

# MODELO DE CONTACTO PARA ENTENDER A LA CROMODINÁMICA CUÁNTICA Y SUS IMPLICACIONES

Marco Antonio Bedolla Hernández

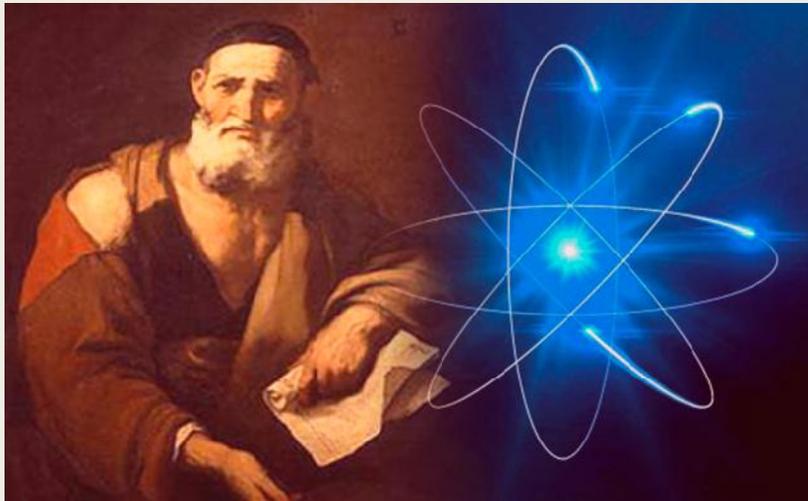
# ¿QUÉ ES UN QUARK?

¿De qué esta hecha la materia?



# El átomo

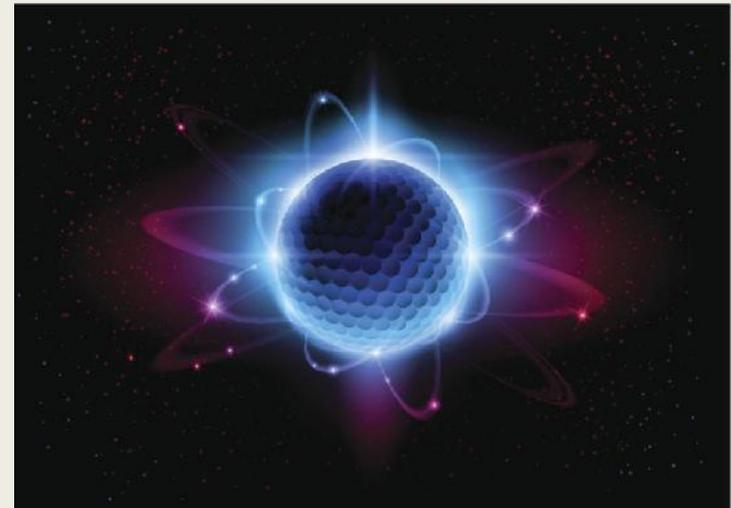
¿Qué pasa si dividimos un trozo de materia?



Leucipo de Mileto – Siglo V a.C.

La materia está formada por átomos diferentes arreglados en configuraciones distintas.

Se debería llegar a una partícula indivisible.



Átomon: á – sin, tomon – división.

# El átomo

Tiempo después Aristóteles descarta esa idea y propone cuatro elementos.



Aristóteles - Siglo IV a.C.

Ahora la materia estaba formada por aire, fuego, agua y tierra.



Los cuatro elementos.

Sus ideas permanecieron vigentes durante más de 2000 años.

# Tabla periódica de los elementos

grupo 1											13	14	15	16	17	18		
1											5	6	7	8	9	10		
1											Boro	Carbono	Nitrógeno	Oxígeno	Flúor	Neón		
2											Aluminio	Silicio	Fósforo	Azufre	Cloro	Argón		
3											Galio	Germanio	Arsénico	Selenio	Bromo	Kriptón		
4											Indio	Estaño	Antimonio	Telurio	Iodo	Xenón		
5											Talio	Plomo	Bismuto	Polonio	Astato	Radón		
6											Nihonio	Flerovio	Moscovia	Livermorio	Teneso	Oganesson		
7											Roentgenio	Copernicio	Nihonio	Flerovio	Moscovia	Livermorio	Teneso	Oganesson

masa atómica o número másico del isótopo más estable: 55.845  
 número atómico: 26  
 electronegatividad: 1.83  
 1.ª energía de ionización en kJ/mol: 762.5  
 símbolo químico: Fe  
 nombre: Hierro  
 configuración electrónica: [Ar] 3d<sup>6</sup> 4s<sup>2</sup>

- metales alcalinos
- alcalinotérreos
- otros metales
- metales de transición
- lantánidos
- actínidos
- metaloideos
- no metales
- halógenos
- gases nobles
- elementos desconocidos
- masas de elementos radiactivos entre paréntesis



- Notas**
- 1 kJ/mol ≈ 96.485 eV.
  - Todos los elementos tienen un estado de oxidación implícito cero.
  - Los estados de oxidación de los elementos 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117 y 118 son predicciones.
  - Las configuraciones electrónicas de los elementos 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117 y 118 son predicciones.

138.90547	140.116	140.90765	144.242	(145)	150.36	151.964	157.25	158.92535	162.500	164.93033	167.259	168.93426	173.054
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb
Lantano	Cerio	Praseodimio	Neodimio	Prometio	Samario	Europio	Gadolinio	Terbio	Disprosio	Holmio	Erbio	Tulio	Itterbio
(227)	232.0376	231.03689	238.02891	(237)	(244)	(243)	(247)	(247)	(251)	(252)	(257)	(258)	(259)
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No
Actinio	Torio	Protactinio	Uranio	Neptunio	Plutonio	Americio	Curio	Berkelio	Californio	Einsteinio	Fermio	Mendelevio	Nobelio

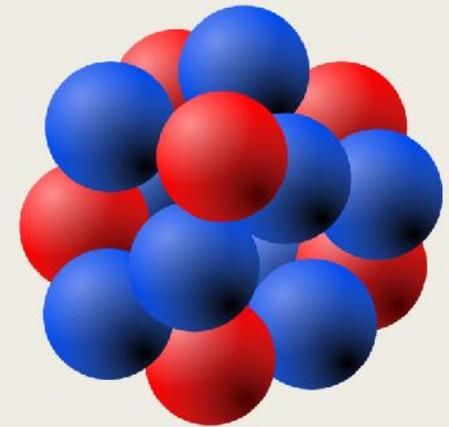
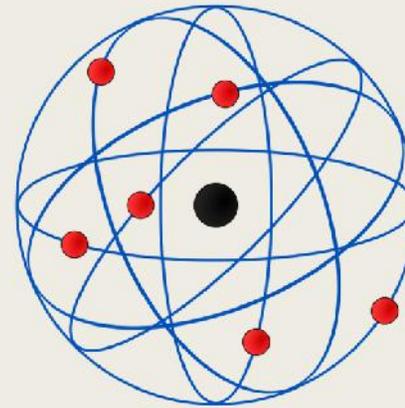
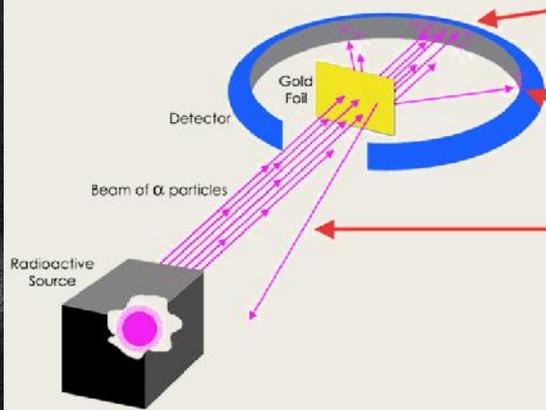
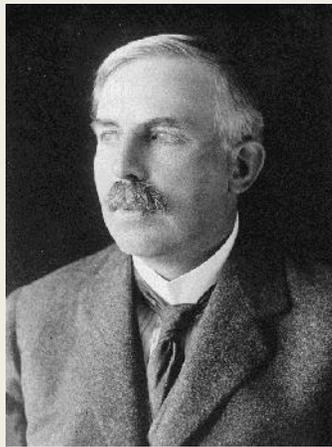


Original file: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Periodic\\_table\\_large-es.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Periodic_table_large-es.svg)

# El átomo

Colisión de partículas alfa  
contra láminas de oro.

Descubrió que gran parte  
del núcleo está vacío con  
un centro bastante denso.



Ernest Rutherford- 1918

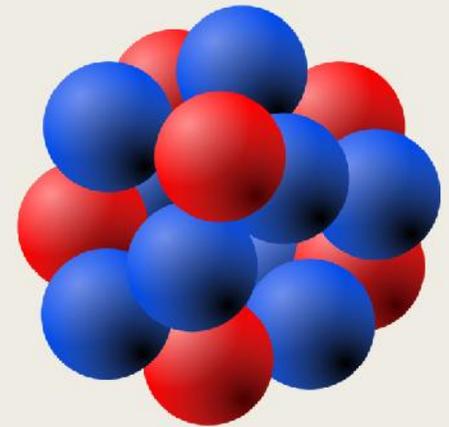
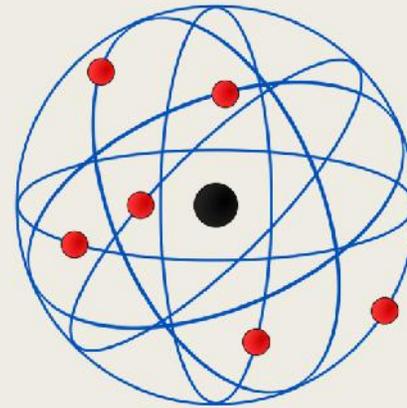
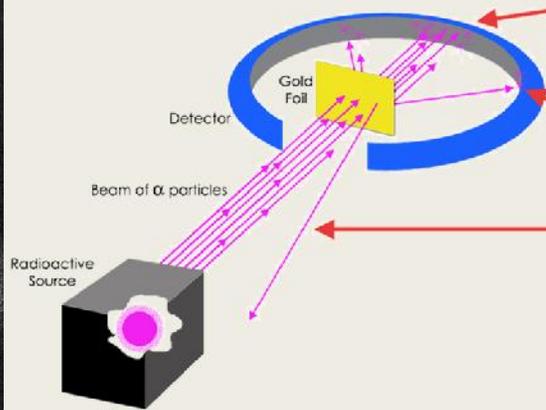
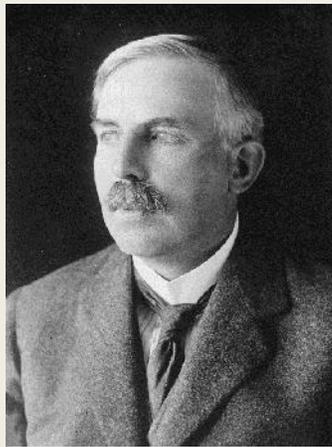
Átomo de Rutherford

Descubrió que el núcleo átomo de hidrógeno solo es  
partícula de carga positiva: el protón.

# El átomo

Colisión de partículas alfa  
contra láminas de oro.

Descubrió que gran parte  
del núcleo está vacío con  
un centro bastante denso.



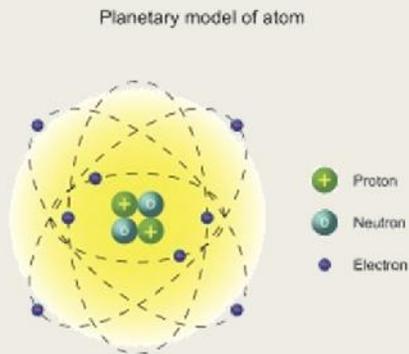
Ernest Rutherford - 1918

El núcleo de Helio tenía dos protones, entonces propuso la existencia de una partícula neutra que evitaría que el núcleo decayera.

Átomo de Rutherford

# El nucleón

Todos los átomos estaban compuestos por electrones, protones y neutrones (nucleones).



Modelo planetario del átomo

¿Debería haber una interacción lo suficientemente fuerte para mantener nucleones unidos en el núcleo.

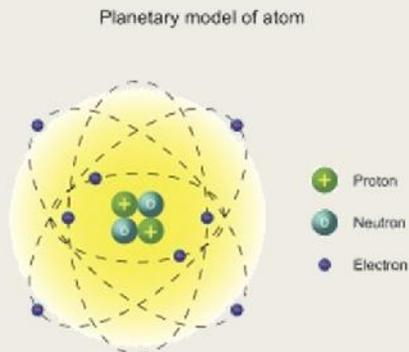


Hideki Yukawa - 1934

Hipotetizó a una partícula 200 veces más pesada que el electrón, encargada de mantener unidos a los nucleones: mesón

# El nucleón

Todos los átomos estaban compuestos por electrones, protones y neutrones (nucleones).



Modelo planetario del átomo

¿Debería haber una interacción lo suficientemente fuerte para mantener nucleones unidos en el núcleo.



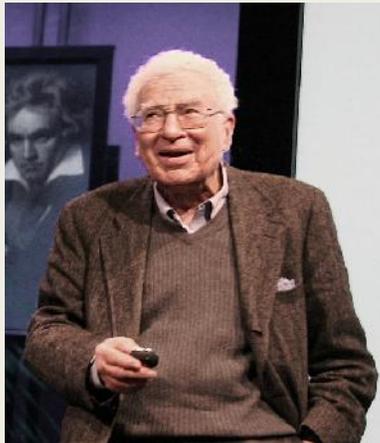
Hideki Yukawa - 1934

El pion fue descubierto en 1947. A partir de ese momento se descubrieron un zoológico de partículas nuevas...



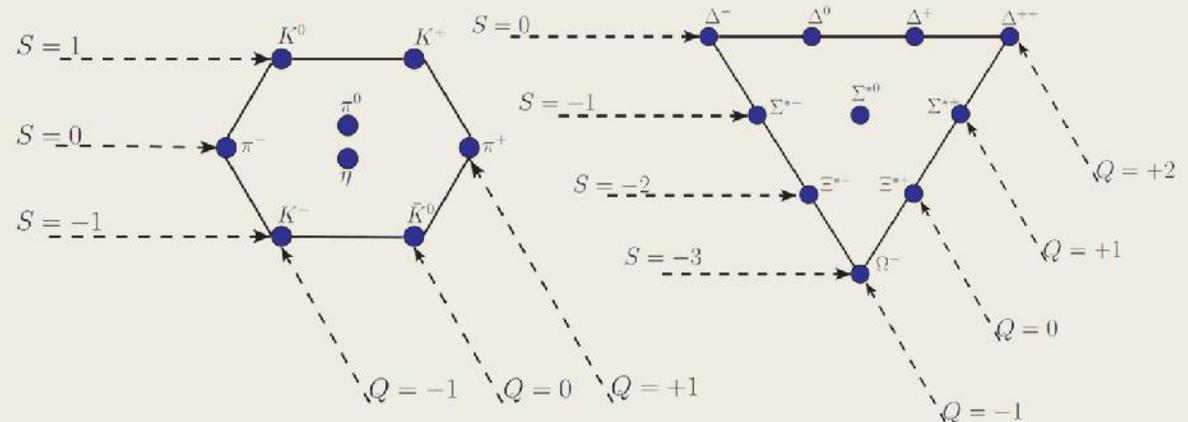
# El hadrón

Para 1960 se habían descubierto una cantidad exagerada de hadrones.



Murray Gell-Mann en 2007

Gell-Mann propuso acomodar los hadrones en términos de su carga y extrañeza.

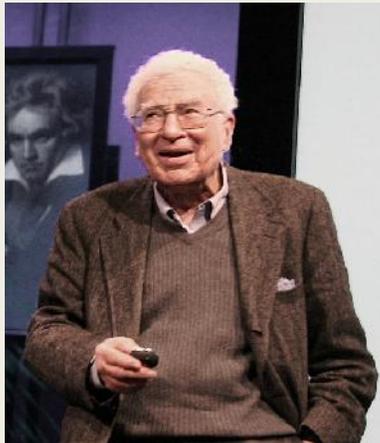


Camino Óctuple de mesones – Decuplete de bariones

Predijo una nueva partícula que aún no había sido descubierta:  $\Omega^-$ . Fue descubierta en 1964.

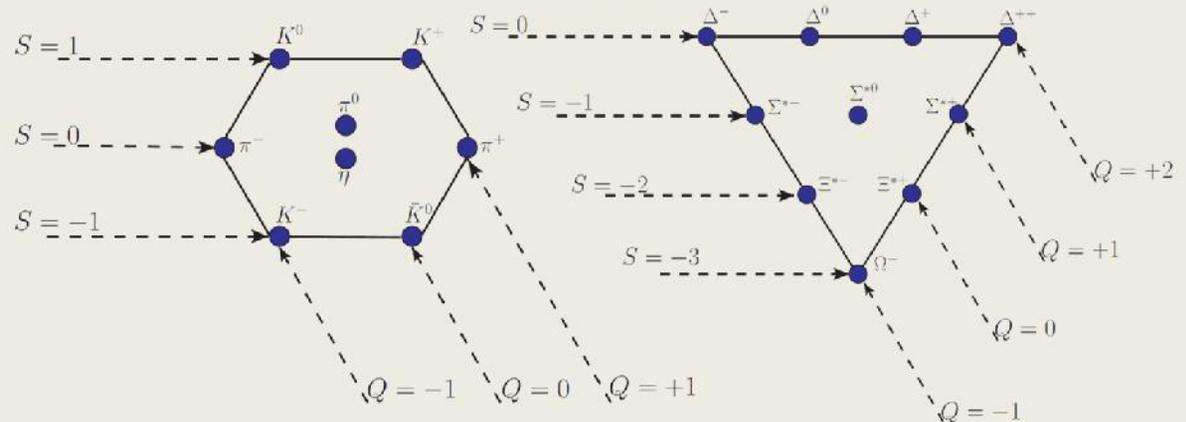
# El quark

En 1964 propuso que los hadrones están compuestos por quarks.



Murray Gell-Mann en 2007

Con tres quarks distintos: *up*, *down* y *strange*, era posible explicar toda la materia conocida



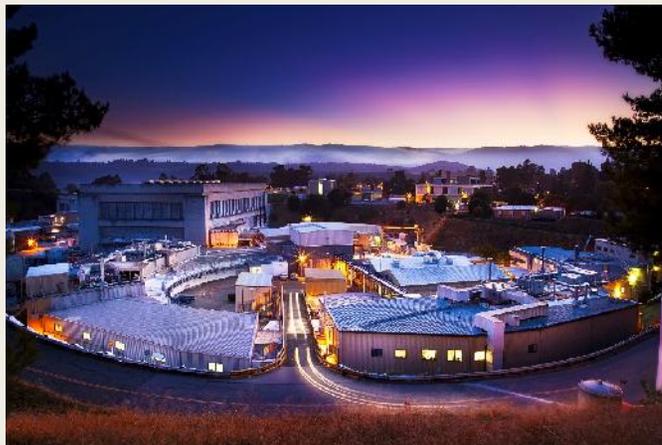
Camino Óctuple de mesones – Decuplete de bariones

Como los bariones tienen carga entera, los quarks deberían tener carga semientera:  $2/3$  para *up*,  $-1/3$  para *down* y *strange*.



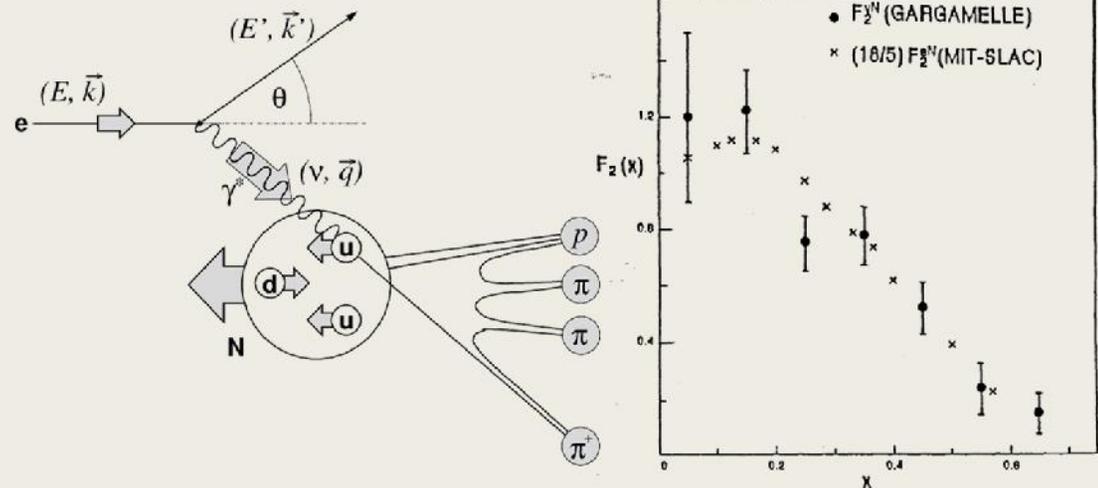
# El quark otra vez

¿Son reales los quarks o solamente un bello artilugio matemático?



SLAC en la actualidad

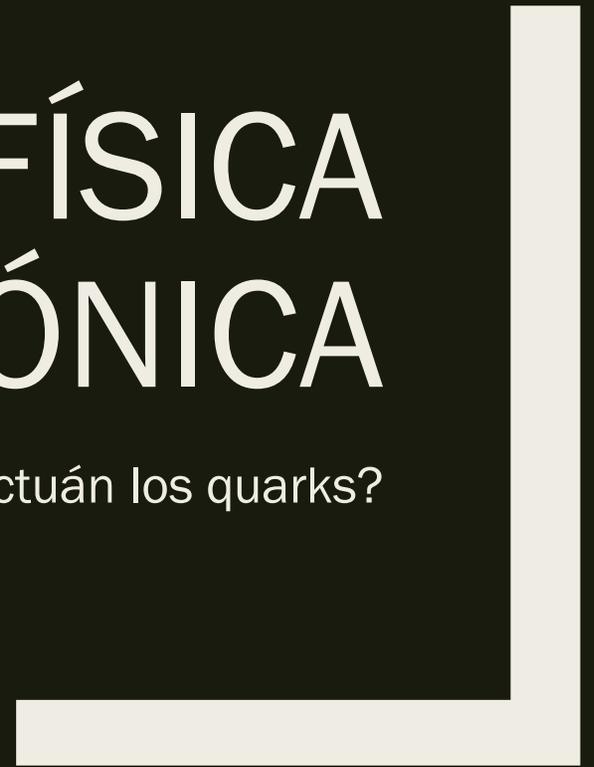
Se encontró que los protones estaban formados por tres bultos pequeños.



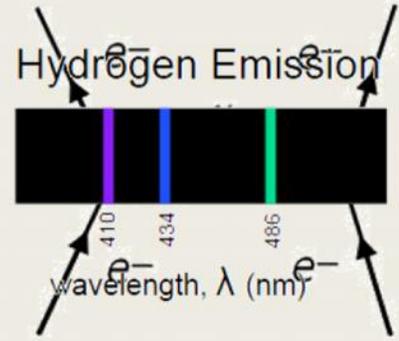
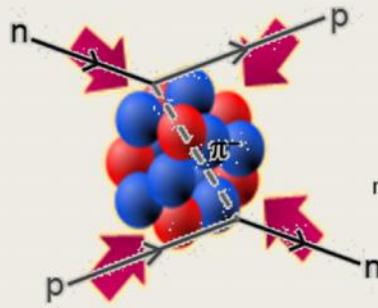
Para 1970, los quarks dejaron de ser un objeto matemático a formar parte del grupo de las partículas fundamentales.

# QCD Y FÍSICA HADRÓNICA

¿Cómo interactúan los quarks?

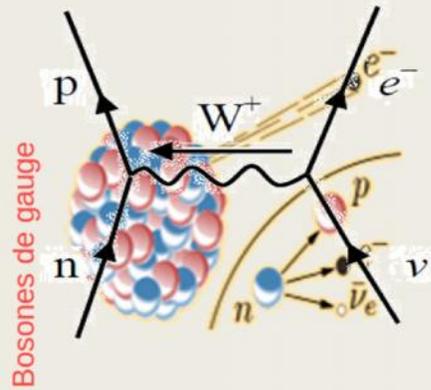
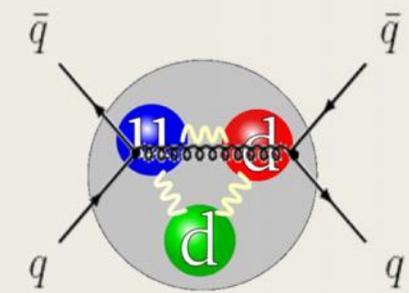


# QCD y Física Hadrónica



Tres generaciones de la materia (fermiones)

	I	II	III	
masa →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
carga →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
espín →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nombre →	<b>u</b> arriba	<b>c</b> encanto	<b>t</b> cima	<b>γ</b> fotón
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quarks	<b>d</b> abajo	<b>s</b> extraño	<b>b</b> fondo	<b>g</b> gluón
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Leptones	<b>ν<sub>e</sub></b> neutrino electrónico	<b>ν<sub>μ</sub></b> neutrino muónico	<b>ν<sub>τ</sub></b> neutrino tauónico	<b>Z<sup>0</sup></b> bosón Z
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>e</b> electrón	<b>μ</b> muón	<b>τ</b> tauón	<b>W<sup>±</sup></b> bosón W

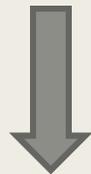


Bosones de gauge

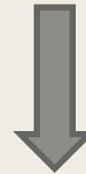
# QCD y Física Hadrónica

- El modelo estándar se describe por los grupos:

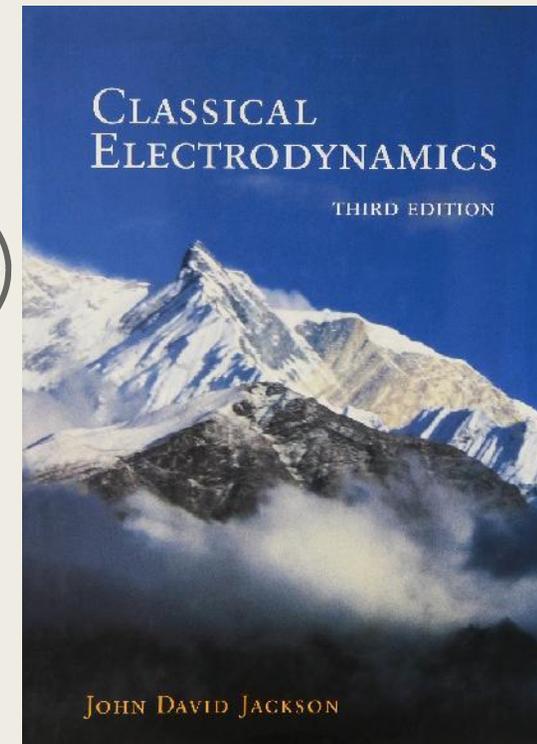
$$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$



Regímenes  
Interacciones  
perturbativos y no  
fuertes  
perturbativos



Interacciones  
electromagnéticas  
perturbativas



# QCD y Física Hadrónica

- Para estudiar las interacciones fuertes se introduce una nueva carga: el color.
- Esta carga es la responsable de mantener a los quarks unidos y confinados.
- La carga total se obtiene al combinar las cargas individuales de la simetría SU(3).
- Los tres estados principales de la carga de color son:  $r, g, b$  ( $c, y, m$ )

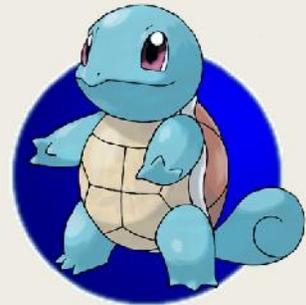
$$r = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$



$$g = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$



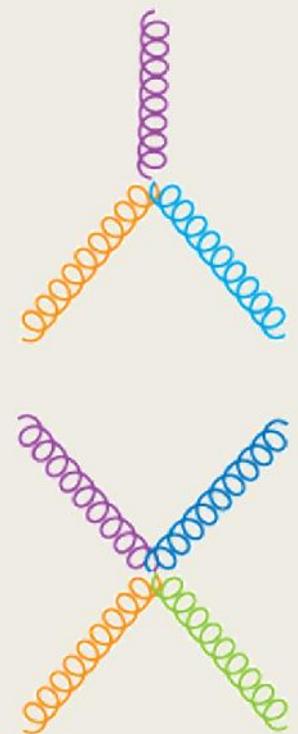
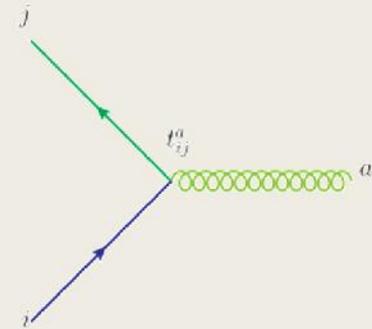
$$b = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$



# QCD y Física Hadrónica

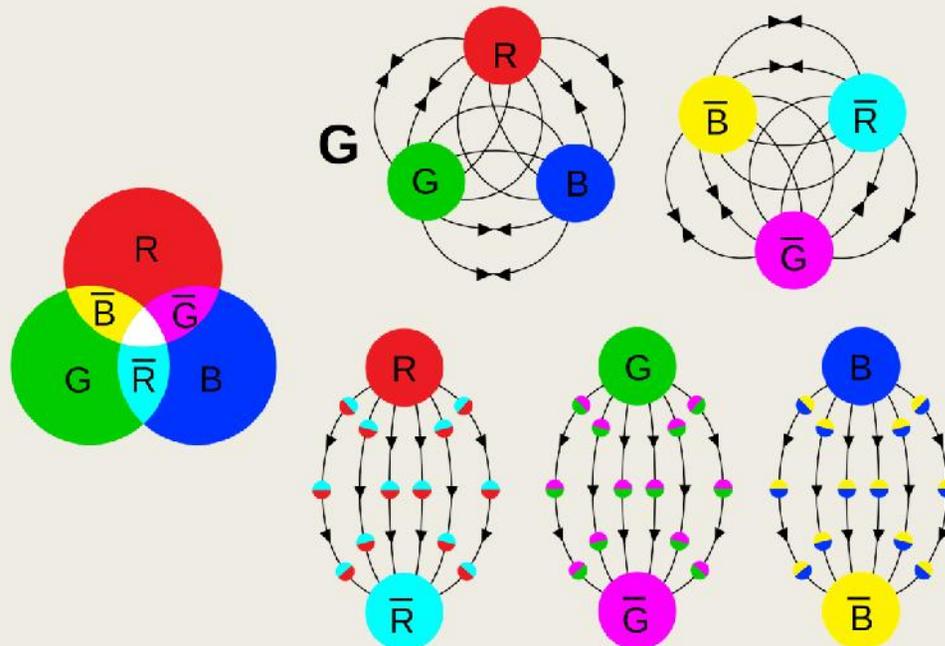
- Los gluones son los agentes intermediarios de la interacción entre quarks.
- Son similares a los fotones: tienen masa 0, espín igual a 1 y dos estados de polarización.
- Existen 8 tipos de gluones que surgen de la simetría de  $SU(3)$ .

$$\begin{array}{ccc}
 \lambda_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} & \lambda_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i & 0 \\ i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} & \lambda_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\
 \lambda_4 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} & \lambda_5 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & i \\ 0 & 0 & 0 \\ i & 0 & 0 \end{pmatrix} & \lambda_6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \\
 \lambda_7 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i \\ 0 & i & 0 \end{pmatrix} & \lambda_8 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix} & 
 \end{array}$$



# QCD y Física Hadrónica

- Los hadrones son las partículas de color neutro compuestas por quarks debido a las interacciones fuertes mediante gluones.
- Los mesones son partículas compuestas por un par quark-antiquark.
- Los bariones están compuestos por tres quarks.

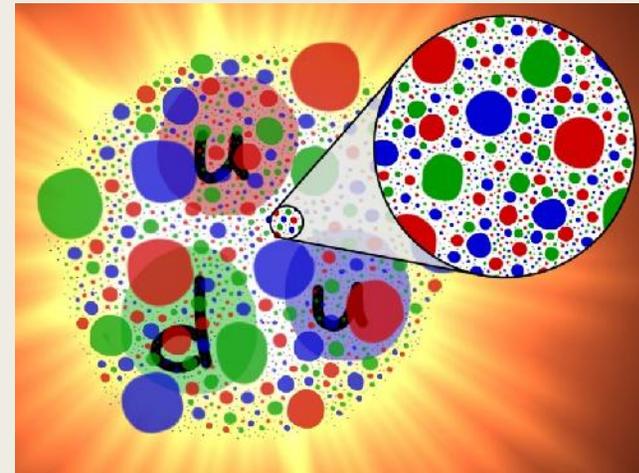
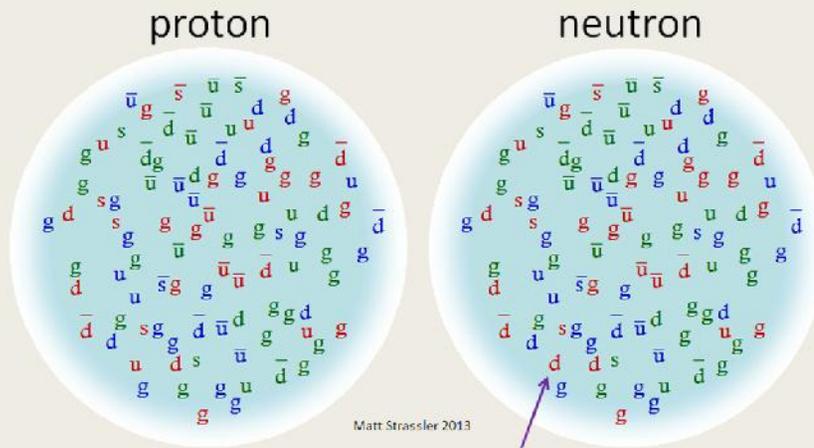




# QCD y Física Hadrónica

Experimentos a muy altas energías han demostrado que la estructura de los hadrones es aún más compleja.

Dentro de los hadrones se están creando y destruyendo constantemente pares de partículas, manteniendo siempre los tres quarks de valencia.



# QCD y Física Hadrónica

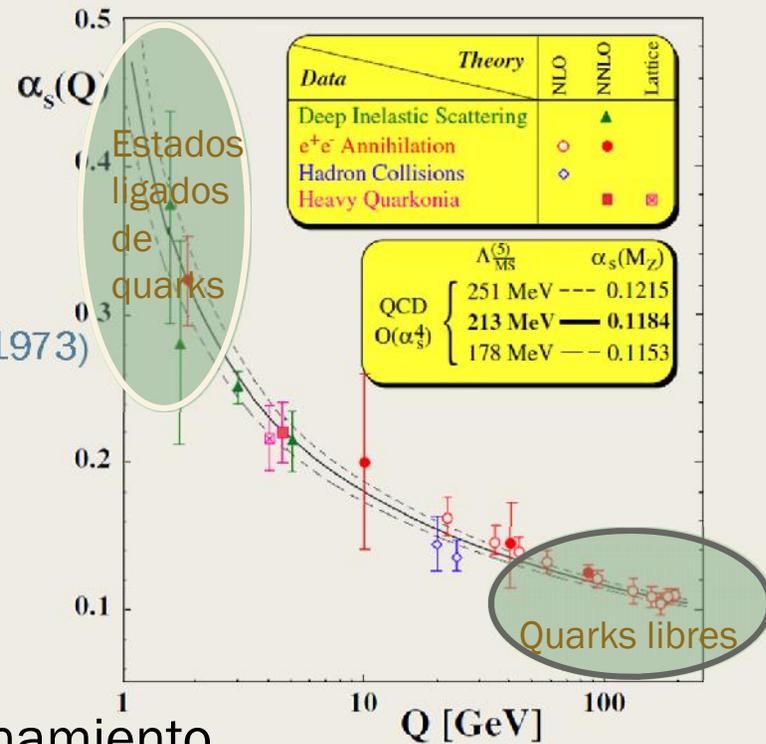
- QCD es una poderosa herramienta perturbativa para transferencia de momentos grandes debido a la libertad asintótica.

David Gross and Frank Wilczek,  
Phys. Rev. D 8, 3633(1973)

David Politzer Phys. Rev. Lett. 30, 1346 (1973)



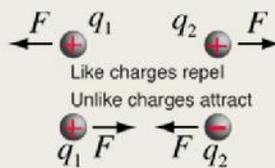
- En el infrarrojo, surgen:  
Generación de masas, confinamiento.



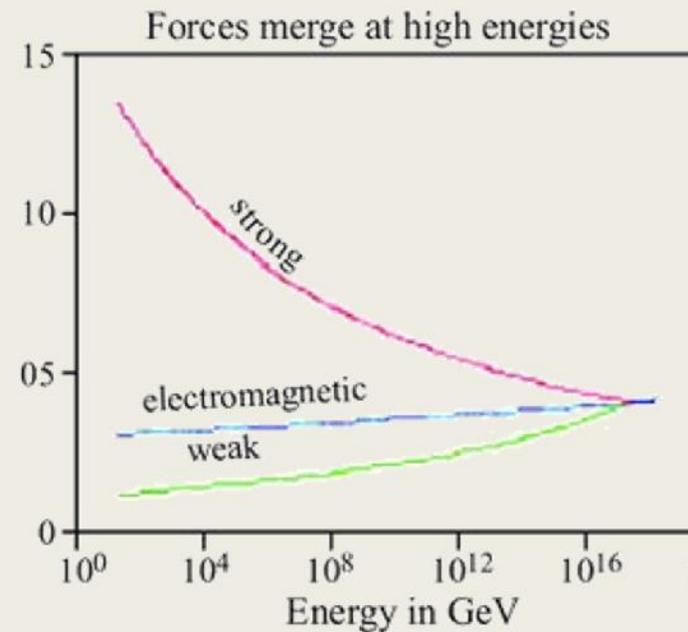
# QCD y Física Hadrónica

- En comparación, las interacciones electromagnéticas y débiles tienen aumentan a altas energías

- Por ejemplo, cuando acercamos dos cargas, la atracción entre ellos se vuelve más intensa.


$$F = \frac{kq_1q_2}{r^2} = \frac{q_1q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad \text{Coulomb's Law}$$

- A muy altas energías, las fuerzas se unifican volviéndose una sola.



# ECUACIONES DE SCHWINGER-DYSON

Las ecuaciones de movimiento del quark



# Ecuaciones de Schwinger-Dyson(ESD)

- Las ecuaciones de Schwinger-Dyson (ESD) son las ecuaciones de movimiento de una teoría cuántica de campos.

F. J. Dyson The S-Matrix in Quantum Electrodynamics Phys. Rev. 75, 1736(1949)

J. Schwinger On Green's Functions of Quantized Fields I, II, PNAS 37 452-459 (1951)

*«There is a great satisfaction in building good tools for other people to use!»*

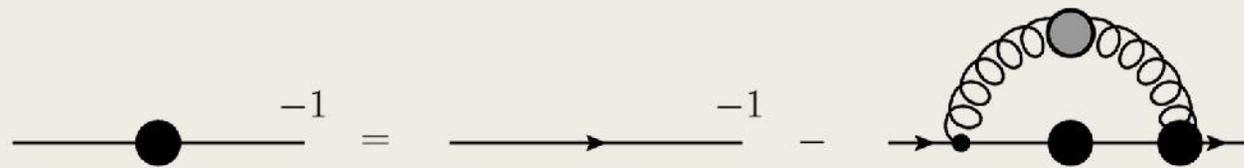


$$\int \mathcal{D}[\varphi] \frac{\delta}{\delta \varphi} = 0$$

- Son ideales para estudiar:
  - Confinamiento de quarks y gluones.
  - Rompimiento dinámico de la simetría quiral.
  - Libertad asintótica

# Ecuaciones de Schwinger-Dyson(ESD)

ESD quark:  $\int \mathcal{D}[\varphi] \frac{\delta}{\delta \varphi} = 0$



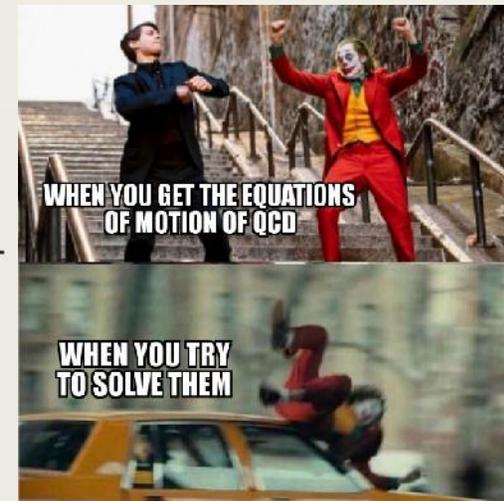
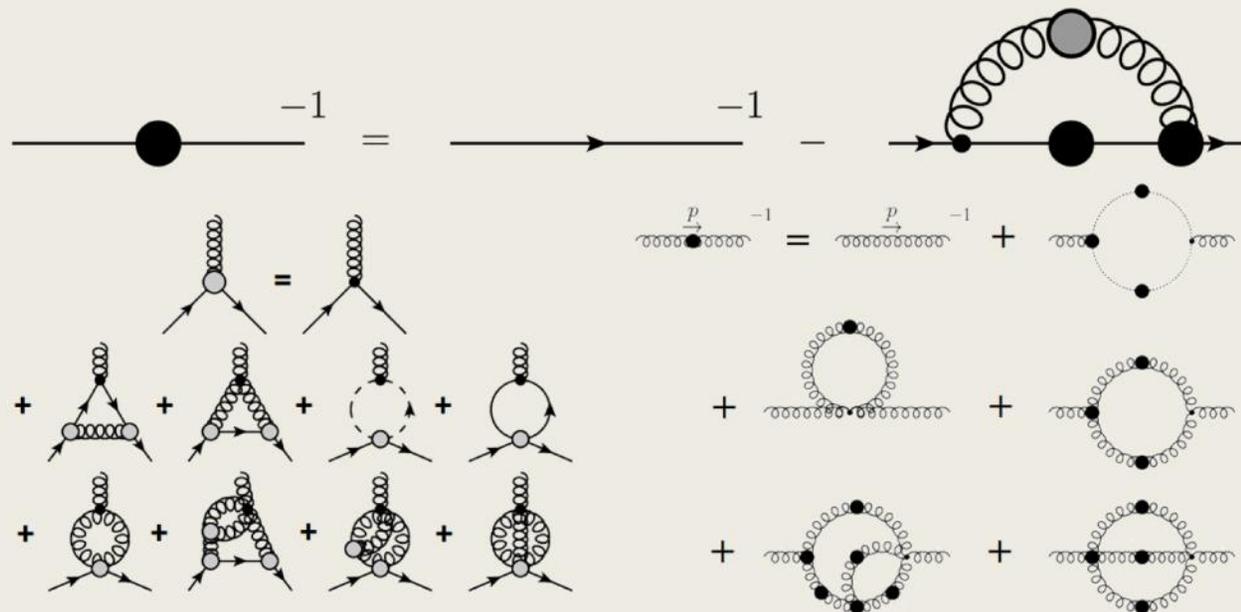
Matemáticamente:

$$S_f^{-1}(p) = i\gamma \cdot p + m_f + \Sigma_f(p)$$

$$\Sigma_f(p) = \int \frac{d^4k}{(2\pi)^4} g^2 \gamma_\mu D_{\mu\nu}(p-k) \frac{\lambda^a}{2} S_f(k) \Gamma_\nu^a(p,k)$$

# Ecuaciones de Schwinger-Dyson(ESD)

Ahora ya tenemos las ecuaciones de movimiento de QCD: un conjunto infinito de ecuaciones integrales no lineales acopladas



# Ecuaciones de Schwinger-Dyson(ESD)

Para resolver la ESD, se utiliza un esquema de truncamiento:

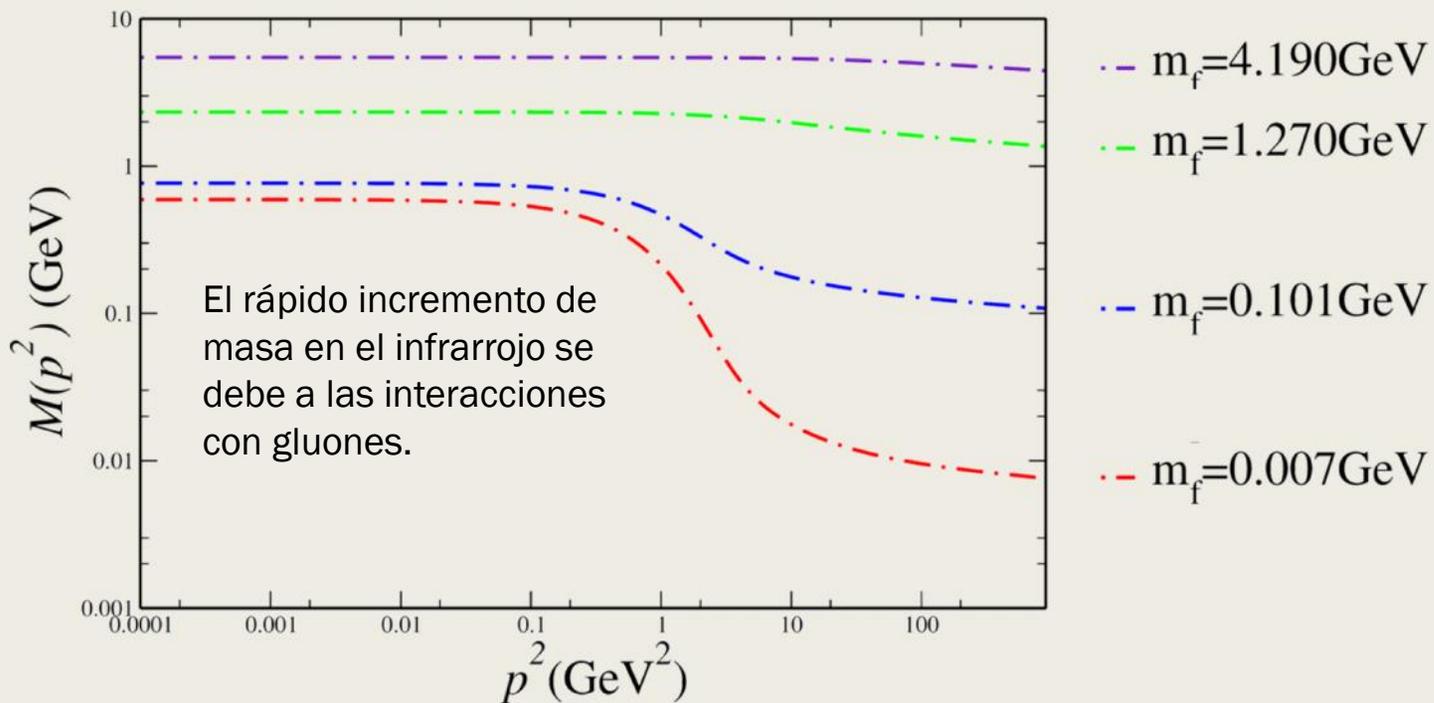
$$\begin{array}{c}
 \xrightarrow{S(p)}^{-1} = \xrightarrow{S_0(p)}^{-1} + \int \frac{D_{\mu\nu}(p-q)}{(2\pi)^4} \gamma_\mu \xrightarrow{S(q)} \Gamma_\mu(p,q)
 \end{array}$$

Aproximación arcoíris:

$$\begin{array}{c}
 \text{[Rainbow diagram]} = \text{[Effective coupling diagram]} \\
 \times \text{acoplamiento efectivo}
 \end{array}$$

# Ecuaciones de Schwinger-Dyson(ESD)

- El rompimiento dinámico de la simetría quiral se traduce en generación de masas a bajas energías.
- Este incremento es más notorio para quarks ligeros.



# Interacción de Contacto

- Usamos un modelo de contacto mediado por una interacción simple usada en:

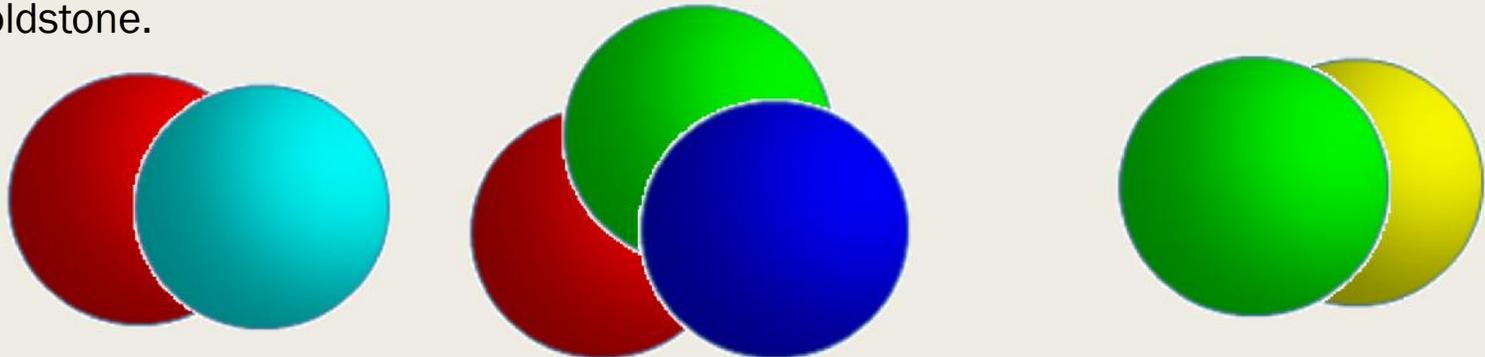
L. Xiomara Gutiérrez, et. al.

Phys. Rev. C81, 065202 (2010);

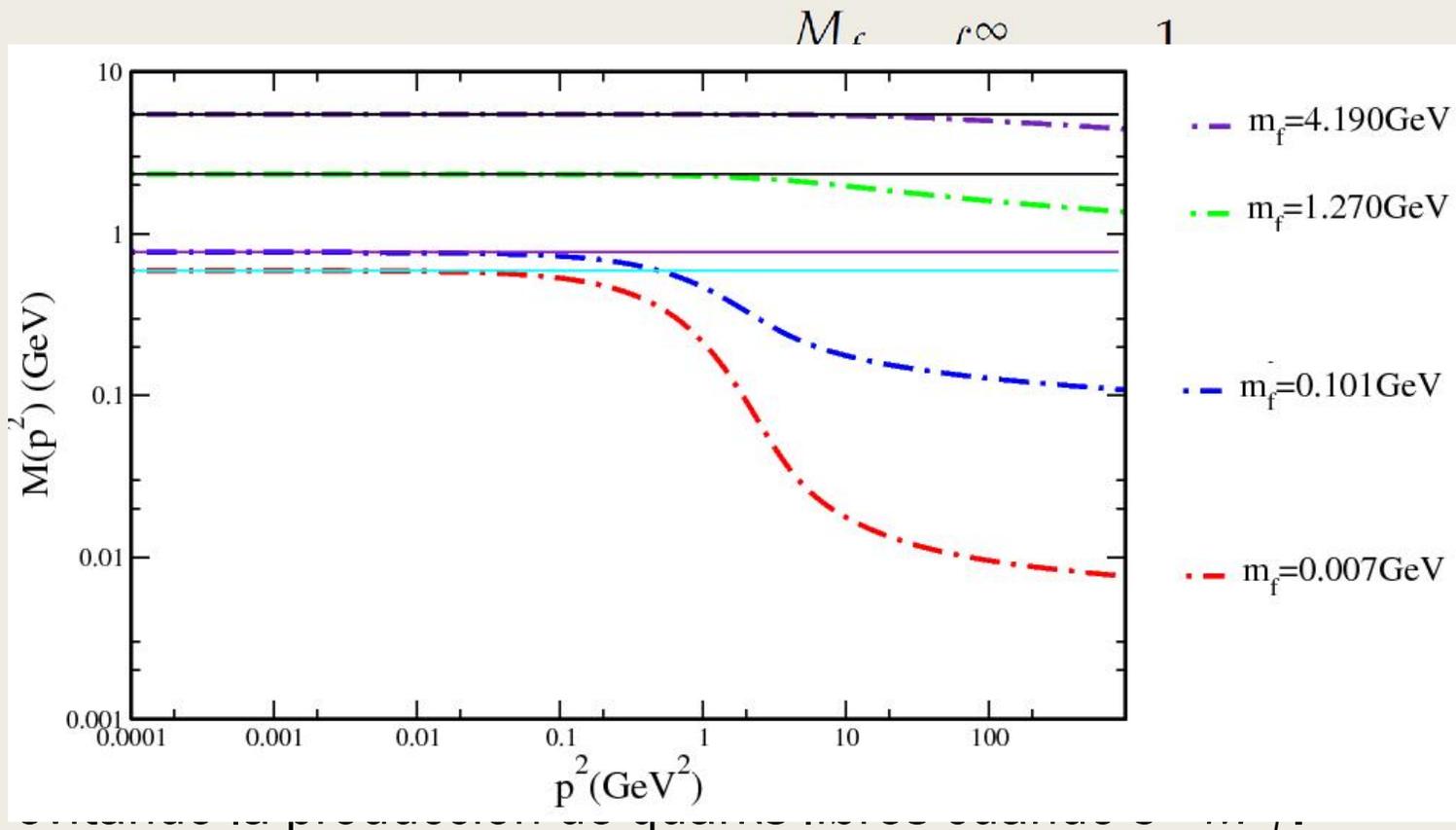
Phys. Rev. C82, 065202 (2010);

Phys. Rev. C83, 065206 (2011).

- Se basa en solo tres parámetros: la constante de acoplamiento entre quarks, un corte infrarrojo para indicar la escala de acoplamiento y un corte ultravioleta para identificar la escala de energía.
- Con este modelo podemos proveer estudios exploratorios de QCD y sus consecuencias como: generación dinámica e masas, confinamiento y bosones de goldstone.



# Interacción de Contacto

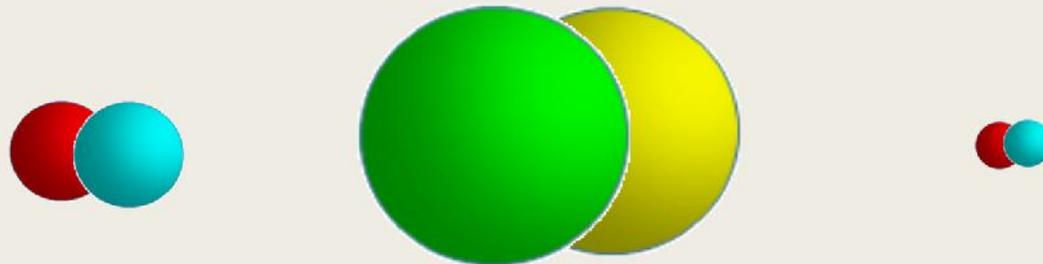


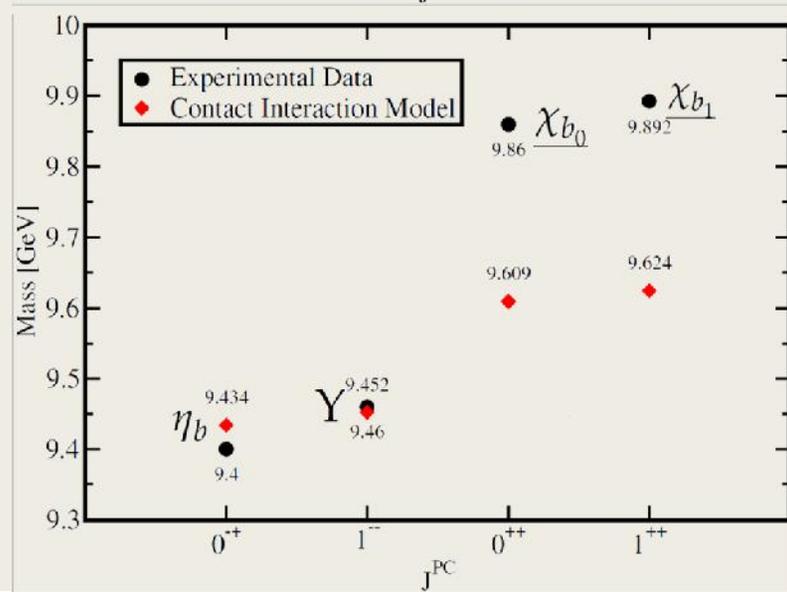
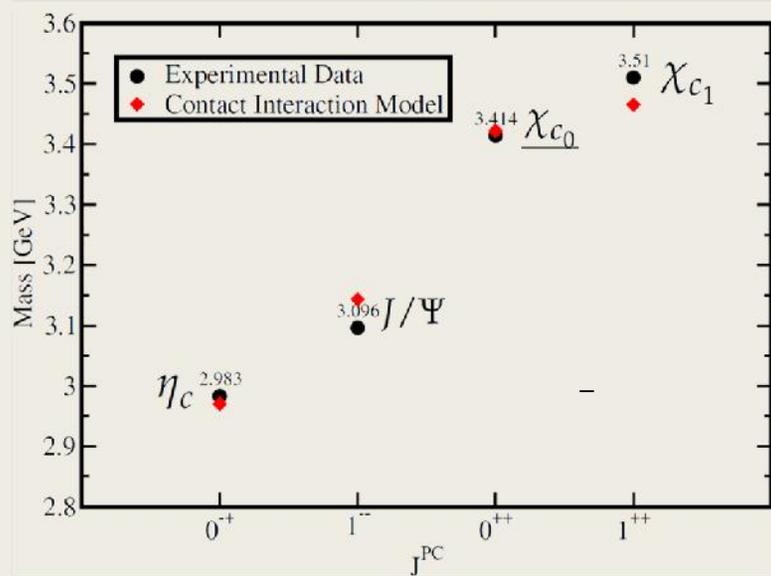
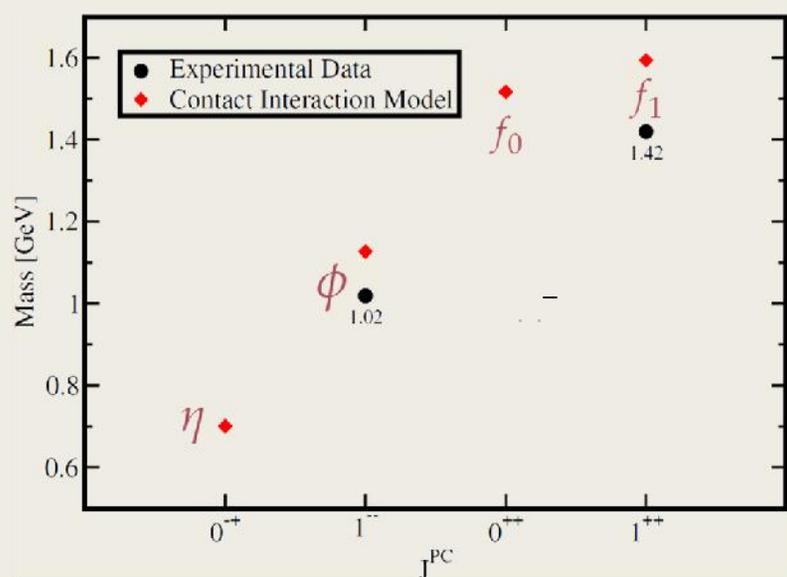
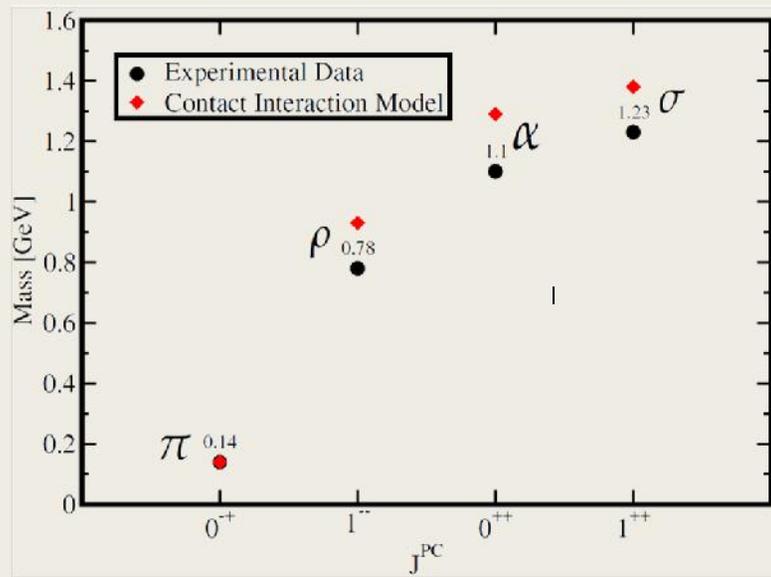
# Interacción de Contacto

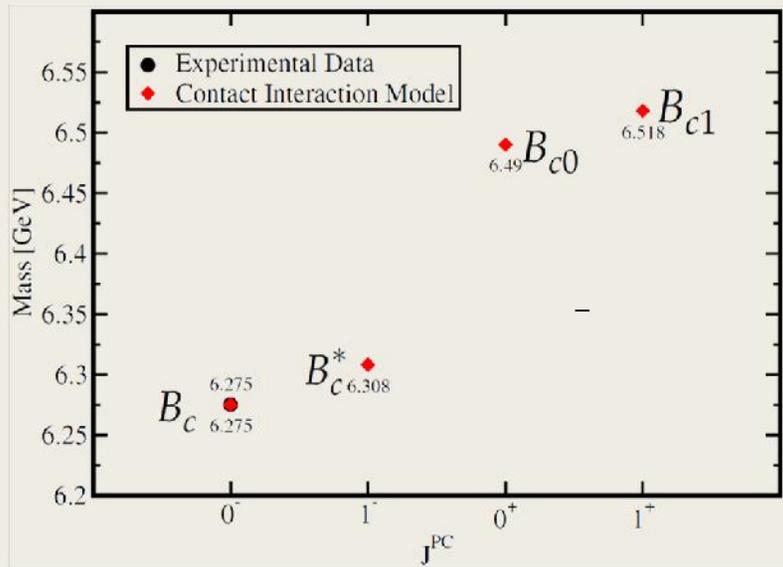
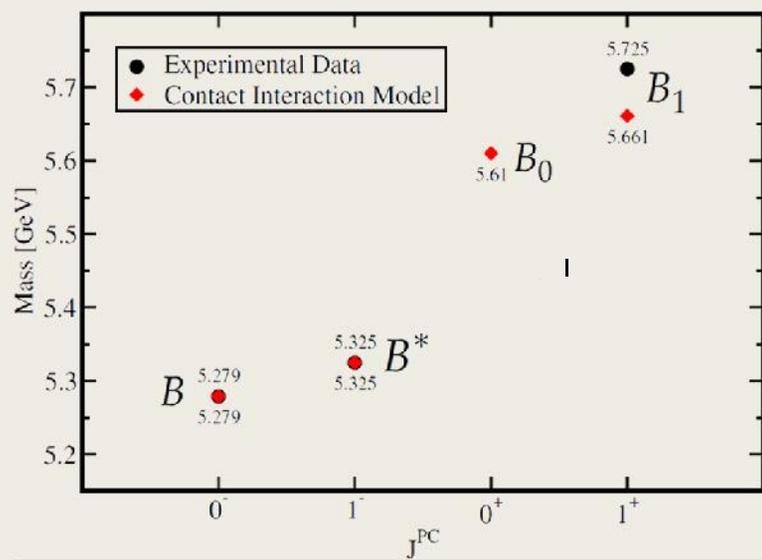
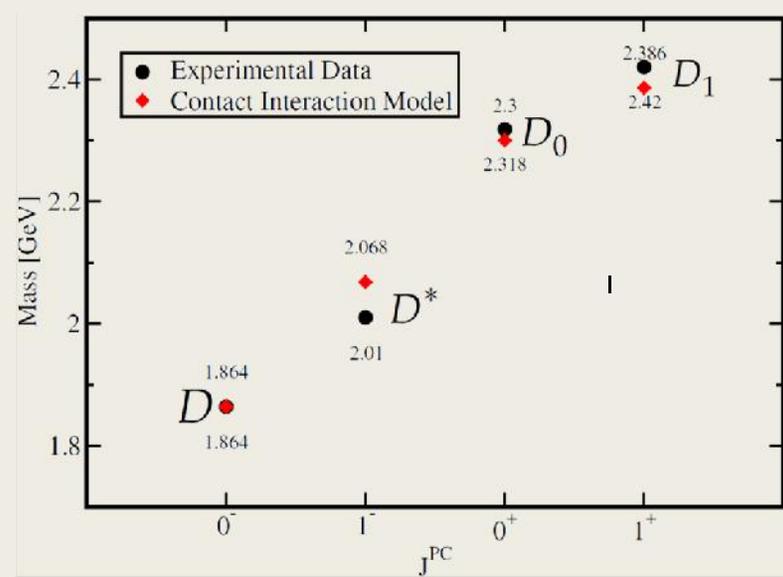
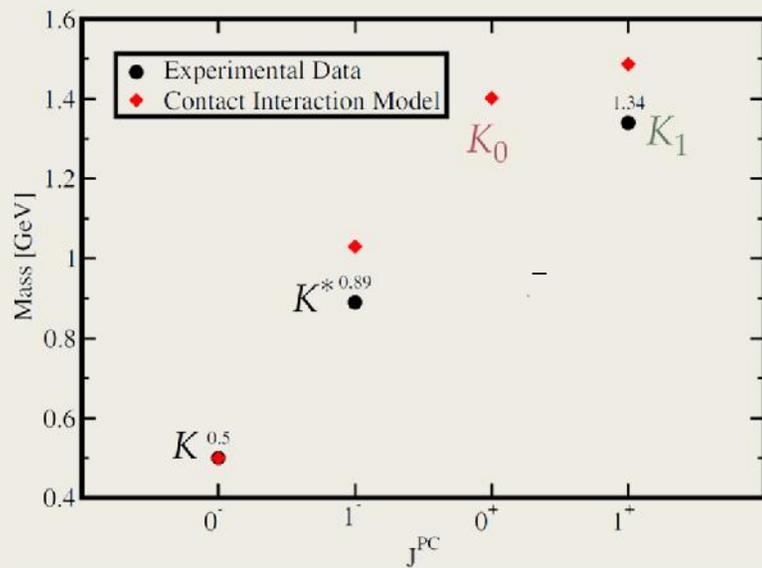
- En la interacción de contacto se obtiene una masa del quark constante, sin cola perturbativa.
- Por ello, pensamos que es ideal para estudiar quarks pesados.
- Al incrementar la masa entre los quarks, los mesones son más parecidos a una partícula puntual.
- Y la interacción entre quarks disminuye conforme estos están más cercanos.
- El acoplamiento se reduce y el corte ultravioleta se incrementa cuando se estudian mesones pesados.

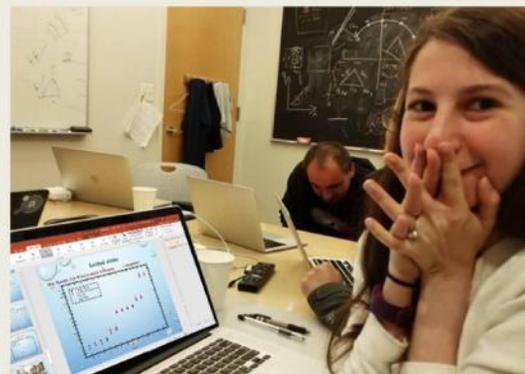
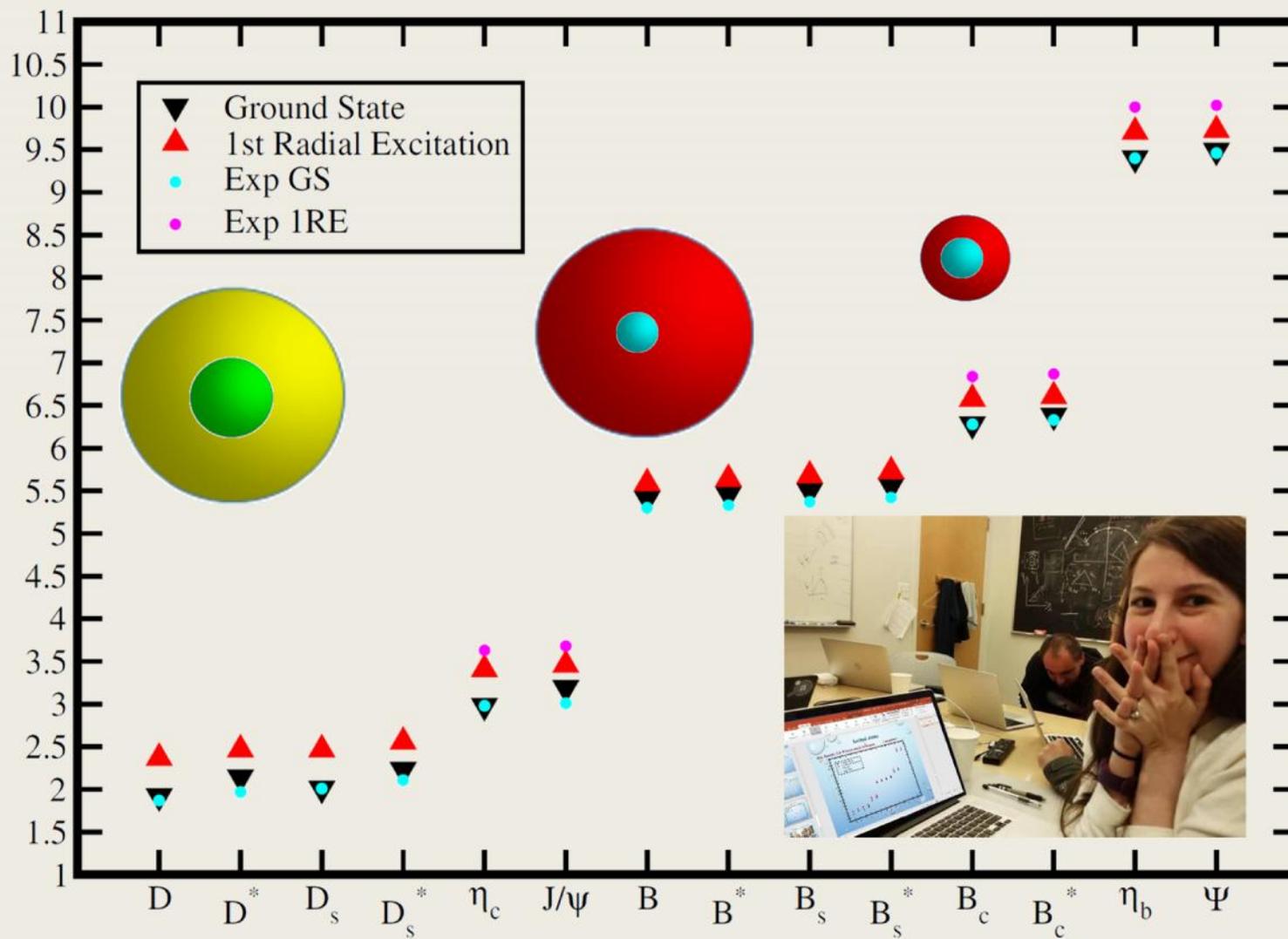
M.A. Bedolla, et. al  
M.A Bedolla, et. al.

Phys. Rev. D 92, 054031 (2015).  
Phys. Rev. D 93, 094025 (2016).



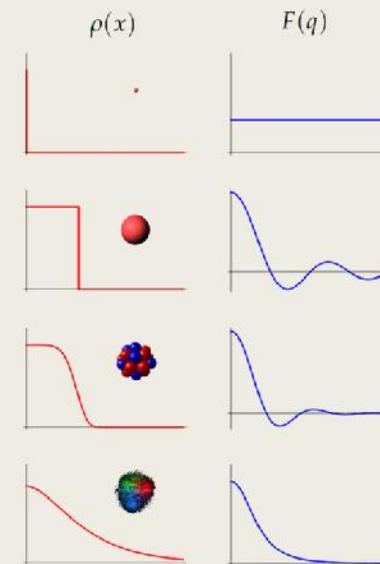
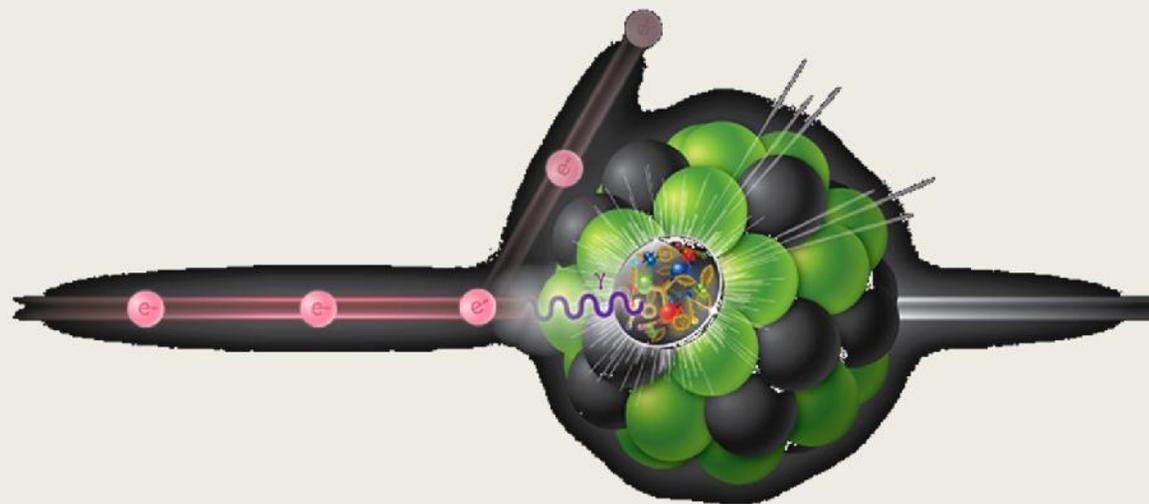






# Factores de Forma

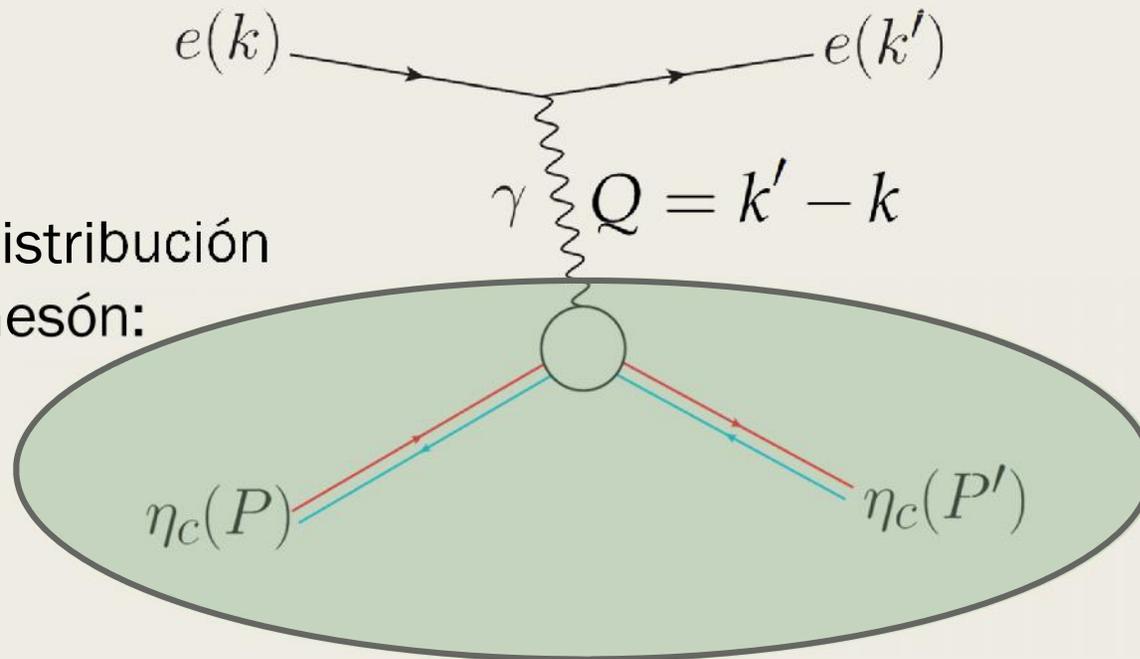
- Los factores de forma electromagnéticos describen la distribución de carga de las partículas.
- Estos se calculan experimentalmente colisionando electrones con la partícula que deseamos explorar.
- De este modo, podemos conocer la estructura interna de las partículas.



# Factores de Forma

La amplitud de transición para el proceso  $e\gamma \rightarrow e\gamma$ :

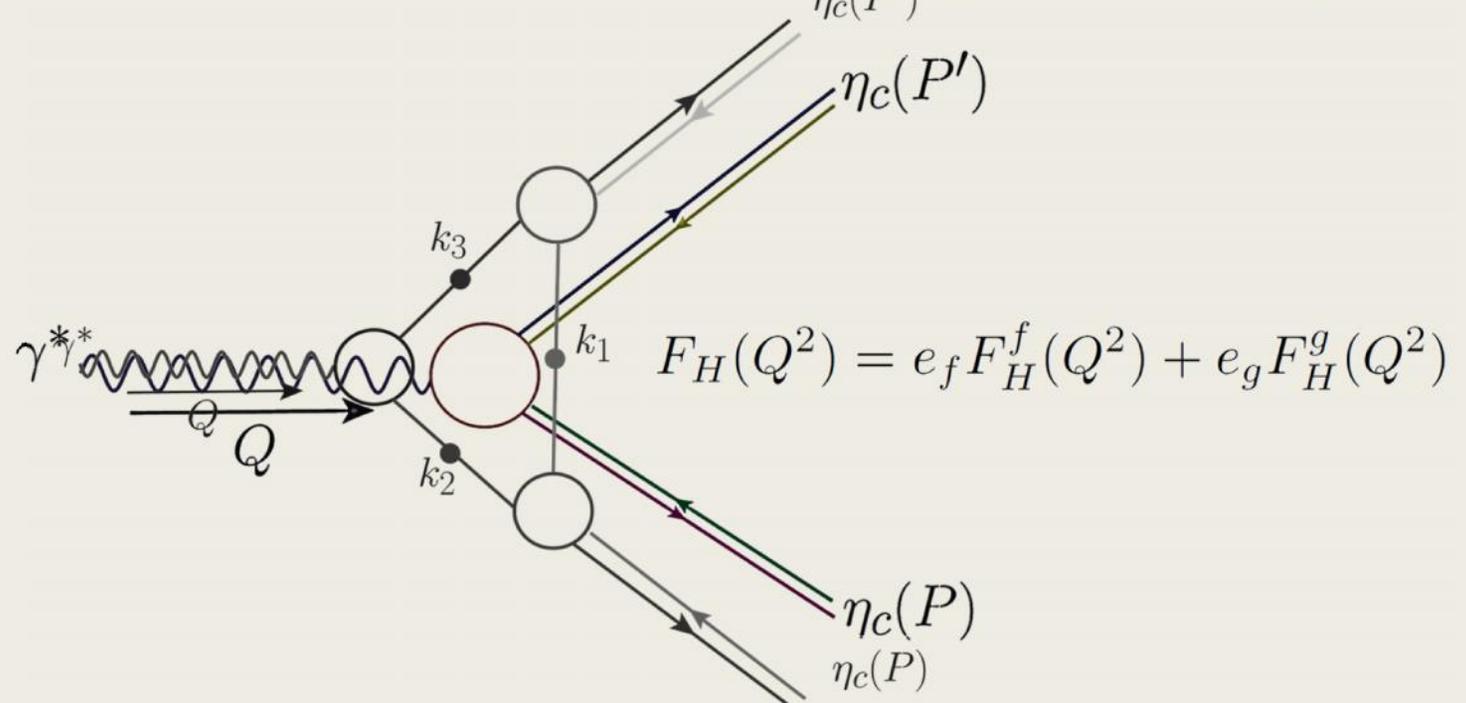
El fotón ve la distribución de carga del mesón:



# Factores de Forma

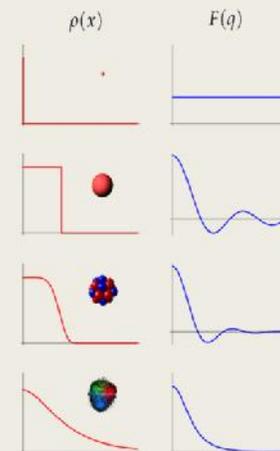
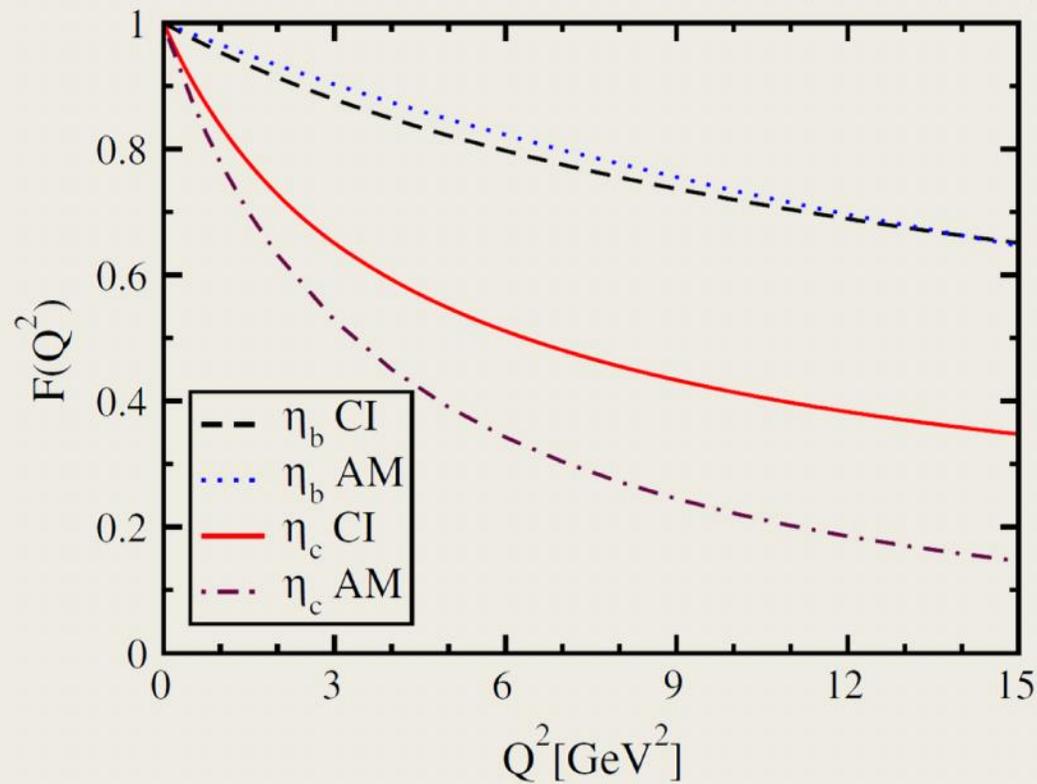
Una partícula con espín cero tiene solo un factor de

forma  $\langle \eta_c(P') | J_\mu | \eta_c(P) \rangle \equiv \Lambda_{\mu}^{\eta_c \gamma^*}(P', P; Q) \equiv F_{\eta_c}(Q^2) (P' + P)_\mu$



# Factores de Forma

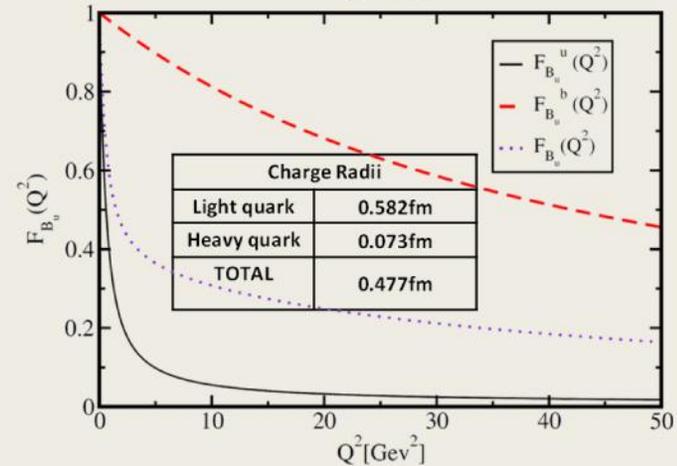
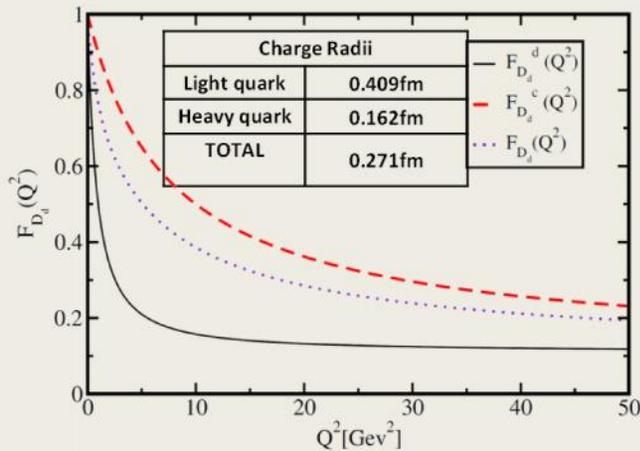
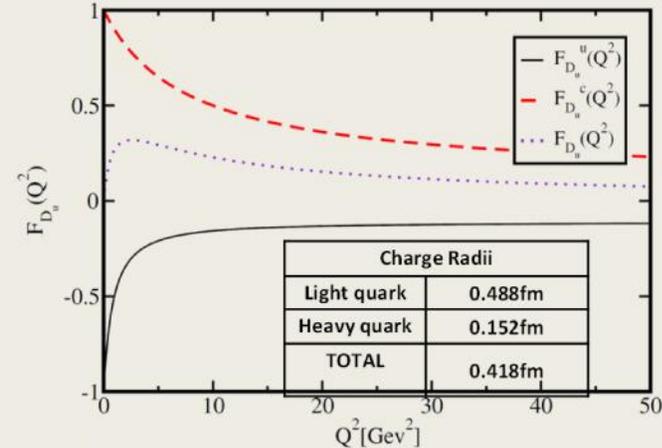
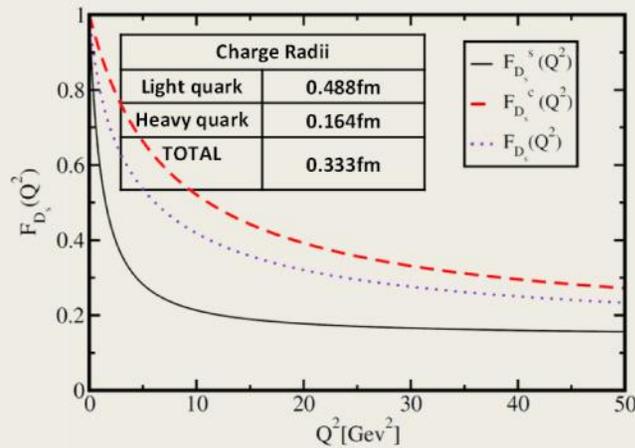
K. Raya, et. al *Few Body Syst.* 59 (2018) no.6, 133



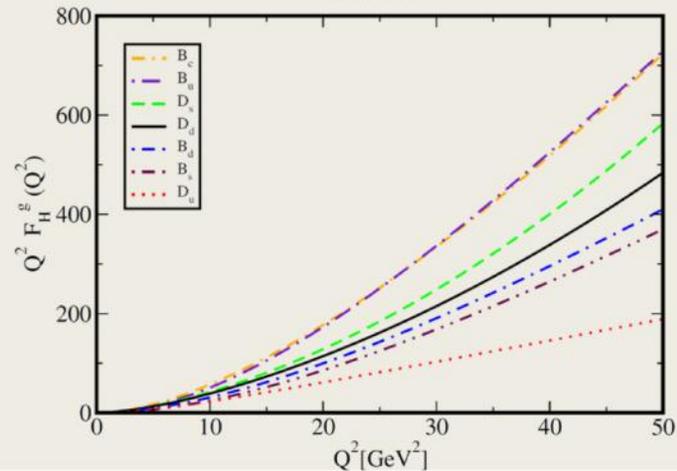
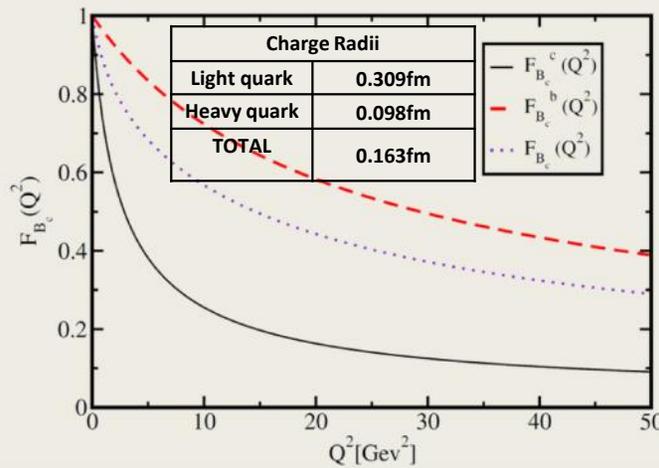
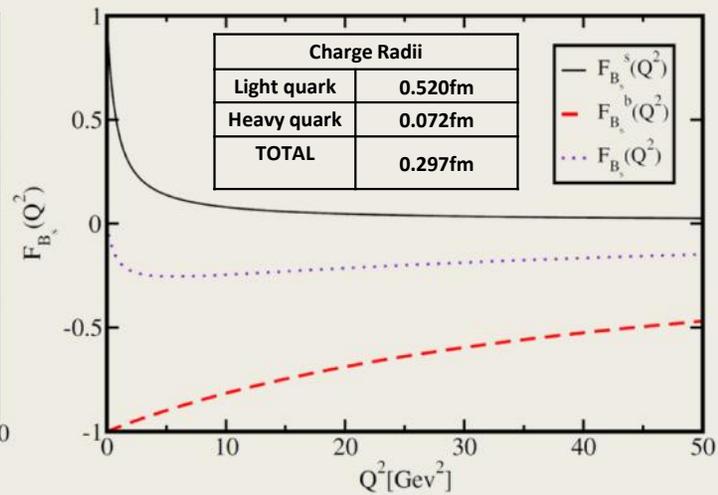
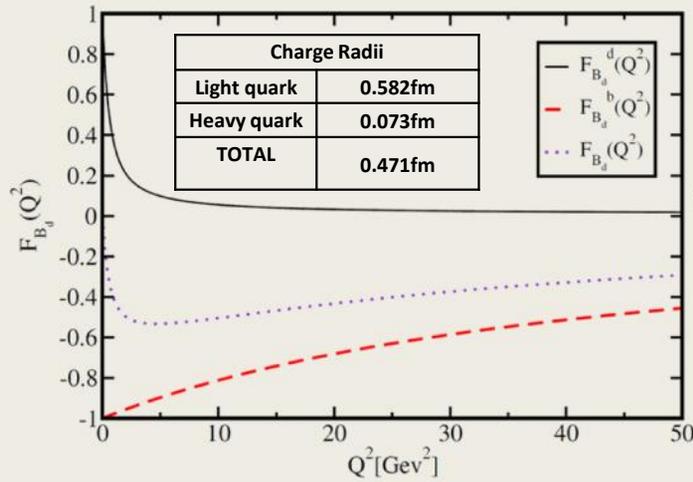
Charge Radii	
$y_b$	<b>0.107fm</b>
$y_c$	<b>0.210fm</b>

# Factor de Forma Elástico

$$F_H(Q^2) = e_f F_H^f(Q^2) + e_g F_H^g(Q^2)$$

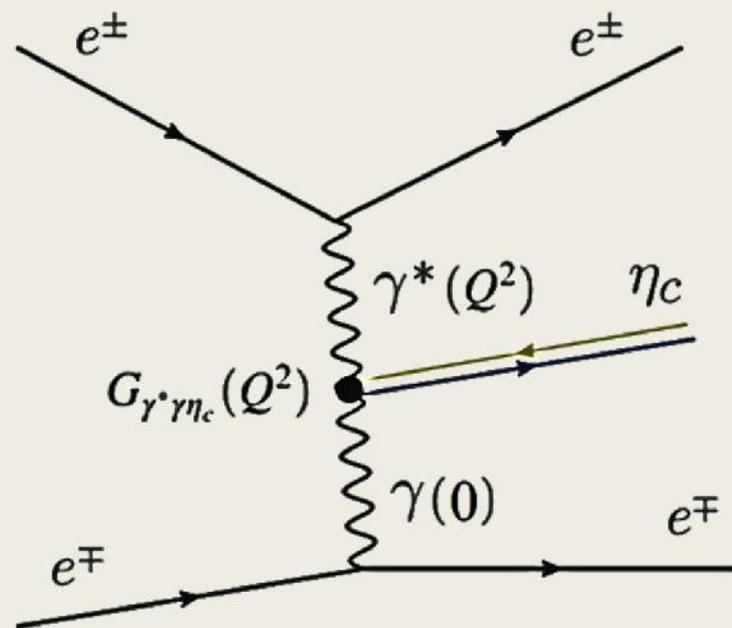


# Factor de Forma Elástico



# Factores de Forma

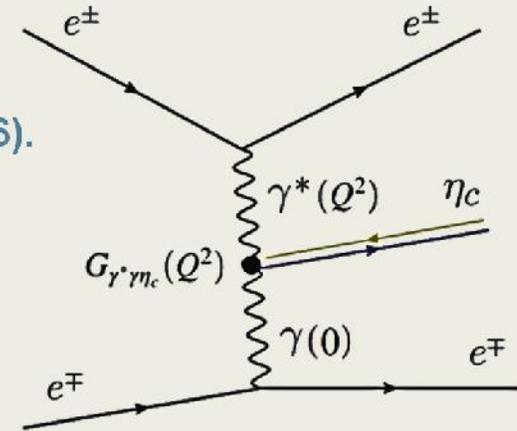
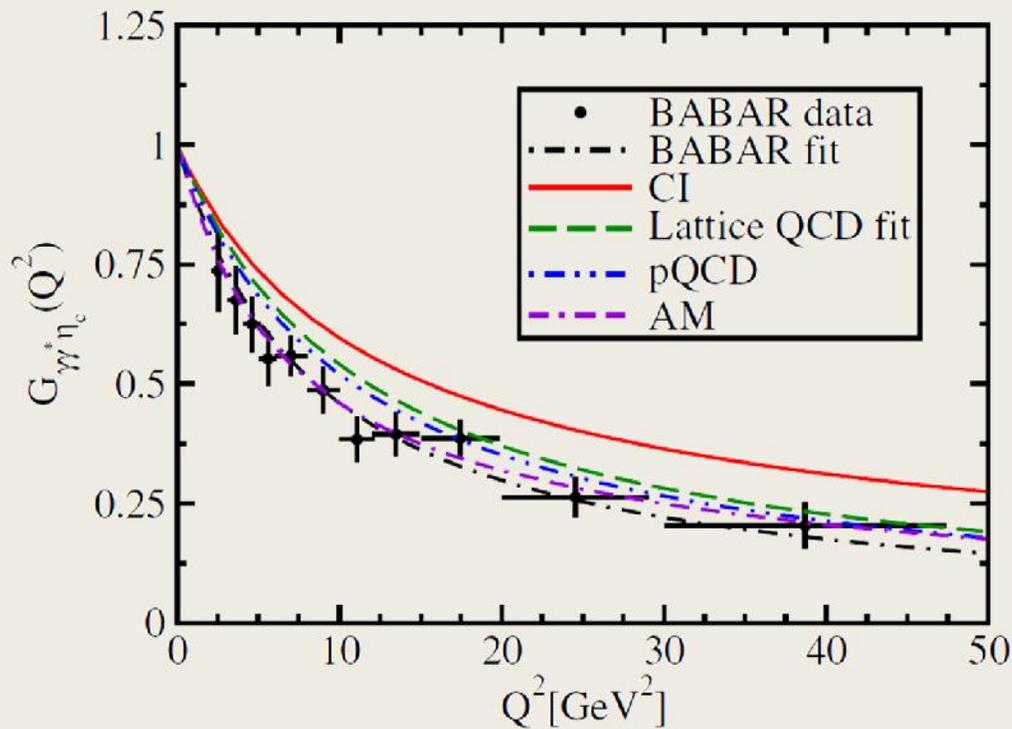
El vértice de interacción que describe la transición  $\gamma^* \gamma \rightarrow \eta_c$  se parametriza con un factor de forma  $G_{\gamma^* \gamma \eta_c}(Q_1^2, Q_2^2)$



# Factores de Forma

M.A Bedolla, et. al.

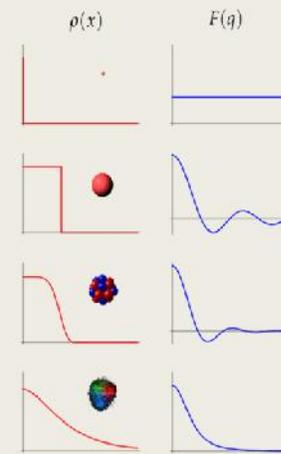
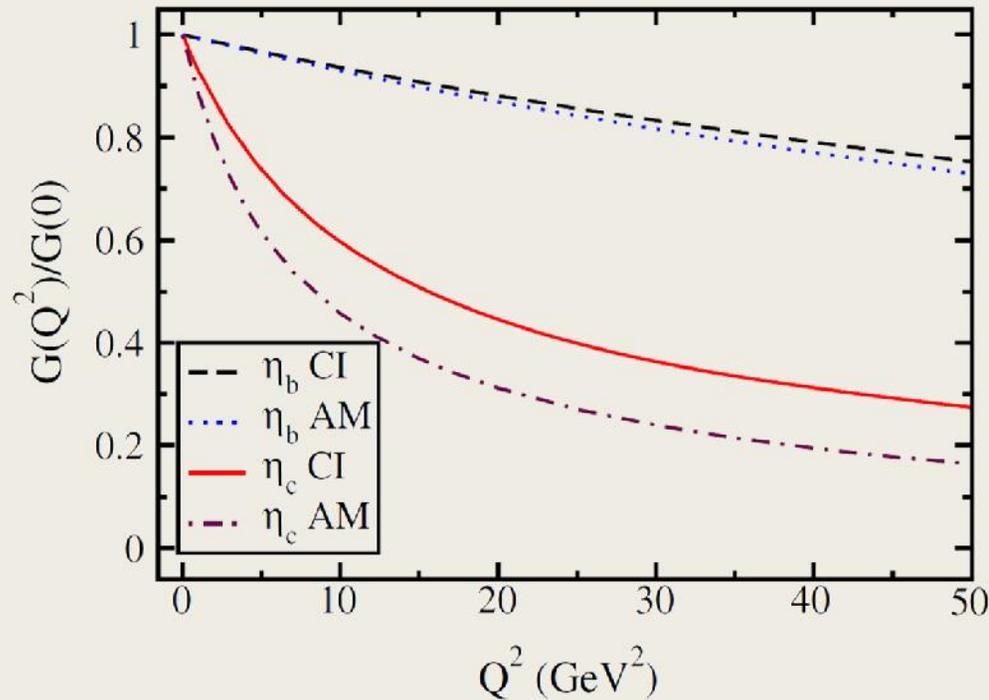
Phys. Rev. D 93, 094025 (2016).



Interaction Radii	
BABAR	0.166fm
Lattice	0.141fm
Contact Interaction	0.133fm
Algebraic Model	0.170fm

# Factores de Forma

K. Raya, et. al *Few Body Syst.* 59 (2018) no.6, 133



Interaction Radii	
Dyson-Schwinger Equations	0.041fm
Contact Interaction	0.043fm

## How to study baryons in the Schwinger-Dyson Equations approach

- The single heavy baryons are not all discovered.
- In 2002, the observation of the **double charm** baryon with a mass of 3460. However, recent observations by LHCb put it in the range of 3621. This produced a new interest in restudy baryons with heavy-quarks.
- The Schwinger-Dyson equations and the contact interaction have a baryon description in a **quark-diquark** interaction kernel with a **quark exchange** interaction.
- These studies have been performed in both **light-sector** and **heavy-sector**. Studies on **tetraquarks** using this scheme produces mainly **meson-molecules**

Chen Chen, et. al

no.3, 034008

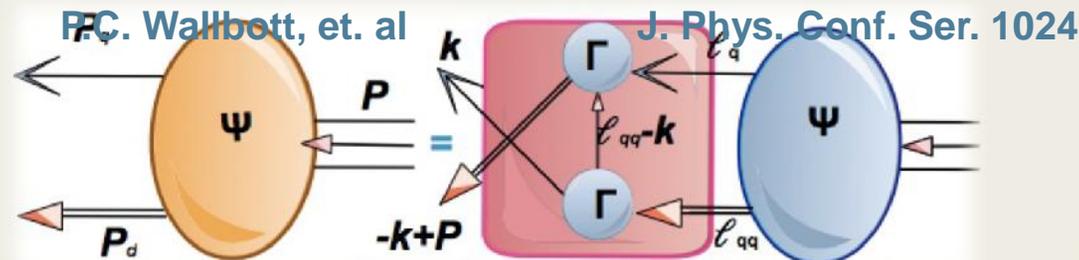
Pei-Li Yin, et. al

Few Body Syst. 53 (2012) 293-326

Phys. Rev. D100 (2019)

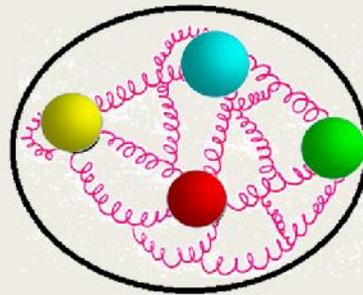
no.3, 034008

(2018) no.1, 01205



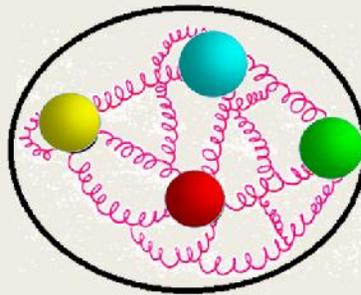
# Bariones

- El modelo de quarks original de Gellmann no prohíbe la formación de estados de más de tres quarks. Solo se debe satisfacer que el estado no tenga color .
- Un tetraquark es una partícula compuesta por cuatro quarks
- Hasta la fecha, existen varios candidatos a estas partículas: X(3872), Z(4430), Y(4140), X(4274), X(4500) and X(4700) y X(5568)
- La reciente confirmación de los pentaquarks  $P_c^+(4380)$ ,  $P_c^+(4450)$  y  $P_c(4312)^+$  motivan para la detección y confirmación de de tetraquarks en el futuro
- Existe un intenso trabajo teórico para predecir las propiedades básicas de los tetrquarks, así como guiar la búsqueda experimental en regiones específicas



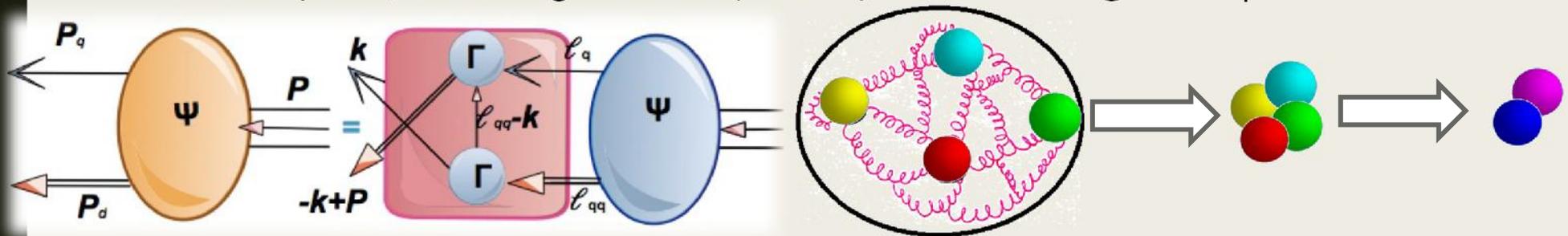
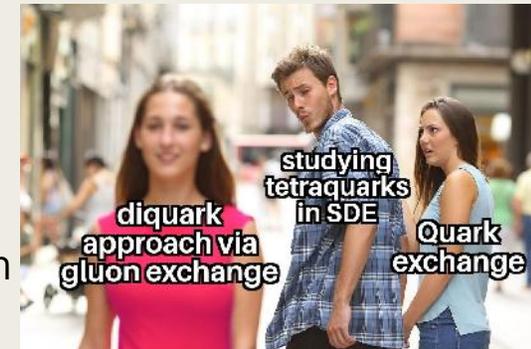
# Tetraquarks

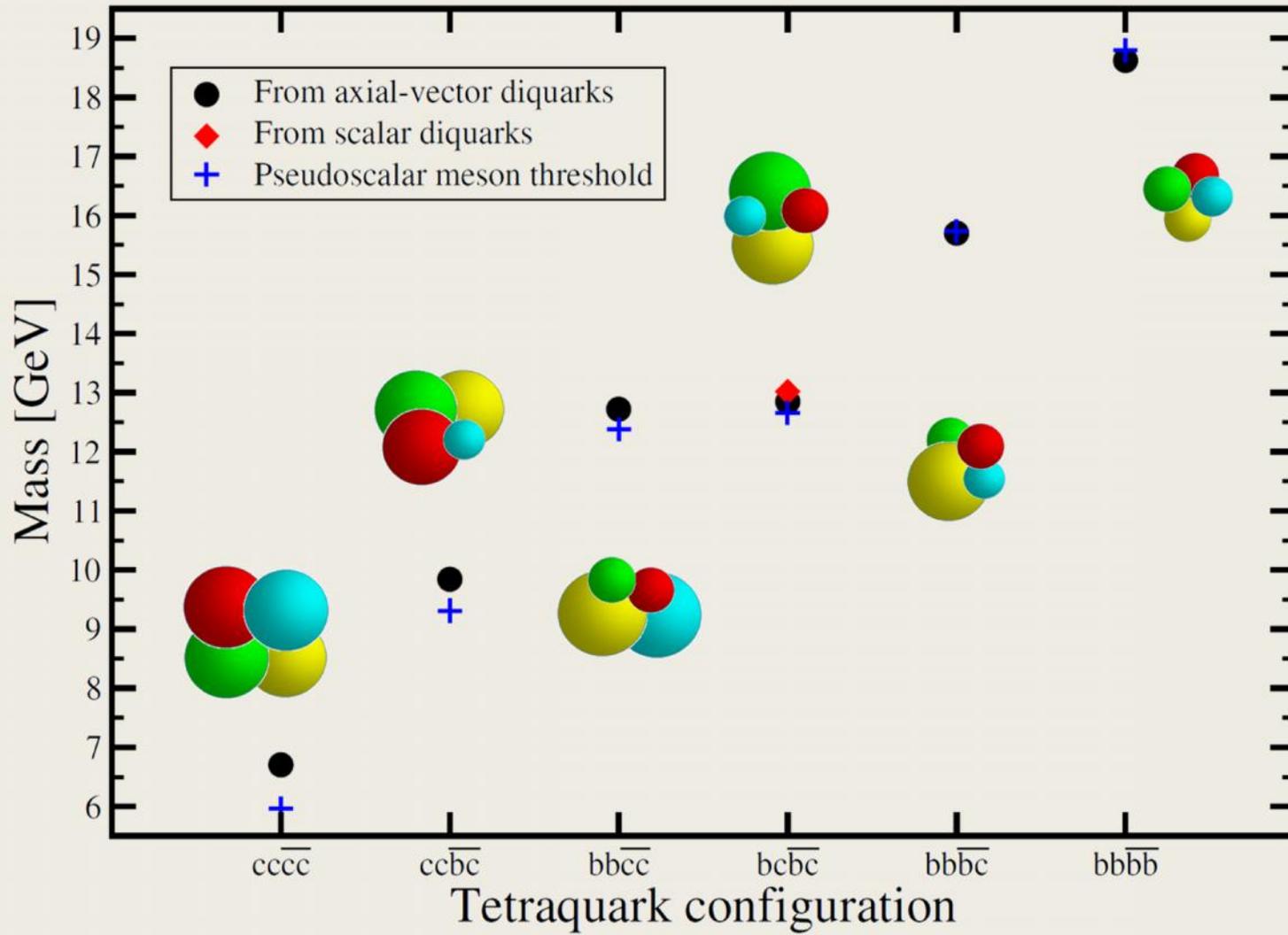
- El modelo de quarks original de Gell-mann no prohíbe la formación de estados de más de tres quarks. Solo se debe satisfacer que el estado no tenga color .
- Un tetraquark es una partícula compuesta por cuatro quarks
- Hasta la fecha, existen varios candidatos a estas partículas:  $X(3872)$ ,  $Z(4430)$ ,  $Y(4140)$ ,  $X(4274)$ ,  $X(4500)$  and  $X(4700)$  y  $X(5568)$
- La reciente confirmación de los pentaquarks  $P_c^+(4380)$ ,  $P_c^+(4450)$  y  $P_c(4312)^+$  motivan para la detección y confirmación de de tetraquarks en el futuro
- Existe un intenso trabajo teórico para predecir las propiedades básicas de los tetraquarks, así como guiar la búsqueda experimental en regiones específicas



# Tetraquarks

- En algunos trabajos, se estudian a los tetraquarks mediante un intercambio en el que se intercambian los quarks
- Sin embargo, este tipo de interacción promueve más la aparición de estados moleculares mesón-mesón.
- Un detalle a tomar en cuenta es que el estado ligado quark-quark también tiene color.
- Con esto, un tetraquark se puede estudiar como el estado ligado diquark-antidiquark.
- Existe un intenso trabajo teórico para predecir las propiedades básicas de los tetraquarks, así como guiar la búsqueda experimental en regiones específicas





# Temas abiertos y proyectos futuros

- ¿Son los quarks fundamentales o tienen subestructura?
- ¿Por qué el pion es tan ligero y el electrón tan pesado si están hechos de lo mismo?
- ¿Existen más de 6 tipos de quarks?
- ¿Obtener confinamiento de primeros principios?
- ¿Existen las glubolas?
- ¿Los gluones también adquieren masa dinámicamente debido a sus auto interacciones?
- Calcular bariones pesados con la interacción de contacto.
- Tetraquarks, pentaquarks.
- Buscar un modelo que se aproxime más a QCD.
- Promover el trabajo y buscar más colaboraciones.

