

# De rendijas a dibujos

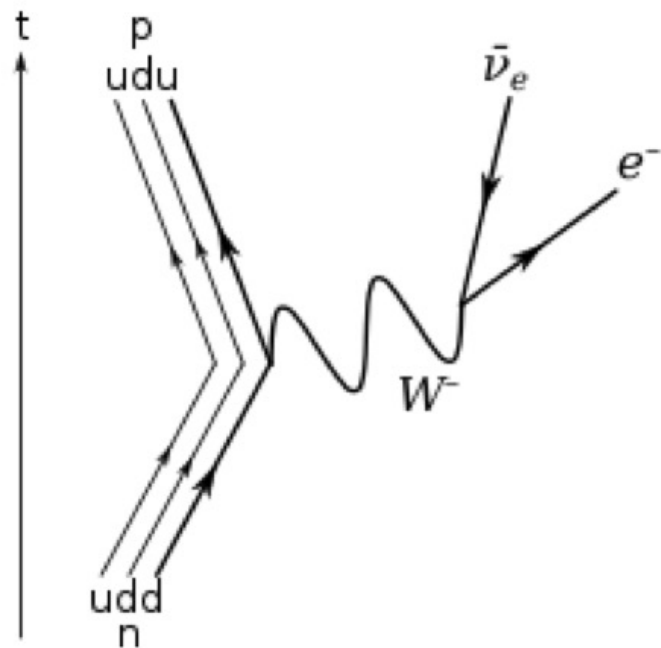
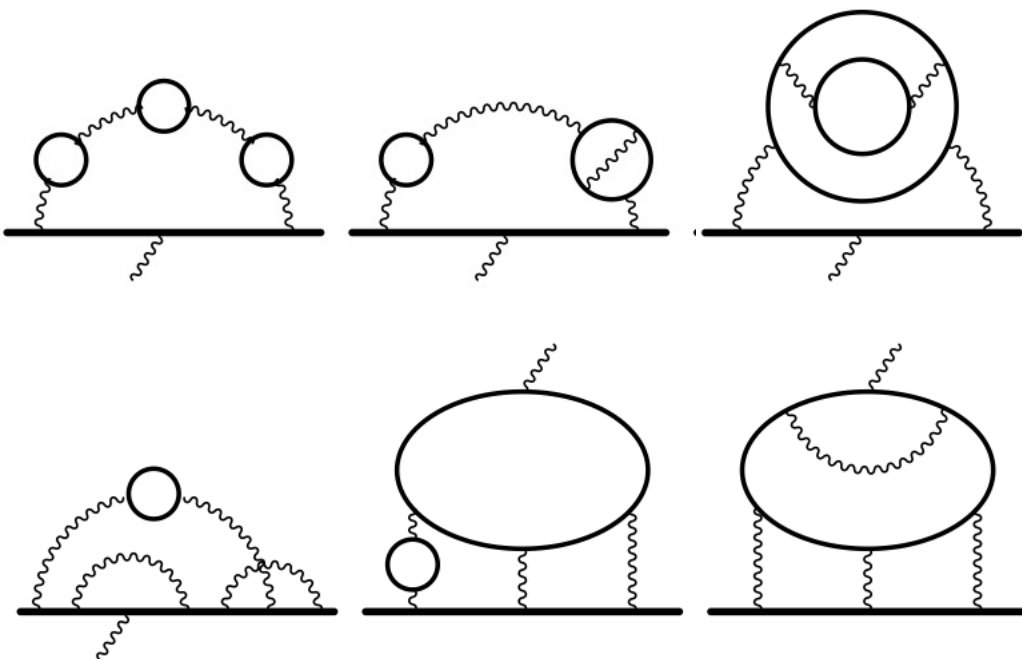
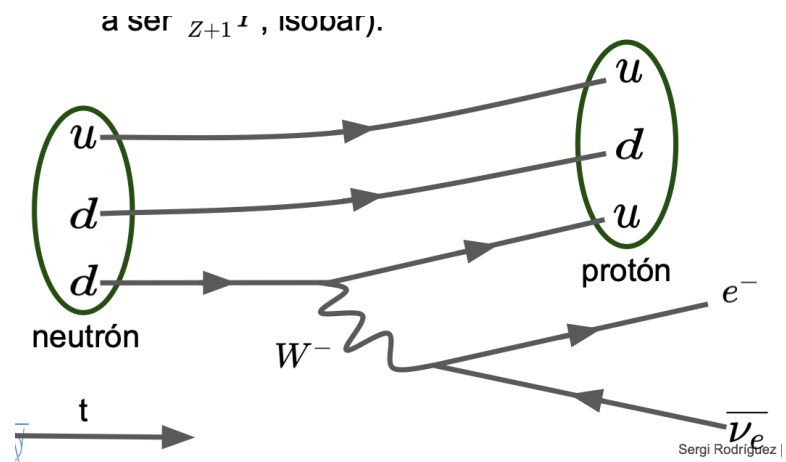
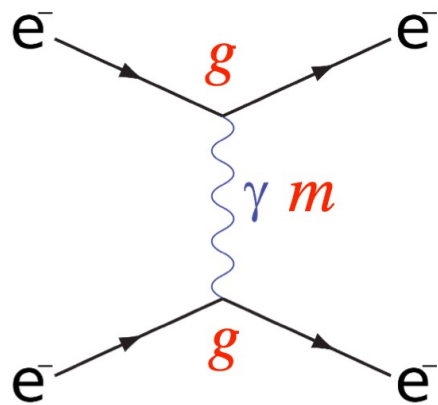
## *La física mágica de Feynman*



Luis Roberto Flores Castillo  
Chinese University of Hong Kong



**CERN Spanish Teacher Program**  
23 de Julio de 2024



¿Qué son los  
*diagramas de Feynman?*

**Preliminares ...**



HOP IN THE TIME MACHINE, HOBBS! WE'RE GOING A FEW HOURS INTO THE FUTURE! I'LL HAVE FINISHED MY STORY BY THEN, SO WE'LL JUST PICK IT UP AND BRING IT BACK TO THE PRESENT! THAT WAY, I WON'T HAVE TO WRITE IT!



$$z \leftarrow z^2 + c$$

$c$ : un número fijo,

Empezamos siempre con  $z = 0$

$$c = -1$$

$$z_0 = 0$$

$$z_1 = 0^2 + (-1) = -1$$

$$z_2 = (-1)^2 + (-1) = 0$$

$$z_3 = 0^2 + (-1) = -1$$

$$z_4 = (-1)^2 + (-1) = 0$$

⋮

**NEGRO**

**ACOTADO**

$$c = 1$$

$$z_0 = 0$$

$$z_1 = 0^2 + (1) = 1$$

$$z_2 = 1^2 + (1) = 2$$

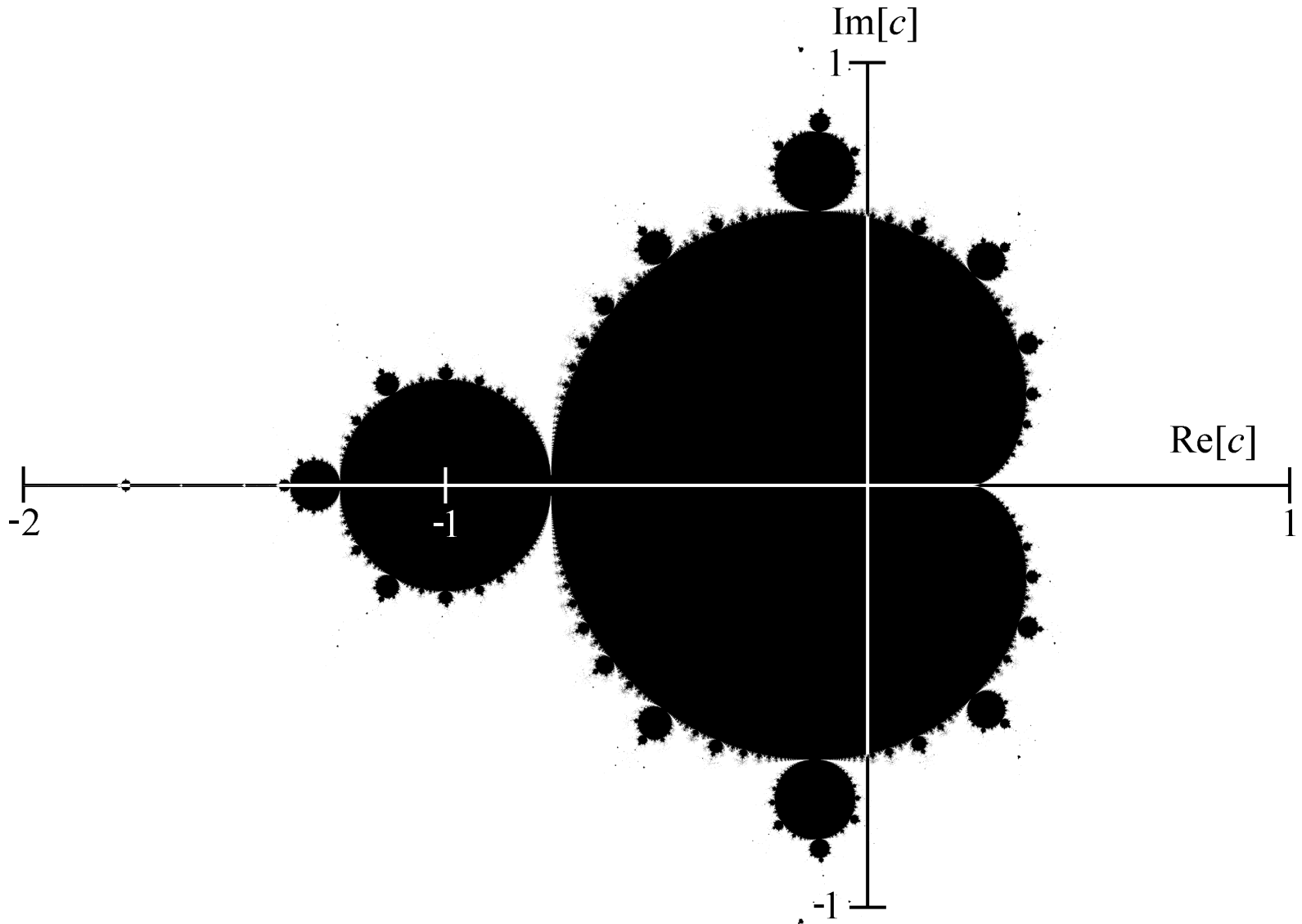
$$z_3 = 2^2 + (1) = 5$$

$$z_4 = 5^2 + (1) = 26$$

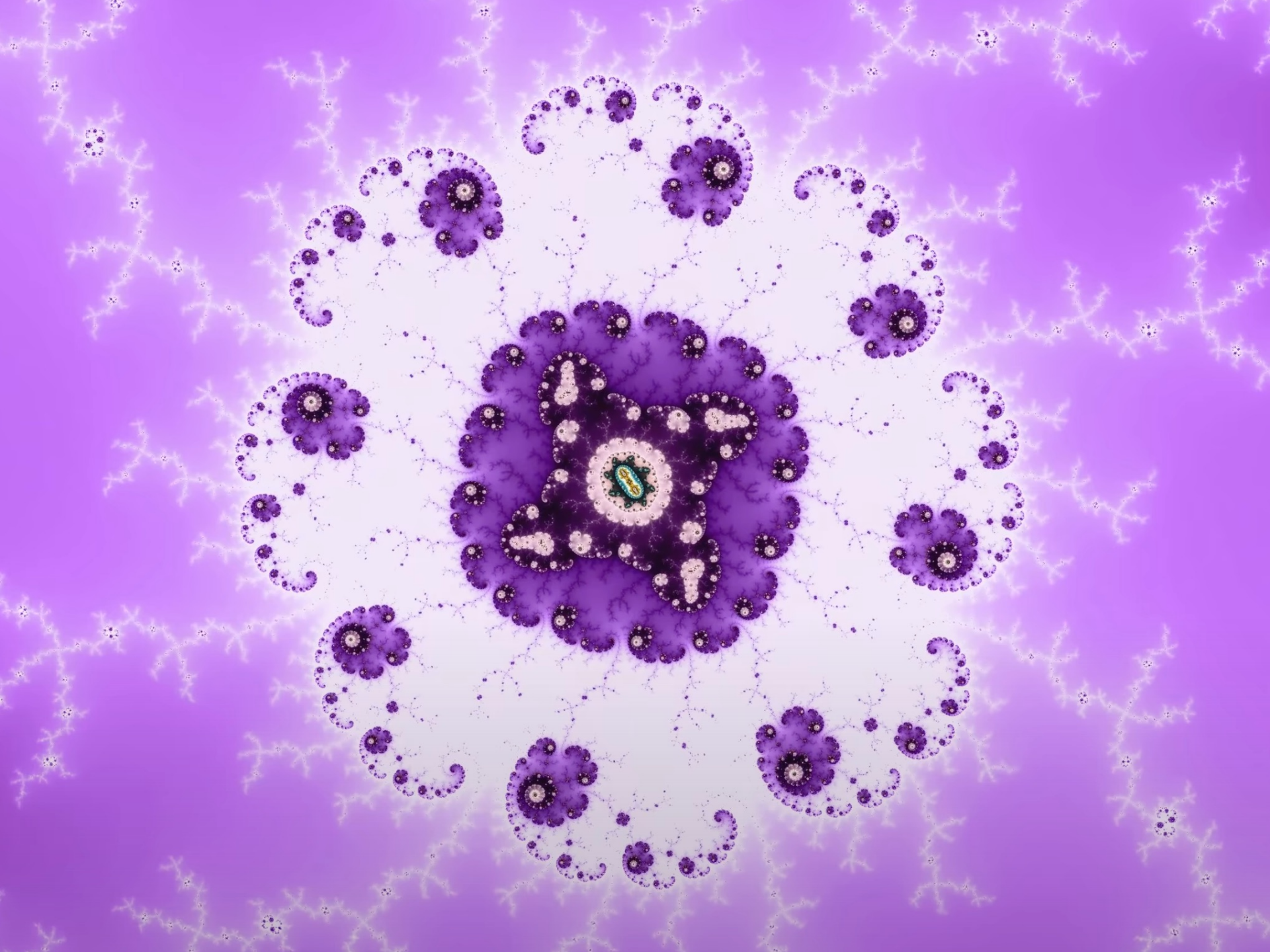
⋮

**COLORES**  
(según la velocidad  
de divergencia)

**DIVERGENTE**



<https://www.youtube.com/watch?v=pCpLWbHVNhk>

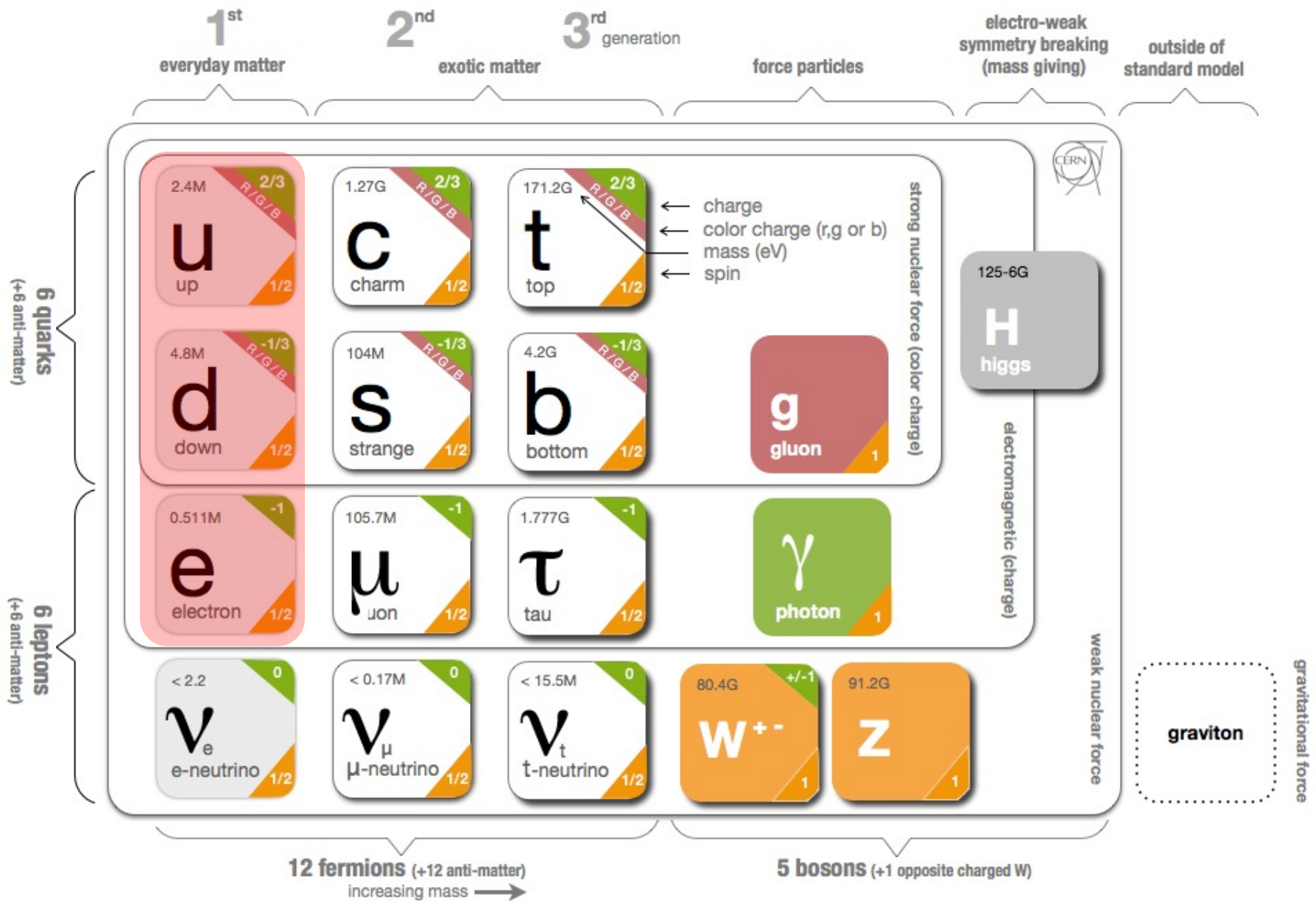




# Demostración ...

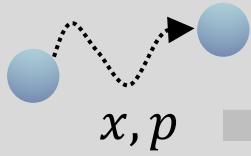
**“Simplificando” nuestras  
representaciones del mundo**





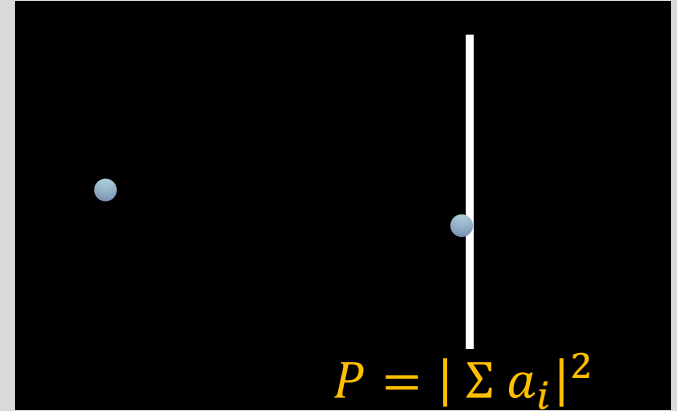
... y luego?

MECÁNICA CLÁSICA:



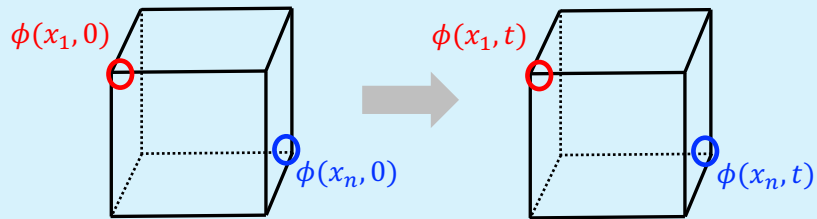
MECÁNICA CUÁNTICA:

$\hat{x}, \hat{p}$



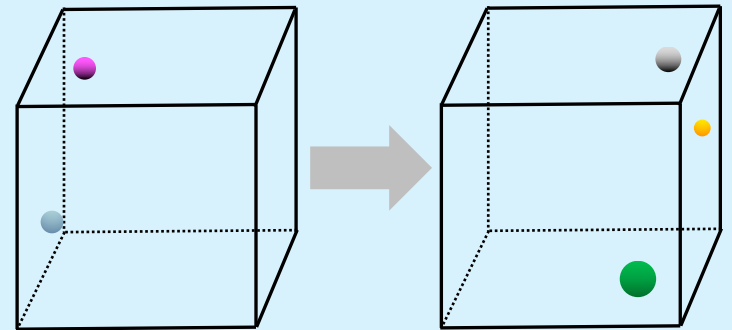
A ALTAS ENERGÍAS (DISTANCIAS CORTAS)

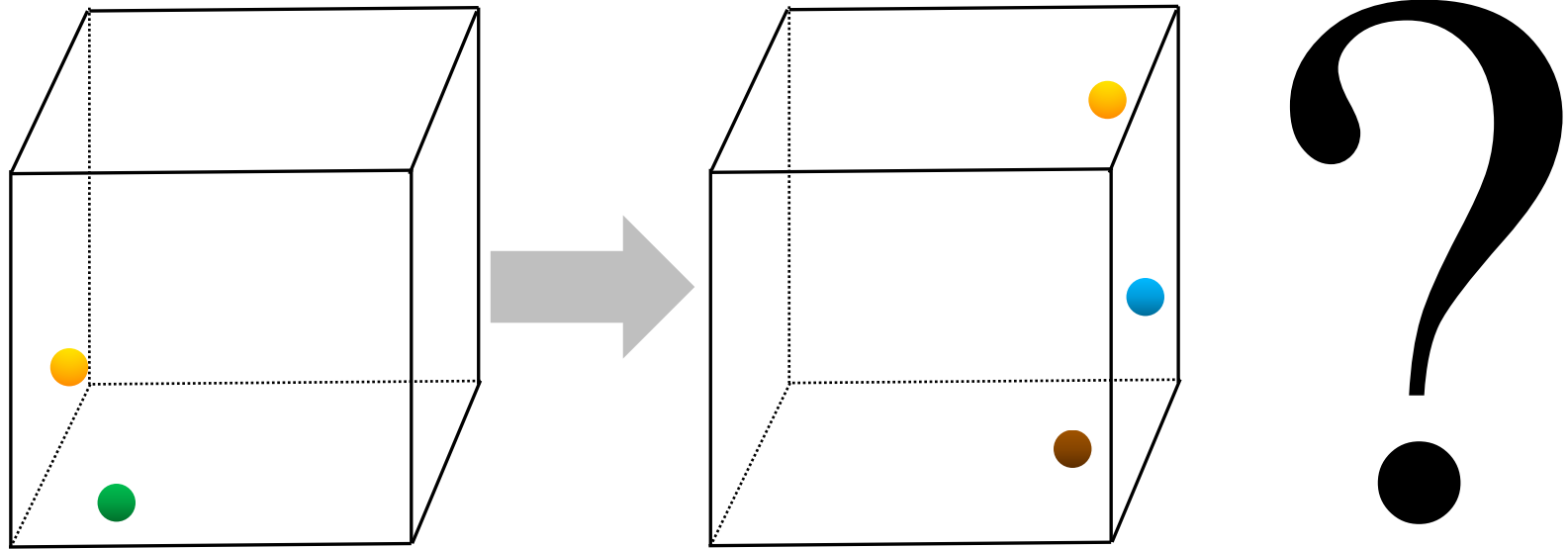
- No podemos ignorar la posible producción de partículas



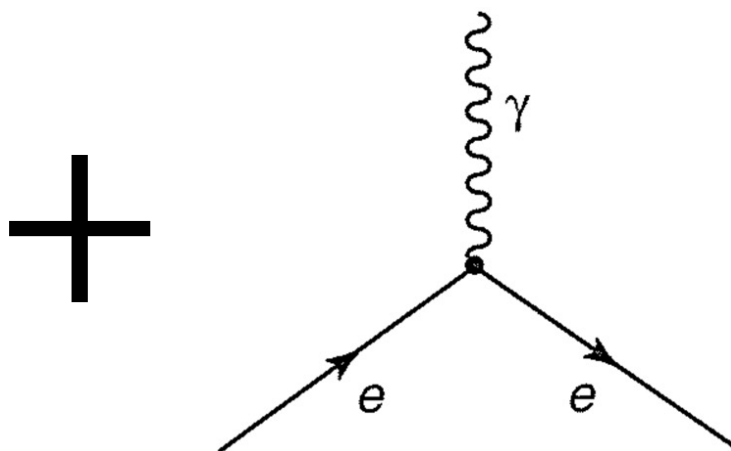
Cada  $\phi(x) \rightarrow \hat{\phi}(x)$

Perturbaciones en cada punto: “**cuantos**” del campo

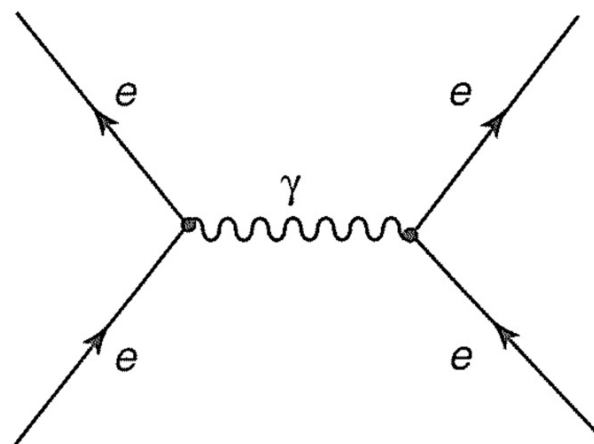
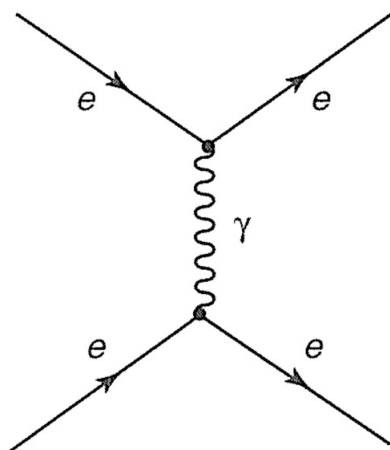




“Todas las historias posibles” son aquellas que se pueden construir combinando los “vértices básicos” que representan las interacciones fundamentales.



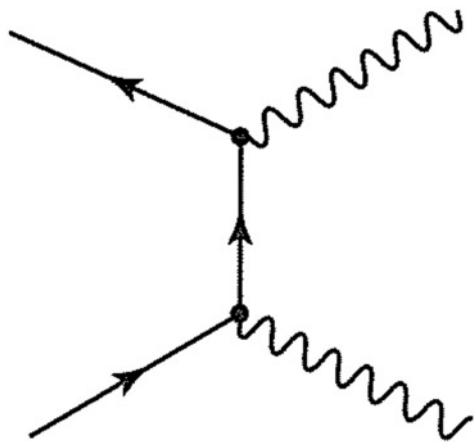
tiempo  $\longrightarrow$



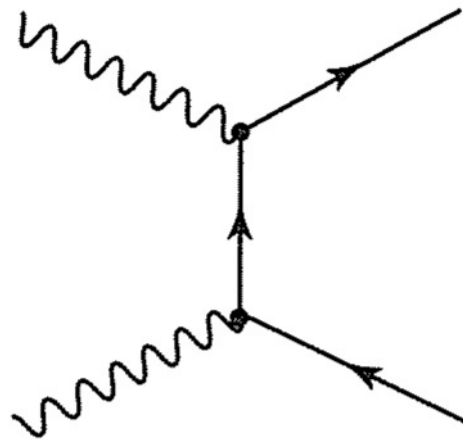


# Otras combinaciones:

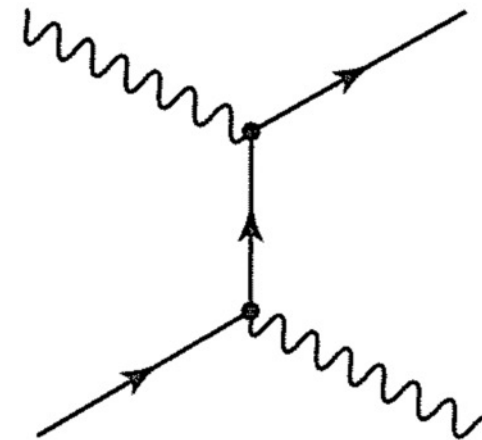
tiempo  $\longrightarrow$



Aniquilación de pares  
 $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$



Producción de pares  
 $\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$



Dispersión Compton  
 $e^- + \gamma \rightarrow e^- + \gamma$

¿Cuánto es  $\frac{1}{0.98}$ ?

$$\frac{1}{1 - 0.02} \approx 1 + 0.02$$
$$\approx 1 + 0.02 + 0.02^2$$
$$\approx 1 + 0.02 + 0.02^2 + 0.02^3$$

...

$$\frac{1}{1 - x} = 1 + x + x^2 + x^3 + \dots$$

- Es una serie infinita, pero nos pueden bastar dos términos
- Sabemos cómo obtener la serie, pero **no “por inspección”**.
- Quizás en algún mundo se llame a esta función “todos +1”

*Cada diagrama de Feynman* representa una expresión que produce **un número complejo**.

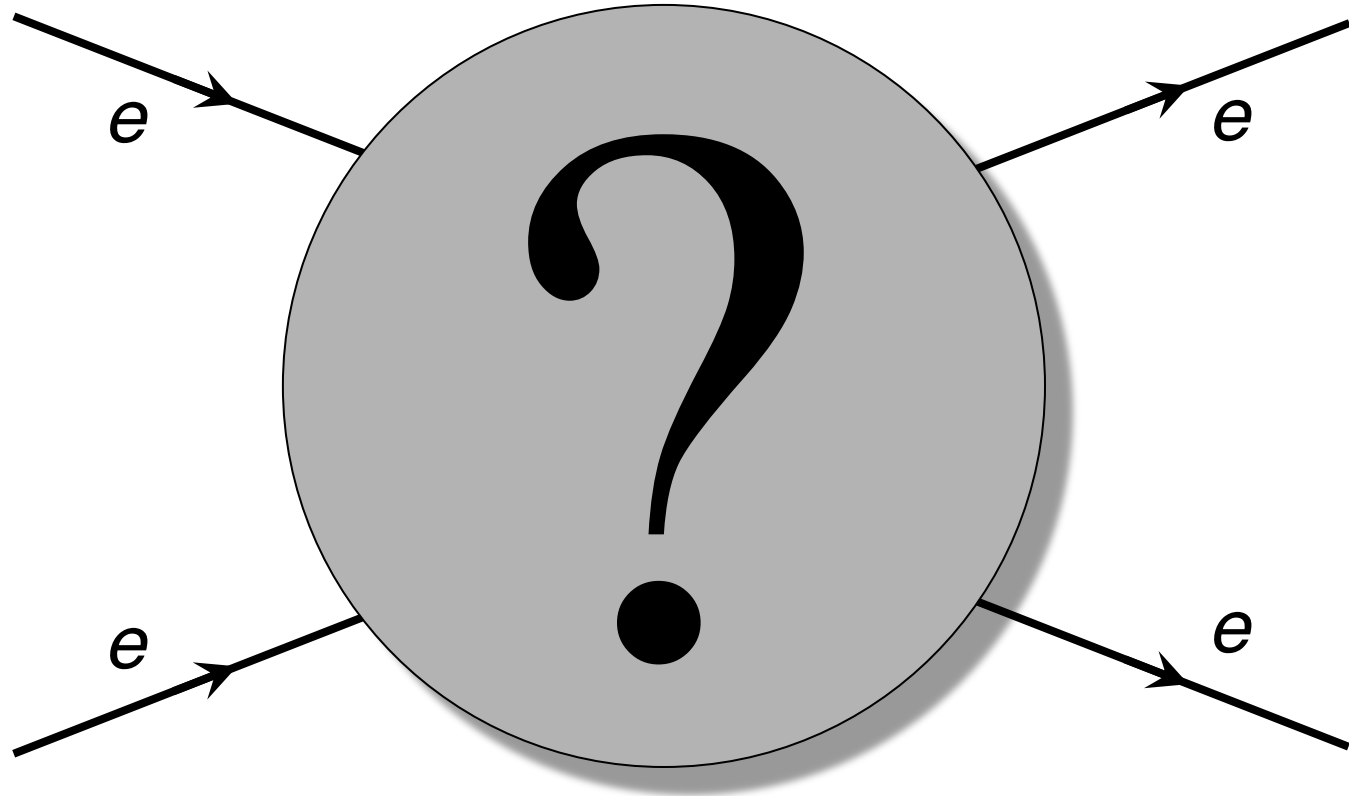
Son términos de una serie infinita, sólo que están escritos en una notación *absurdamente* intuitiva.

Conociendo los vértices válidos y qué partículas **entran** y **salen** de un proceso, *podemos escribir 'por inspección' qué expresiones calcular!!!*

*La suma de esas expresiones es la amplitud de probabilidad del proceso.*

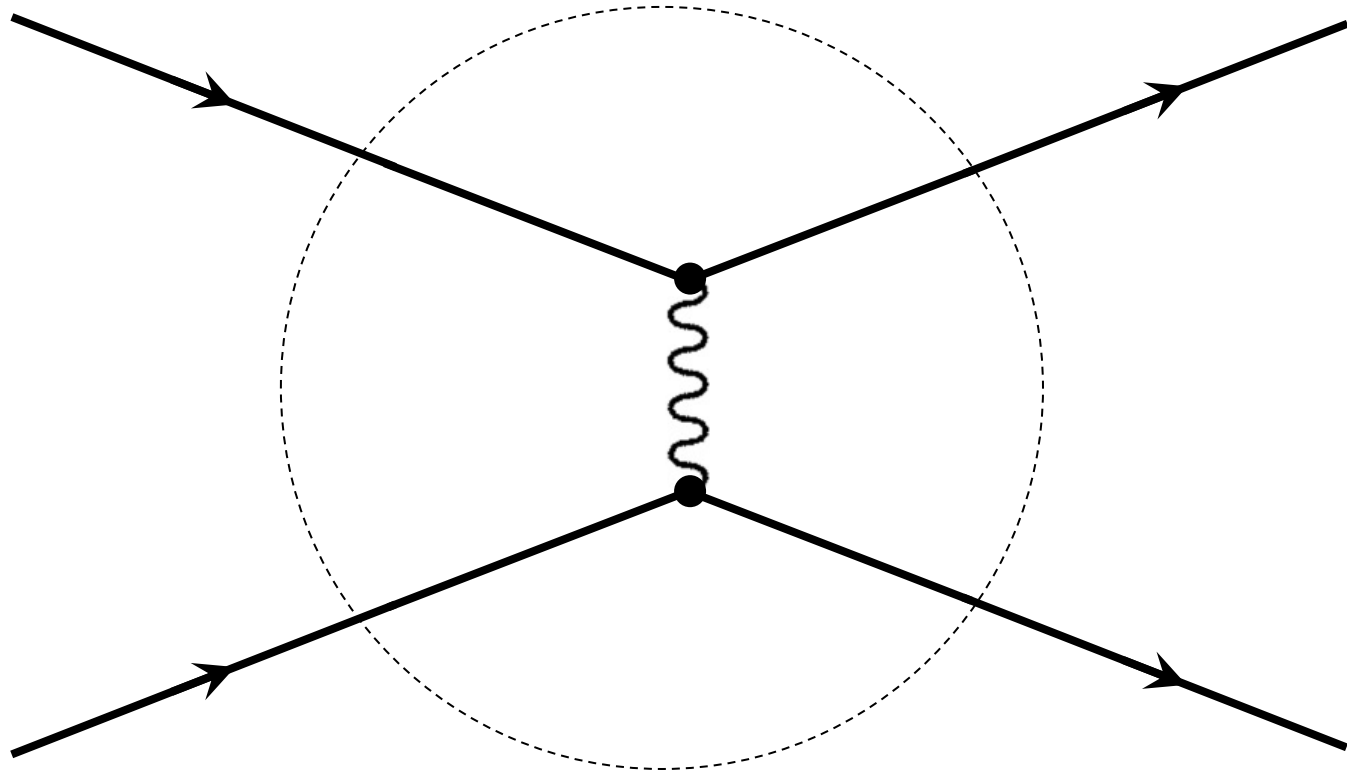
Por ejemplo,

tiempo  $\longrightarrow$



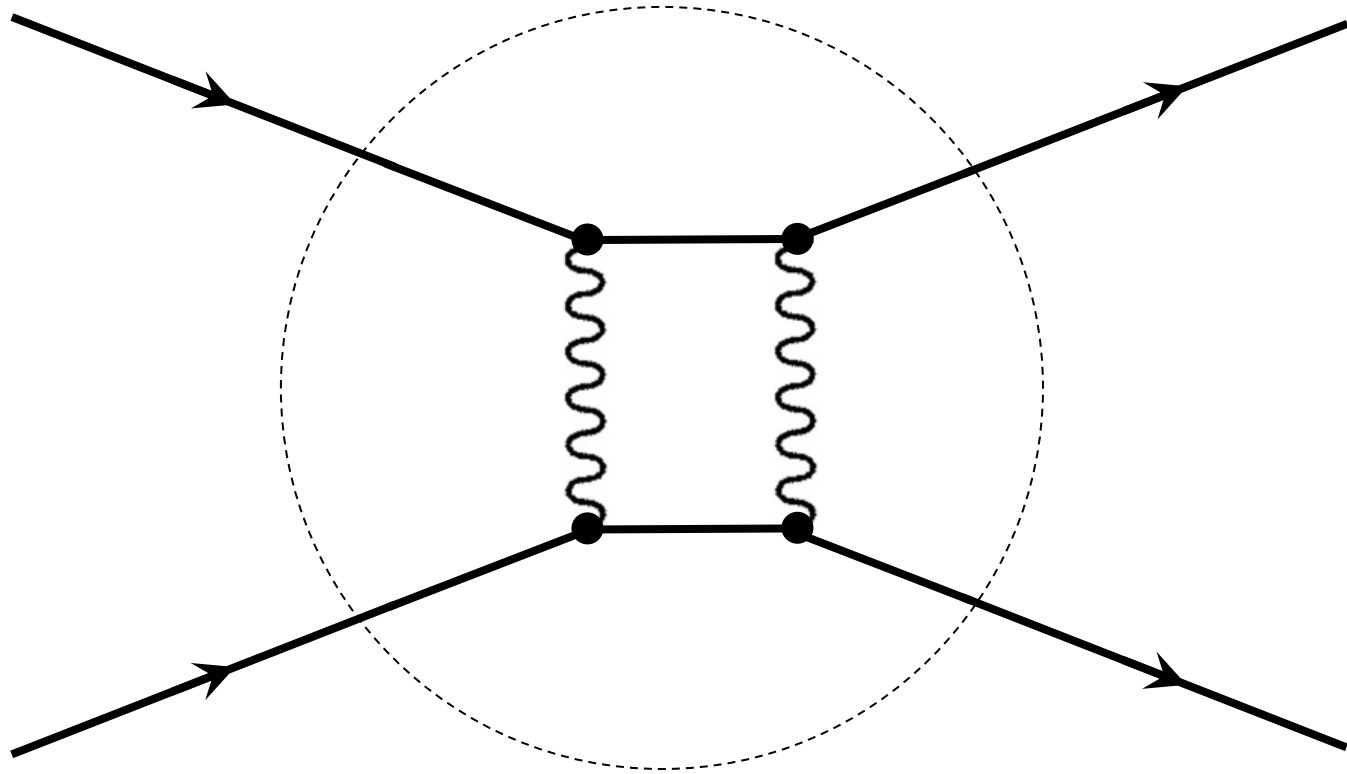
Por ejemplo,

tiempo  $\longrightarrow$



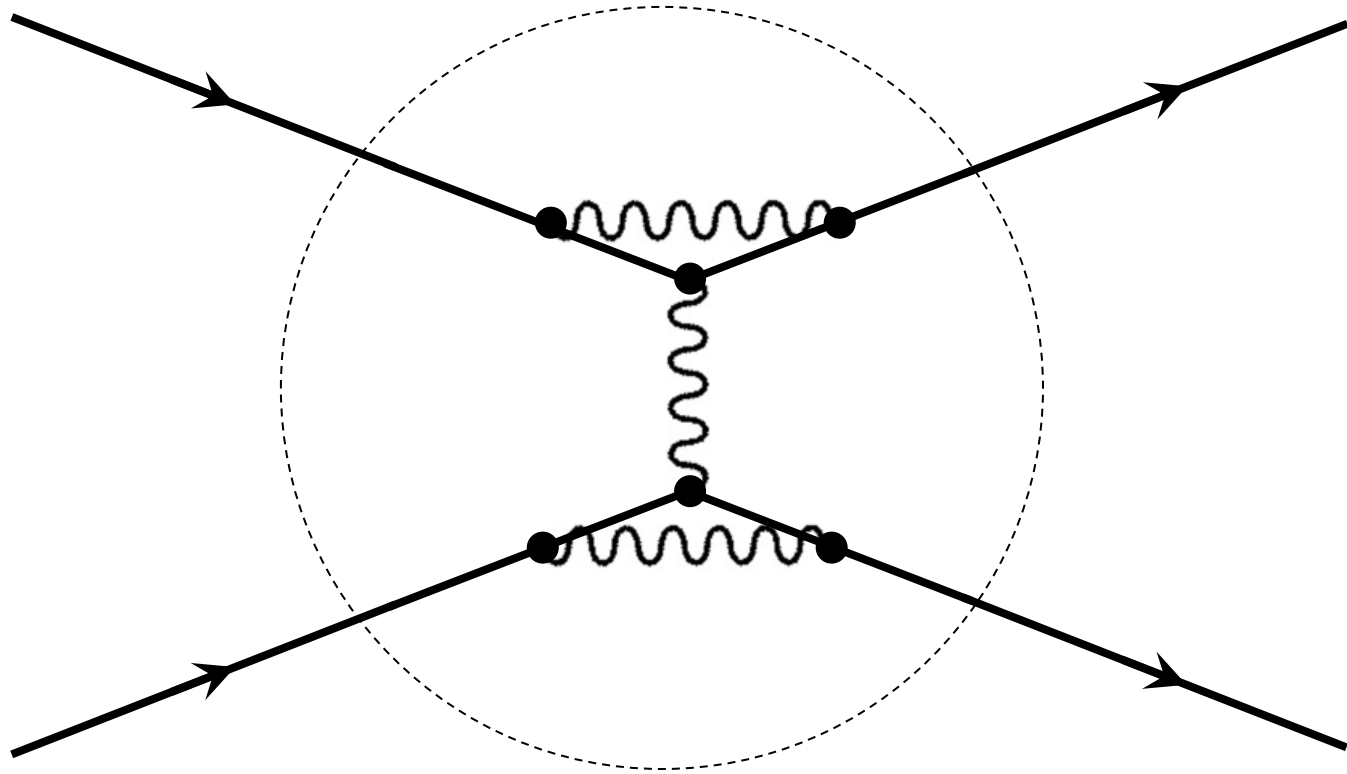
Por ejemplo,

tiempo  $\longrightarrow$



Por ejemplo,

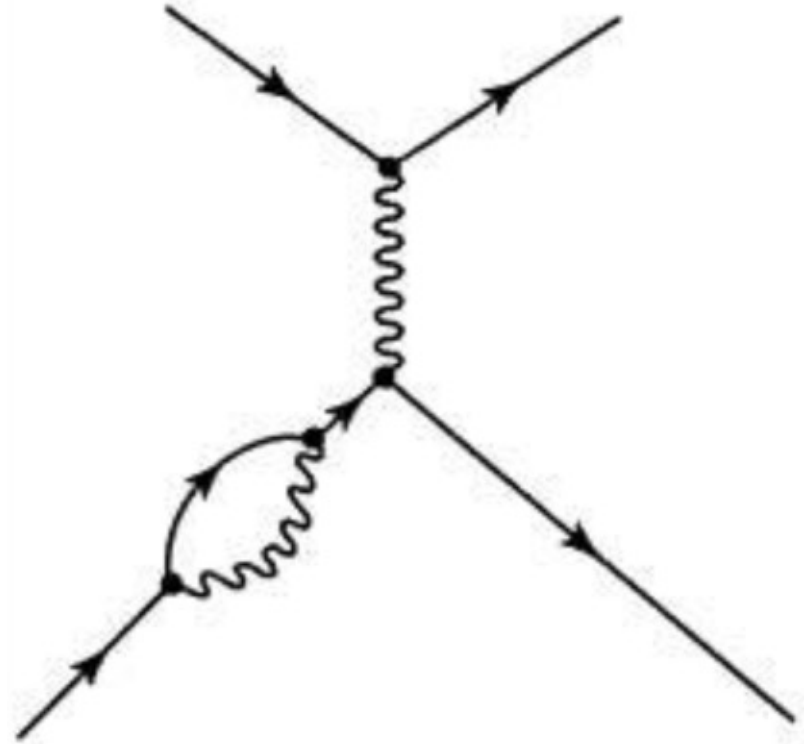
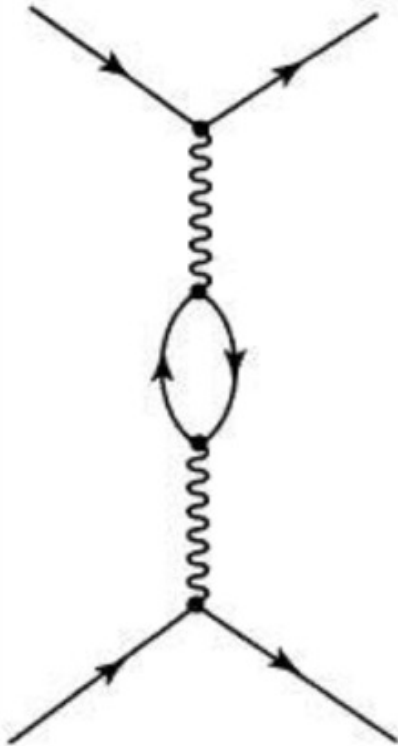
tiempo  $\longrightarrow$

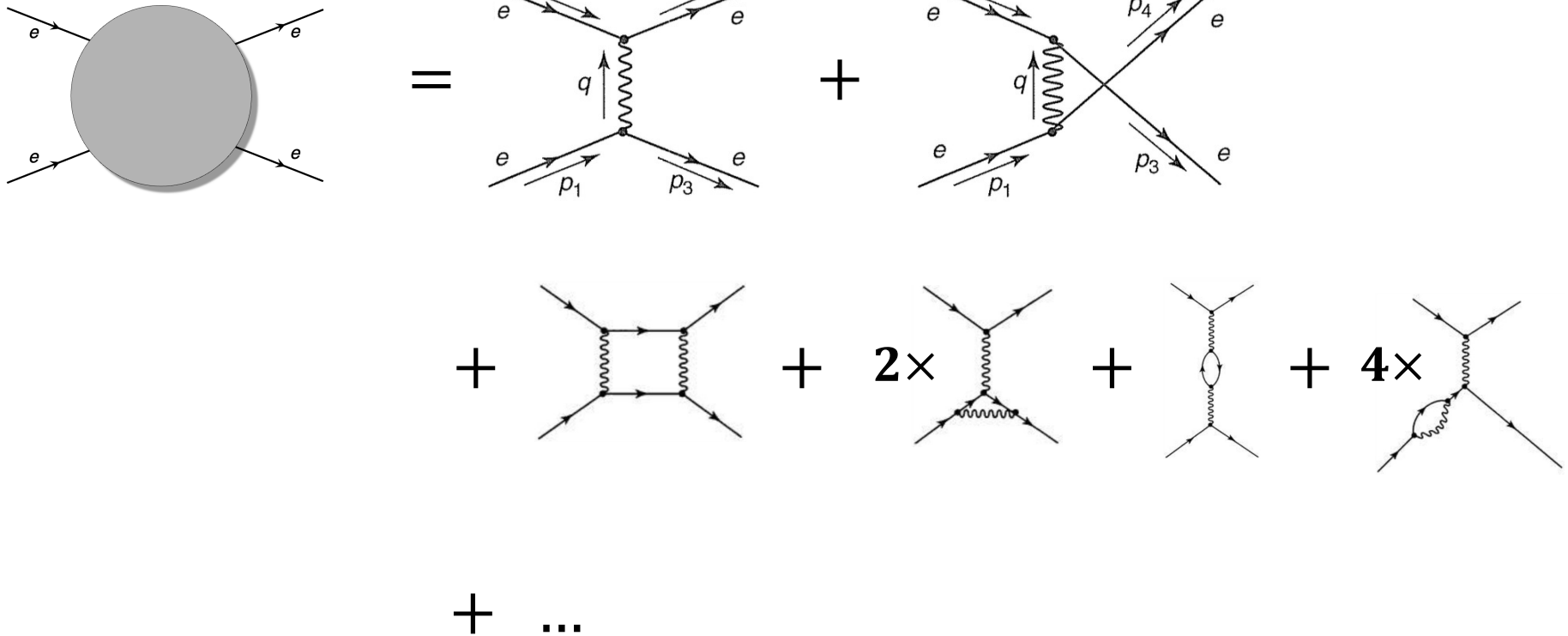




Por ejemplo,

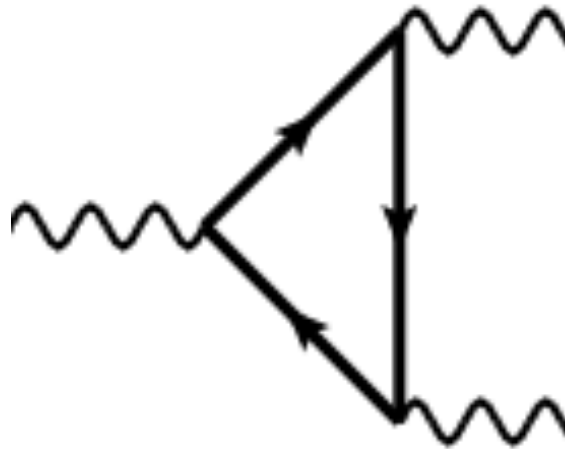
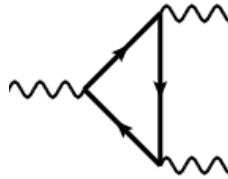
tiempo  $\longrightarrow$





- Para cada diagrama: **más vértices  $\rightarrow$  menor valor** (en QED)
- Para alta precisión, pueden requerirse miles de términos



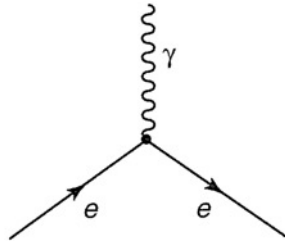


Finalmente, recordando esa “demostración” al principio...

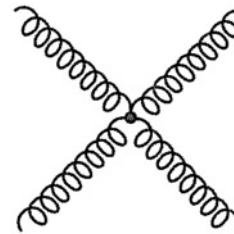
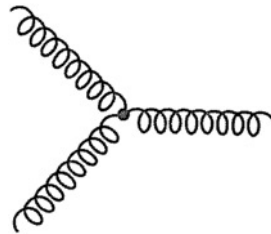
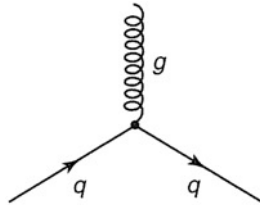
- Las “rotaciones de 90 grados” son absurdas porque las **expresiones y lo que estas representan** no tienen las mismas propiedades ante rotaciones.
- Por otro lado, al rotar o deformar los diagramas de Feynman (i.e., cuando “rotamos una expresión”), obtenemos “expresiones” válidas!

# Resumen de interacciones (sin el bosón de Higgs)

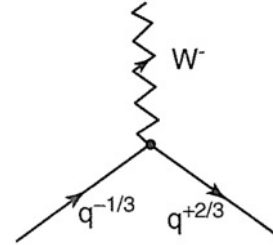
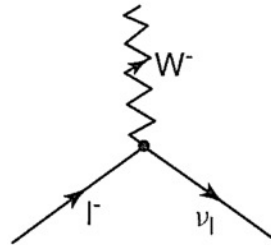
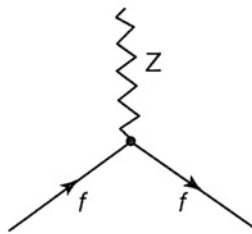
**QED:**



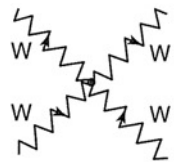
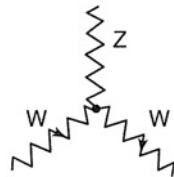
**QCD:**



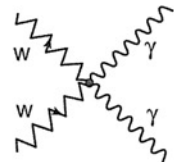
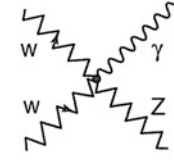
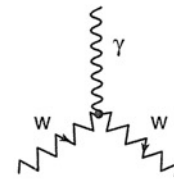
**Débil:**



**W/Z:**



**(W|Z)/gamma:**

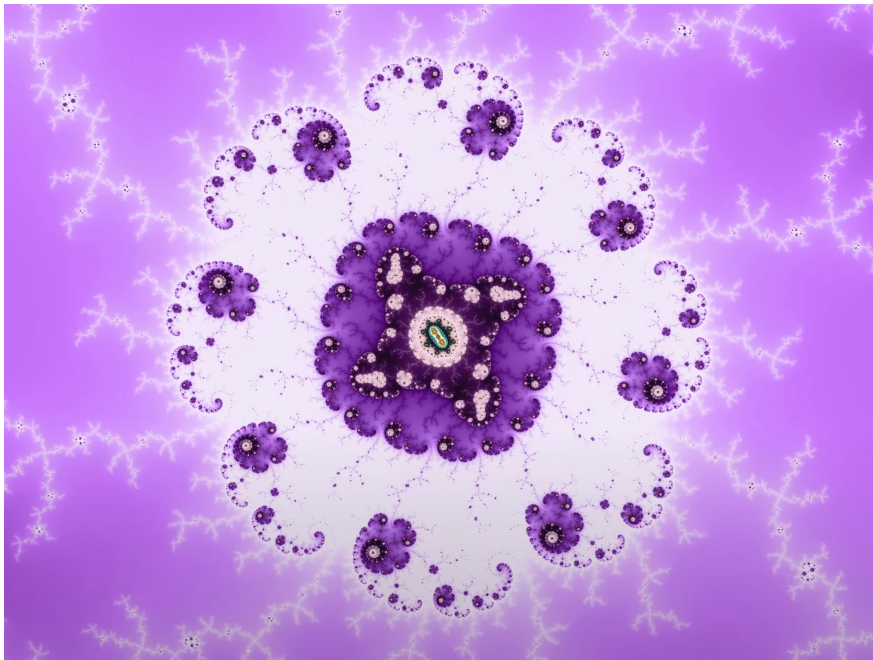


	Fermions			Bosons	Force carriers
Quarks	<i>u</i> up	<i>c</i> charm	<i>t</i> top	$\gamma$ photon	
	<i>d</i> down	<i>s</i> strange	<i>b</i> bottom	<i>Z</i> Z boson	
Leptons	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	<i>W</i> W boson	
	<i>e</i> electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau	<i>g</i> gluon	

**Cabibbo-Kobayashi-Maskawa**

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

- Cada **vertice válido** corresponde a un **término** en el Lagrangiano del modelo estándar.
- Los diagramas de Feynman son *términos en la expansión perturbativa de la amplitud de probabilidad de un proceso.*



$$z \leftarrow z^2 + c$$

