q_f^2 \left\{1 + C_1^V\left(\frac{\alpha_s}{\pi} + C_2^V\left(\frac{\alpha_s}{\pi}\right)^2\right) C_{VV} + [V \to A] \ldots\right\}}$$

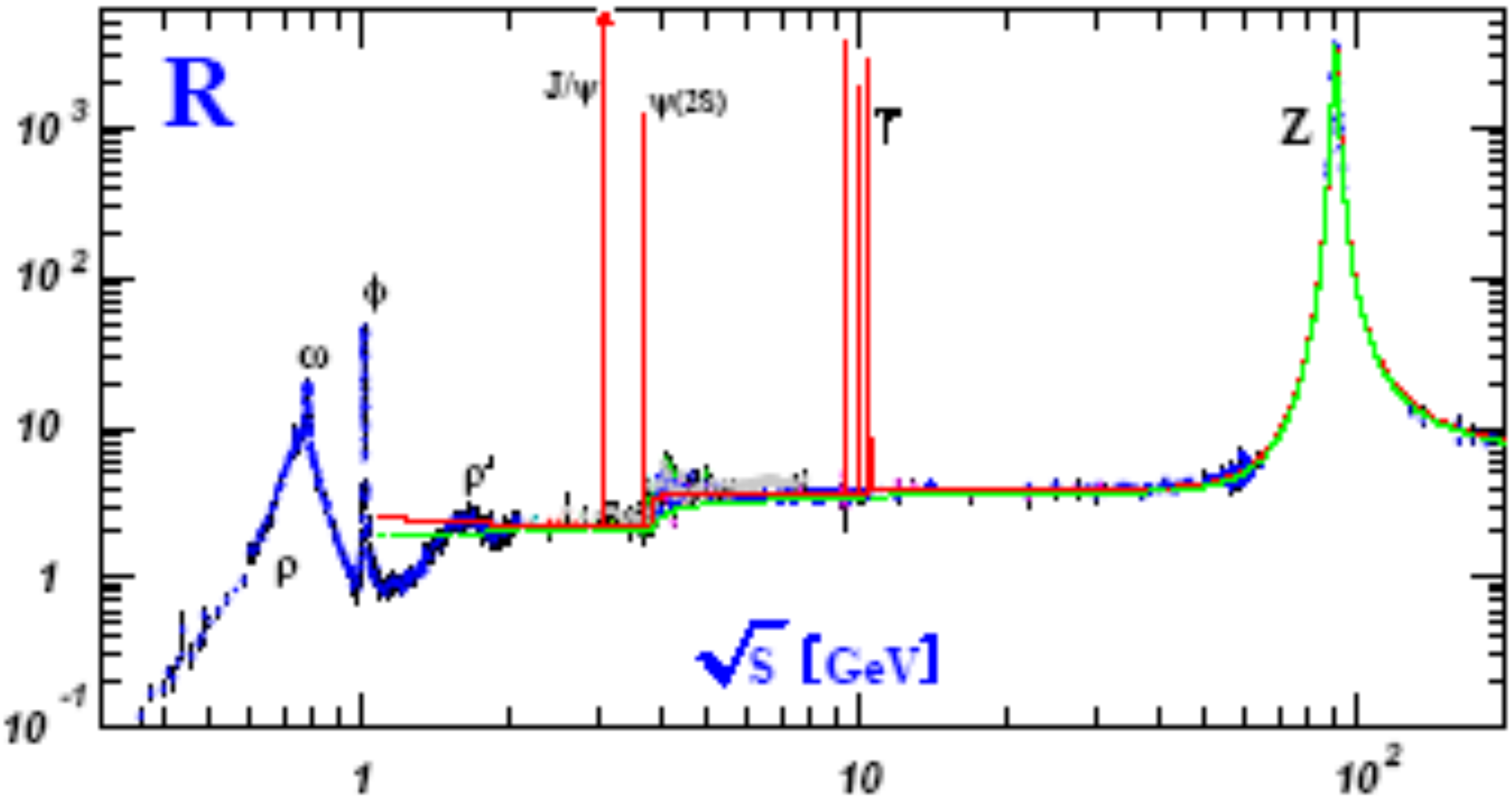
$$\begin{cases} C_{VV} = Q_f^2 - 2\,Q_f v_e v_f \,\mathrm{Re}(\chi) + (v_e^2 + a_e^2)\, v_f^2\, |\chi|^2 \\ C_{AA} = (v_e^2 + a_e^2)\, a_f^2\, |\chi|^2 \\ \chi(s) = \dfrac{G_F}{8\sqrt{2}\,\pi\,\alpha}\;\dfrac{s\, m_Z^2}{s - m_Z^2 + i\, m_Z \Gamma_Z} \end{cases}$$

$$R_{QCD} = R_{QPM}\left\{1 + \underbrace{\frac{\alpha_s}{\pi}}_{\sim 5\%} + \mathbb{C}_2 \underbrace{\left(\frac{\alpha_s}{\pi}\right)^2}_{\sim 0.4\%} + \cdots\right\}$$

$$\mathbb{C}_2(\overline{MS}) = 1.986 - 0.115\, N_f$$



$\alpha_s = 0.142 \pm 0.018$ $\quad$ $\sin^2\theta_W = 0.220 \pm 0.025$



R
J/ψ
ψ(2S)
ϒ
Z
ϕ
ω
ρ
ρ'
10^3
10^2
10
1
10^{-1}
1
10
10^2
√s [GeV]

LEPTONES

* NUMERO LEPTONICO *

$L_l = 1 \quad (L_{\bar{l}} = -1)$

$L_e \neq L_\mu \neq L_\tau$

$L_e + L_\mu + L_\tau$: CONSERVADA

⋮

CIENTOS DE HADRONES !

- EXPERIMENTO → HADRONES TIENEN ESTRUCTURA INTERNA !

✱ COMPONENTES : QUARKS

$q \quad (\bar{q})$

u, d, s, c, b, t

✱ OTRA CARGA : COLOR

"ESPECTROSCOPIA"

(qqq)

$p \equiv u u d$

$n \equiv u d d$

$(q\bar{q})$

$\pi^{+} \equiv u \bar{d}$

$\pi^{-} \equiv \bar{u} d$

CADA PARTICULA $\longrightarrow$ SU ANTIPARTICULA

$(E = mc^2)$

- q
- l

- $\bar{q}$
- $\bar{l}$

BOSONES

MEDIADORES

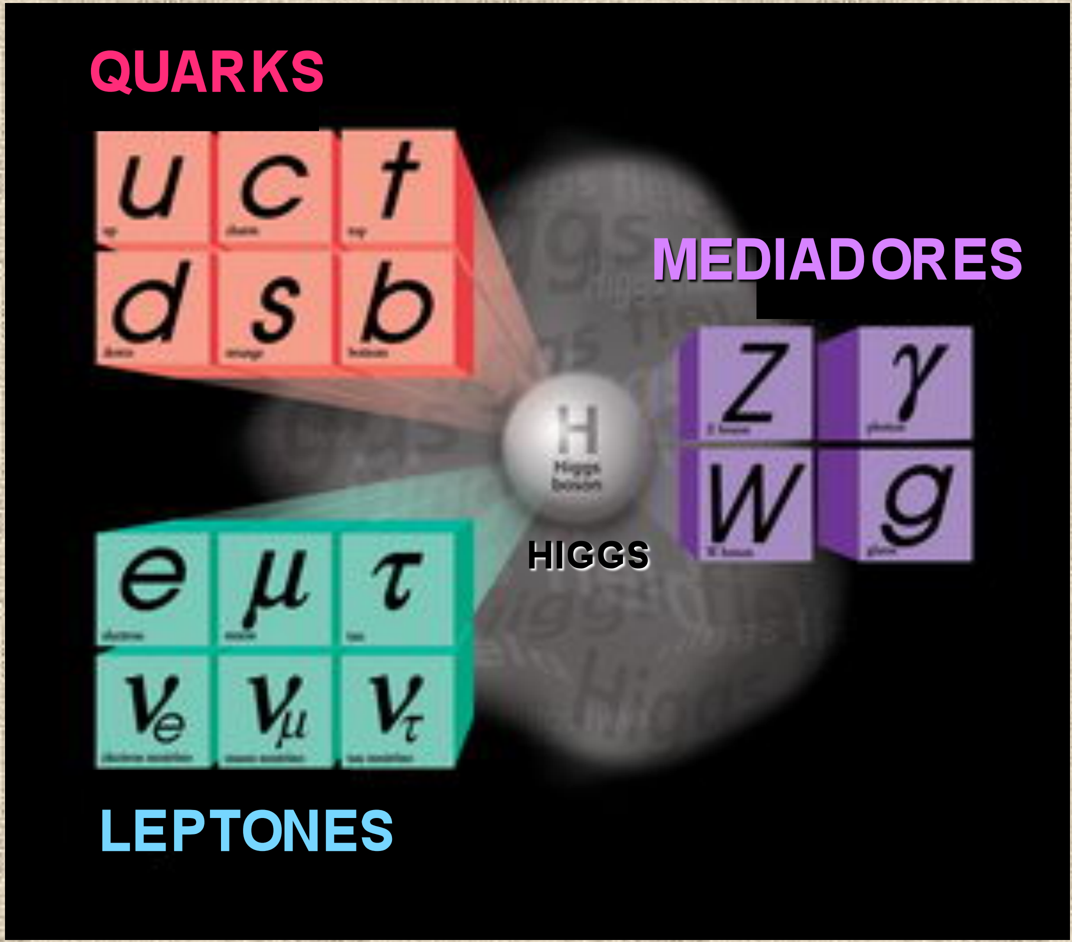
(INTERMEDIARIOS DE LAS INTERACCIONES)

$S = 1$

HIGGS

(INERCIA)

$S = 0$


QUARKS
u c t
d s b
MEDIADORES
Z γ
W g
HIGGS
e μ τ
ν_e ν_μ ν_τ
LEPTONES