

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Violación de CP en la producción de pares de bosones de norma neutros

A. Moyotl, G. Tavares-Velasco y J. J. Toscano

Presenta:

Dr. Agustín Moyotl Acuahuatl



10 de septiembre de 2014





INDICE DE CONTENIDO

- 1.- *Introducción.*
- 2.- *Acoplamientos de tres bosones de norma neutros (ATBNN).*
- 3.- *Busqueda experimental de ATBNN.*
- 4.- *Nueva física en la producción de bosones de norma neutros.*
- 5.- *Estructura matemática de los ATBNN.*
- 6.- *Cambio de sabor en el sector de escalar.*
- 7.- *ATBNN inducidos por el sector escalar.*
- 8.- *Conclusiones.*





INTRODUCCIÓN

EL PAÍS

INTERNACIONAL POLÍTICA ECONOMÍA CULTURA SOCIEDAD DEPORTES

ESTÁ PASANDO [Bosón Higgs](#) [Arrestado fiscal](#) [Ciclón Catbivo](#) [Incendios Valencia](#) [Caso Berlusconi](#) [Caso Berlusconi](#) [Vikán-Hi](#) [MÁS TEMAS](#)

RECTO Los científicos del CERN anuncian el descubrimiento de una partícula que podría ser Higgs. Siguen la reconstrucción en la que están explicando un evento que, de confirmarse, supondría un paso esencial de la física para explicar el origen de la materia.

Hallada “la más sólida evidencia” de la existencia del bosón de Higgs

El posible descubrimiento de la partícula es un paso esencial hacia la explicación del origen de la materia

“Puedo confirmar que se ha descubierto una partícula que es consistente con la teoría del bosón de Higgs”, dicen los científicos. El descubrimiento de la partícula ayudaría a explicar el origen de la masa. Los físicos del CERN explican en estos momentos sus hallazgos

- Diccionario para entender en qué consiste el hallazgo
- La “caza” del bosón de Higgs, por A. RUIZ ZIMENO
- VIDEO Una explicación del bosón de Higgs
- Sigue en directo la conferencia del CERN
- FOYSALEMA Indicios halafios de la “partícula de Dios”
- Hacia la partícula de Dios, por JAVIER SAMPEDRO

Imagen del CMS que pudiera ser la firma de la partícula de Higgs. / CERN

INTERNACIONAL POLÍTICA SOCIÉTÉ ÉCONOMIE CULTURE DÉSES SPORT SCIENCES TECHNO STYLE VOUS ÉDITION ABONNÉS

EN CIUDADES EUROPEAS desde 15€
EN CIUDADES ESPAÑOLAS desde 17€ (por noche por persona)

EN CE MOMENT [Nicolas Sarkozy](#) [Mal](#) [Bosón de Higgs](#) [1962](#) [l'Indépendance algérienne](#) [Winnipeg](#) [Tour de France](#) [Syrie](#) [Pakistan](#)

Le boson de Higgs découvert avec 99,9999 % de certitude

Voici la confirmation tant attendue : une nouvelle particule a été découverte au Centre européen de recherche nucléaire (CERN), près de Genève.

- Boson de Higgs : la fin de la traque
- Le boson de Higgs : les raisons d'une quête

Les plus partagés

- Perquisitions au domicile et dans les bureaux de Nicolas Sarkozy 2020
- "Strip-tease" : Comment l'amour (et) vient (pas) aux campagnes 303
- Jean-Louis : "Strip-tease" sera une rime formidable pour un athlète de l'an 2020? 340
- Le Syria ou "l'Archipel de la torture", selon HDS 370
- Le dealer de voitures de Jean-Luc Dehaene décrit les exigences de son client vedette 206
- Vous avez trop bu, ces derniers vous parlez? 274
- Le célèbre designer automobile Sergio Pininfarina est mort 186
- Selon Al-Jazeera, Arabat aurait été empoisonné au potassium 128

HOME PAGE TODAY'S PAPER VIDEO MOST POPULAR U.S. Edition

MARC JACOBS.COM

The New York Times

Wednesday, July 4, 2012 Last Update: 4:00 AM ET

TRY A TIMES DIGITAL SUBSCRIPTION: 4 WEEKS FOR 99¢. [CLICK HERE](#)

WORLD U.S. POLITICS NEW YORK BUSINESS TECHNOLOGY SPORTS SCIENCE HEALTH ARTS STYLE OPINION

Rapid H.I.V. Home Test Wins Federal Approval

By DONALD G. MARSH, JR.

The OraQuick test, which uses a cheek swab and gives results in 20 to 40 minutes, is the first choice for Americans to learn in the privacy of their own homes whether they are infected.

As Bank Frames a Defense, Barclays C.E.O. Resigns

By BEN FRISCH and SHARON SCOTT

Ahead of a British parliamentary hearing, senior Barclays executives said they thought they had implicit approval from regulators to manipulate interest rates.

—A Chief Was Paid Millions

Top Judge Helped

By BEN FRISCH

New Particle Could Be Physics' Holy Grail

By DENNIS CHRISTIE 4 minutes ago

If confirmed to be the elusive Higgs boson, a newly discovered particle named for the physicist Peter Higgs, shown in Geneva, could explain the universe's origin.

Fears of Flies Take Fireworks Out of July 4th Celebrations

By DAN FROST

Many U.S. cities and towns across the country have decided to scrap their displays. Always be careful!

As Symbolic Check, Fireworks Law Out to a Handful's Bold Engines

By ANTON SCHWARZ

The Fire Department in Saratoga, N.Y., mounted its annual display after several fireworks were said to

OPINION EDITORIAL: Two Quiet, Aggie, on Health Care

The Obama campaign has not carefully considered Republican misinformation on the reform law.

- David: Uncle George
- Friedman: Norm, Israel
- David: Books for Obama
- Flem: Sweden's Miracle
- East: Anderson: The Downside of Liberty
- Op-Ed: Anderson Cooper

MARKETS

Britain	Germany	France
FTSE 100	DAX	CAC 40
6,675.04	6,853.10	3,246.85
+14.06	+20.32	+20.27
+0.20%	+0.29%	+0.60%

SECTORS

Stock	ETFs	Funds
-------	------	-------

INTRODUCING NEW YORK TIMES CORPORATE DIGITAL SUBSCRIPTIONS. From insight comes inspiration.

Website of the year | 4 July 2012 | Last updated less than one minute ago

the guardian

News Sport Comment Culture Business Money London 2012 Life & style Travel Environment Video Apps Offices Jobs

News UK World Development US Politics Media Education Society Science Tech Law Data TV Football Observer

Breaking news: Weather not imitations end Moses McKisley clash - AP

Diamond set to come out fighting as he faces MPs

Chief executive to reveal role of City watchdogs and Whitehall in Libor rate-fixing scandal

- The key questions for MPs to ponder
- The late exchanges that led to Diamond's demise
- Carmon and Miliband clash over inquiry
- Barclays ready to talk at next senate hearing but should you interpret this as guidance to lower rate?
- Dealing: Bank Libor rate submissions 2005-08
- Daughter leads her support "Delmeida @IMAC"
- Full coverage of the Libor rate-fixing scandal

The definite particle? Higgs boson discovered? Live coverage

Hadley Freeman I'm stumped by cricket and other baffling British

Sport Man Utd to float in New York





INTRODUCCIÓN



Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC ☆

ATLAS Collaboration *

This paper is dedicated to the memory of our ATLAS colleagues who did not live to see the full impact and significance of their contributions to the experiment.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 31 July 2012
Received in revised form 8 August 2012
Accepted 11 August 2012
Available online 14 August 2012
Editor: W.-D. Schlatter

$\sqrt{s} = 7$ TeV in 2011 and 5.8 fb^{-1} at $\sqrt{s} = 8$ TeV in 2012.

A search for the Standard Model Higgs boson in proton–proton collisions with the ATLAS detector at the LHC is presented. The datasets used correspond to integrated luminosities of approximately 4.8 fb^{-1} collected at $\sqrt{s} = 7$ TeV in 2011 and 5.8 fb^{-1} at $\sqrt{s} = 8$ TeV in 2012. Individual searches in the channels $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\ell$, $H \rightarrow \gamma\gamma$ and $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow e\nu\mu\nu$ in the 8 TeV data are combined with previously published results of searches for $H \rightarrow ZZ^{(*)}$, $WW^{(*)}$, $b\bar{b}$ and $\tau^+\tau^-$ in the 7 TeV data and results from improved analyses of the $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\ell$ and $H \rightarrow \gamma\gamma$ channels in the 7 TeV data. Clear evidence for the production of a neutral boson with a measured mass of 126.0 ± 0.4 (stat) ± 0.4 (sys) GeV is presented. This observation, which has a significance of 5.9 standard deviations, corresponding to a background fluctuation probability of 1.7×10^{-9} , is compatible with the production and decay of the Standard Model Higgs boson.

© 2012 CERN. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

mass of 126.0 ± 0.4 (stat) ± 0.4 (sys) GeV

$H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\ell$, $H \rightarrow \gamma\gamma$ and $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow e\nu\mu\nu$



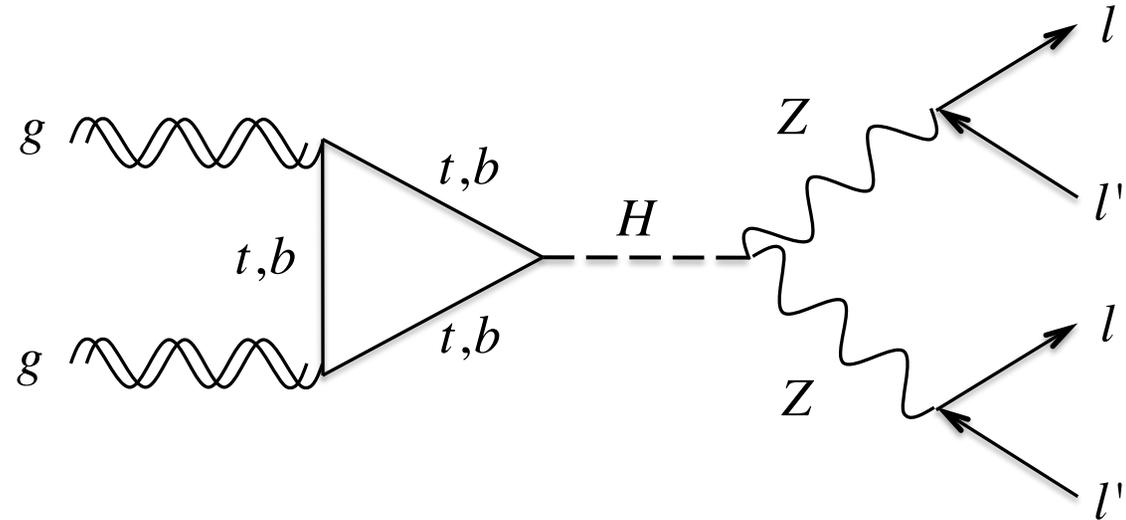


INTRODUCCIÓN

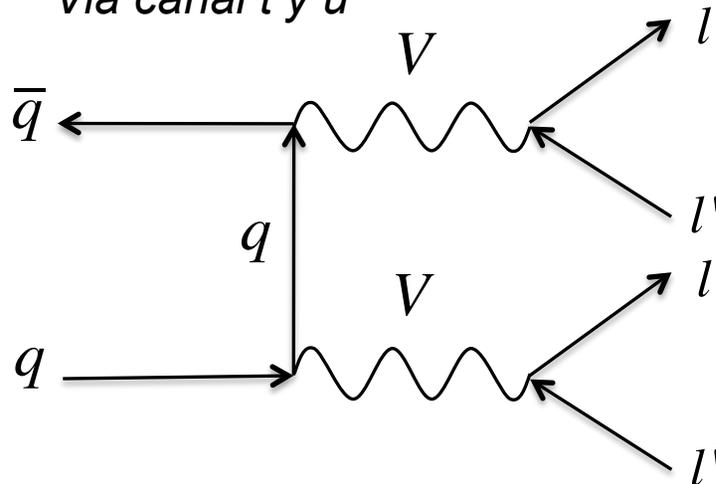
Producción de cuatro leptones en procesos hadrónicos

Via bosón de Higgs

$$gg \rightarrow H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$$



Via canal t y u



El canal t y u prevén de un **background** para el estudio del boson de Higgs. Adicionalmente estos procesos se conocen muy bien teórica y experimentalmente, por lo que la producción de pares de Z preve una prueba al sector electrodébil.



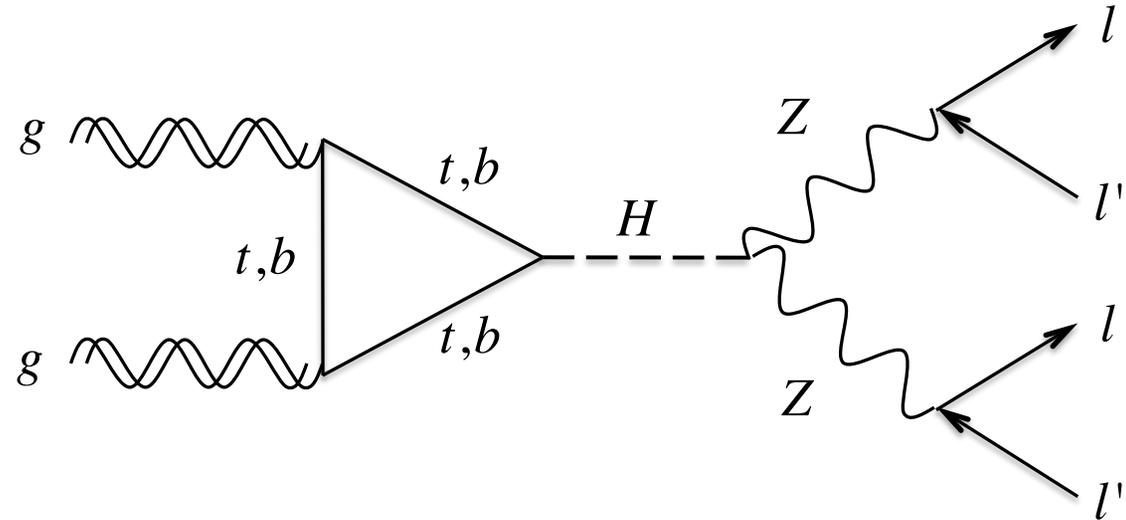


INTRODUCCIÓN

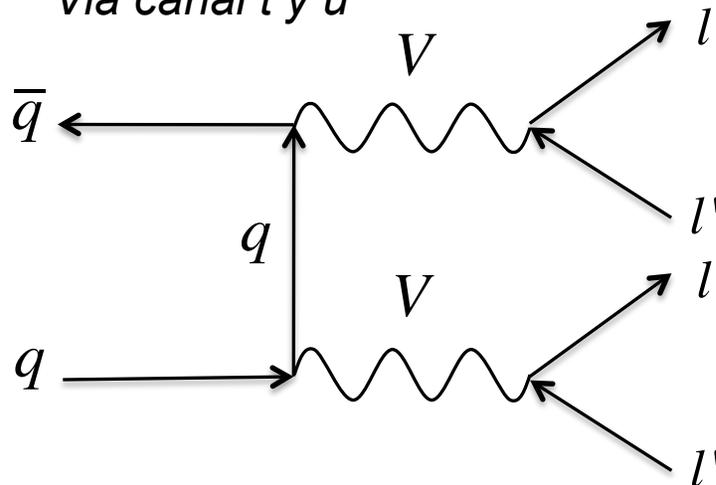
Producción de cuatro leptones en procesos hadrónicos

Via bosón de Higgs

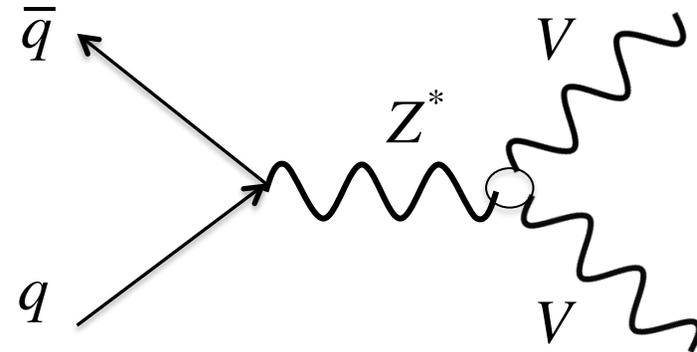
$$gg \rightarrow H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$$



Via canal t y u



Un exceso de eventos podría indicar la existencia de nueva física.





ACOPLAMIENTOS TRIPLES DE BOSONES DE NORMA NEUTROS

Sector de norma en el Modelo Estándar

El Modelo Estándar describe la interacción electrodébil a través del grupo de norma $SU(2)_L \times U(1)_Y$ y la respectiva dinámica, se describe en el sector de norma.

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} W_{\mu\nu}^i W_i^{\mu\nu} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu}$$

$$W_{\mu\nu}^i = \partial_\mu W_\nu^i - \partial_\nu W_\mu^i - g\epsilon_{ijk} W_\mu^j W_\nu^k$$

$$B_{\mu\nu} = \partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu$$



ACOPLAMIENTOS TRIPLES DE BOSONES DE NORMA NEUTROS

Sector de norma en el Modelo Estándar

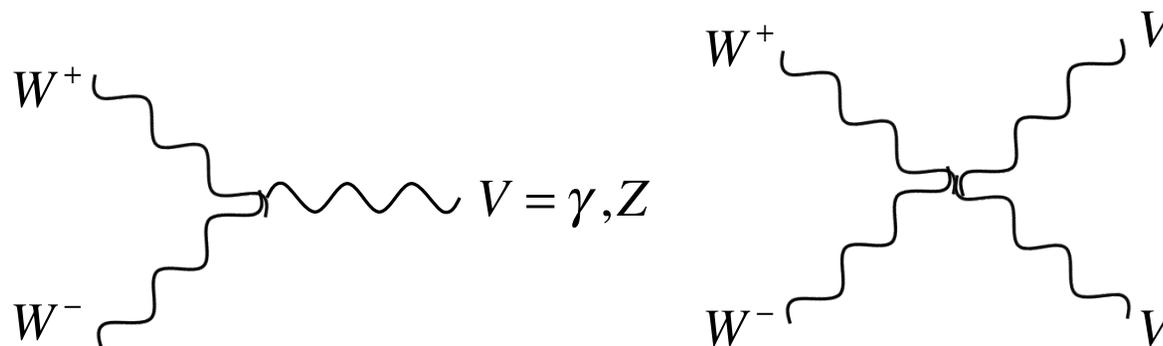
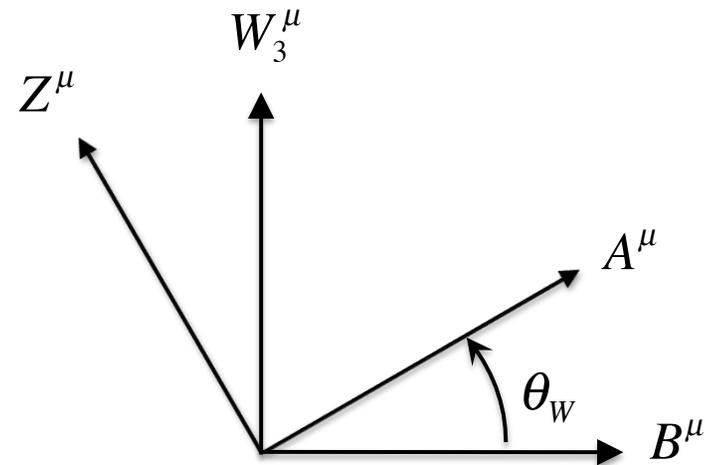
El Modelo Estándar describe la interacción electrodébil a través del grupo de norma $SU(2)_L \times U(1)_Y$ y la respectiva dinámica, se describe en el sector de norma.

Después del rompimiento espontáneo de la simetría, los estados físicos de los bosones de norma neutros se relacionan ortogonalmente

$$A^\mu = \cos \theta_W B^\mu + \sin \theta_W W_3^\mu$$

$$Z^\mu = -\sin \theta_W B^\mu + \cos \theta_W W_3^\mu$$

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} W_{\mu\nu}^i W_i^{\mu\nu} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu}$$



En este escenario y a nivel árbol, existen sólo dos tipos de acoplamientos con bosones de norma neutros.



ACOPLAMIENTOS TRIPLES DE BOSONES DE NORMA NEUTROS

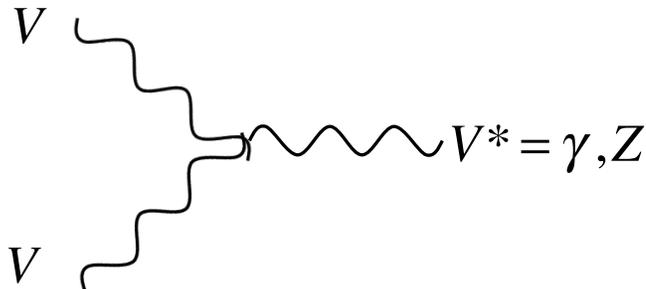
Sector de norma en el Modelo Estándar

El Modelo Estándar describe la interacción electrodébil a través del grupo de norma $SU(2)_L \times U(1)_Y$ y la respectiva dinámica, se describe en el sector de norma.

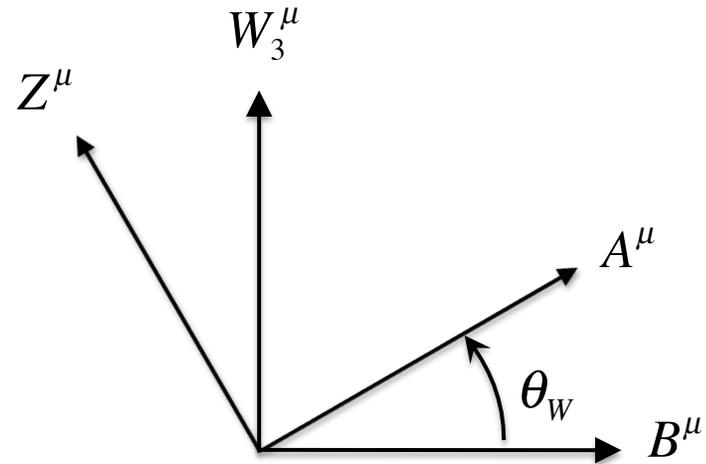
Después del rompimiento espontáneo de la simetría, los estados físicos de los bosones de norma neutros se relacionan ortogonalmente

$$A^\mu = \cos \theta_W B^\mu + \sin \theta_W W_3^\mu$$

$$Z^\mu = -\sin \theta_W B^\mu + \cos \theta_W W_3^\mu$$



$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} W_{\mu\nu}^i W_i^{\mu\nu} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu}$$



Por otro lado, los acoplamientos de tres bosones de norma neutros (ATBNN) están ausentes a nivel árbol y de acuerdo al Teorema de Landau-Yang, este tipo de acoplamiento únicamente es posible si un bosón de norma es una partícula virtual.

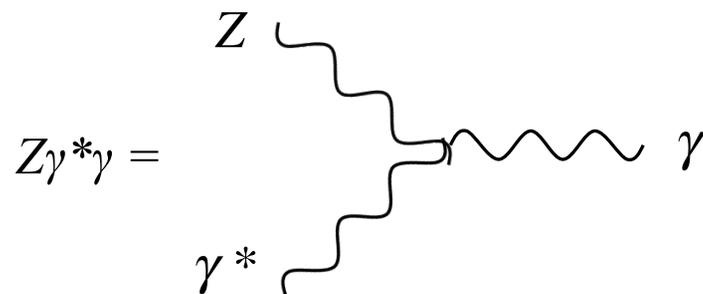
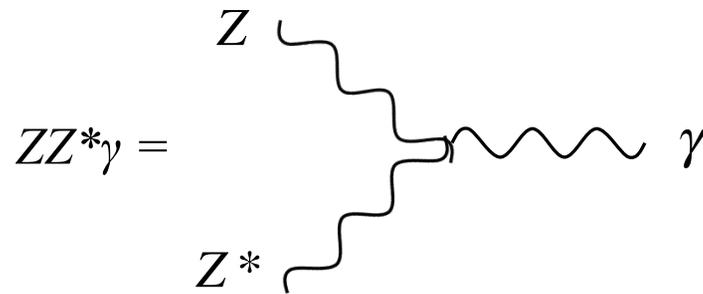
L. D. Landau, Dokl. Akad. Nauk., USSR 60, 207 (1948);
C. N. Yang, Phys. Rev. 77, 242 (1950).



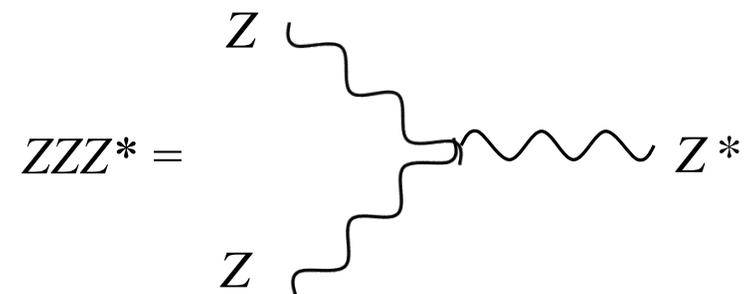
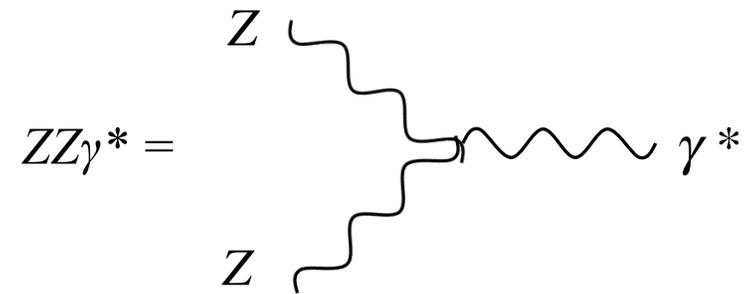
TIPOS DE ATBNN

De acuerdo al teorema de Landau-Yang y a la invariancia de norma electromagnética, puede haber únicamente cuatro distintos ATBNN.

Acoplamiento tipo $ZV^*\gamma$



Acoplamiento tipo ZZV^*



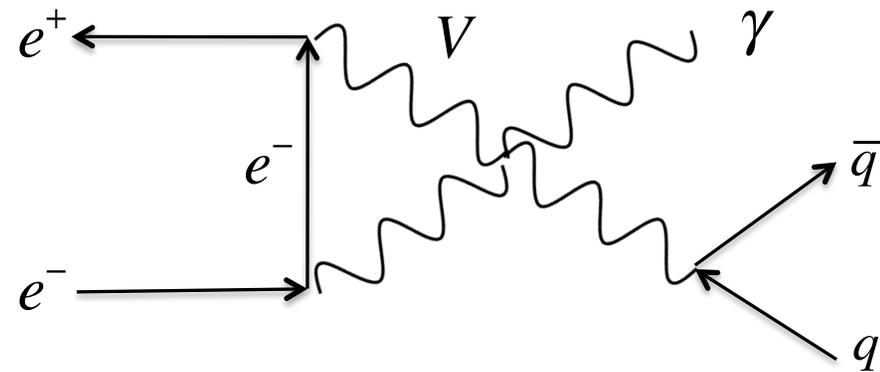
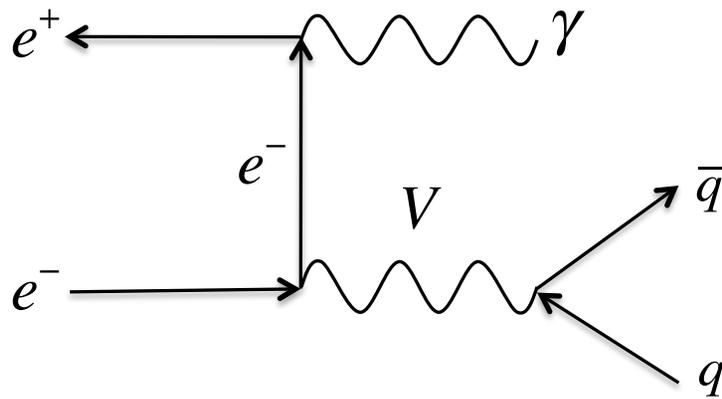
El acoplamiento de tres fotones $\gamma\gamma\gamma$ no se permite por invariancia de norma (Teorema de Furry).



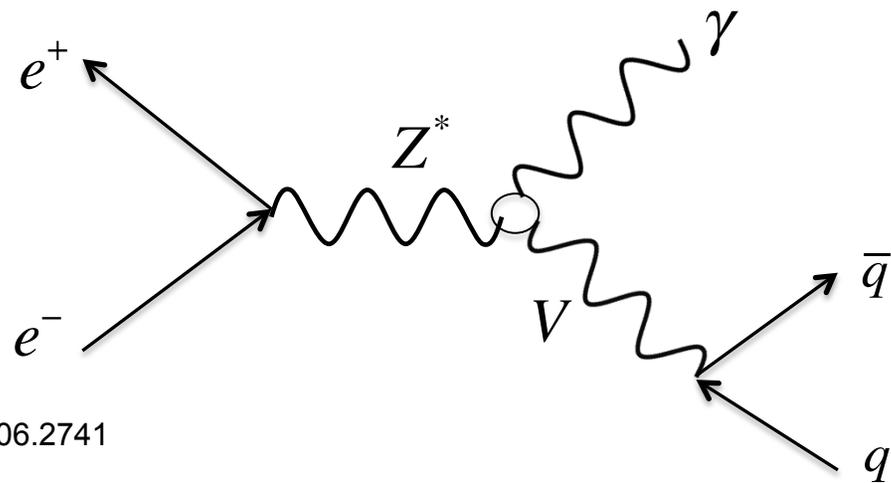


BUSQUEDA EXPERIMENTAL DE ATBNN

Acoplamiento $Z^*V\gamma$ en el proceso $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}\gamma$



“No evidence for the presence of such couplings is observed, in agreement with the predictions of the Standard Model”



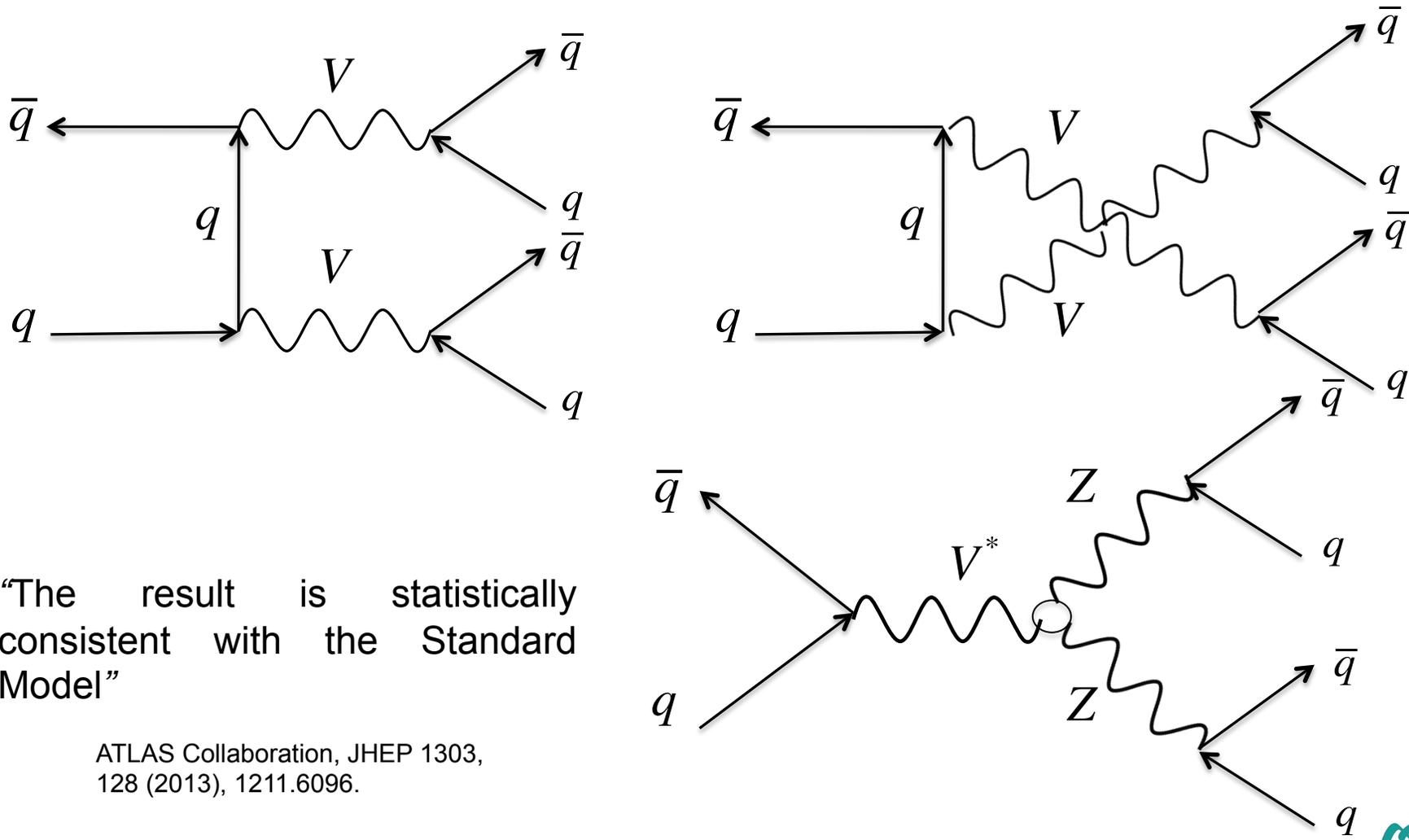
DELPHI Collaboration, Eur. Phys. J. C51, 525 (2007), 0706.2741





BUSQUEDA EXPERIMENTAL DE ATBNN

Acoplamiento ZZV^* en el proceso $q\bar{q} \rightarrow q\bar{q}q\bar{q}(q\bar{q}\mu^+\mu^-)$



“The result is statistically consistent with the Standard Model”

ATLAS Collaboration, JHEP 1303, 128 (2013), 1211.6096.





BUSQUEDA EXPERIMENTAL DE ATBNN

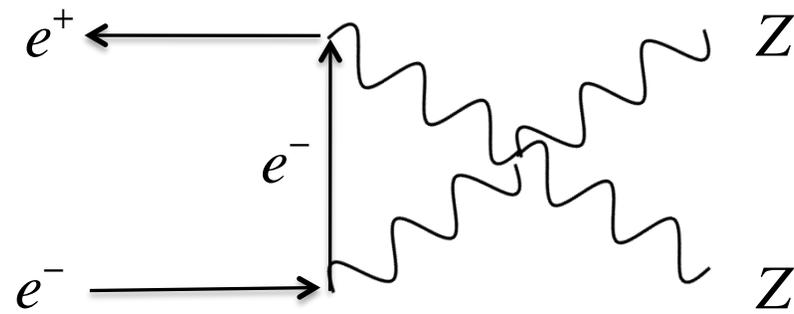
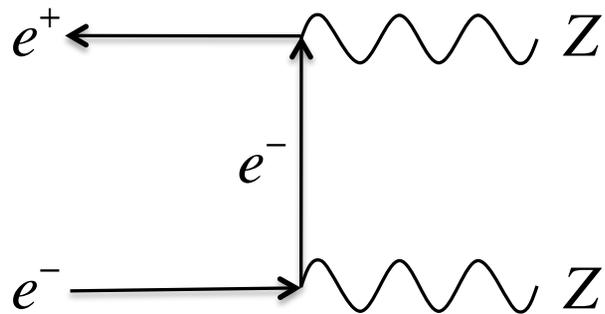
	$Z^*V\gamma$	Z^*ZV	$l, l' = e, \mu$
<p>LEP</p> <p>$\sqrt{s} = 183 - 208 GeV$</p>	$e^+e^- \rightarrow q\bar{q}\gamma$ $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}\gamma$	$e^+e^- \rightarrow q\bar{q}q\bar{q}$ $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}l^+l^-$	$e^+e^- \rightarrow q\bar{q}\nu\bar{\nu}$ $e^+e^- \rightarrow l^+l^-\nu\bar{\nu}$
	L3 Collaboration, Phys. Lett B 597 (2004), 119-130	DELPHI Collaboration, Eur. Phys. J. C51, 525 (2007), 0706.2741	
<p>Tevatron</p> <p>$\sqrt{s} = 1.96 TeV$</p>	$p\bar{p} \rightarrow l^+l^-\gamma + X \quad 6.2 fb^{-1}$	$p\bar{p} \rightarrow l'^+l'^-l^+l^- + X \quad 1 fb^{-1}$	
	D0 Collaboration, Phys. Rev. D85, 052001 (2012), 1111.3684.	D0 Collaboration, Phys. Rev. Lett. 100, 131801 (2008), 0712.0599.	
<p>LHC</p> <p>$\sqrt{s} = 7 TeV$</p>	$pp \rightarrow \nu\bar{\nu}\gamma + X \quad 5.0 fb^{-1}$	$pp \rightarrow l'^+l'^-l^+l^- + X \quad 5.0 fb^{-1}$	
	CMS Collaboration, JHEP 1310, 164 (2013), 1309.1117	CMS Collaboration, JHEP 1301, 063 (2013), 1211.4890	
			$l, l' = e, \mu, \tau$
		$pp \rightarrow l^+l^-\nu\bar{\nu} + X$ $pp \rightarrow l'^+l'^-l^+l^- + X \quad 4.6 fb^{-1}$	
		ATLAS Collaboration, JHEP 1303, 128 (2013), 1211.6096.	



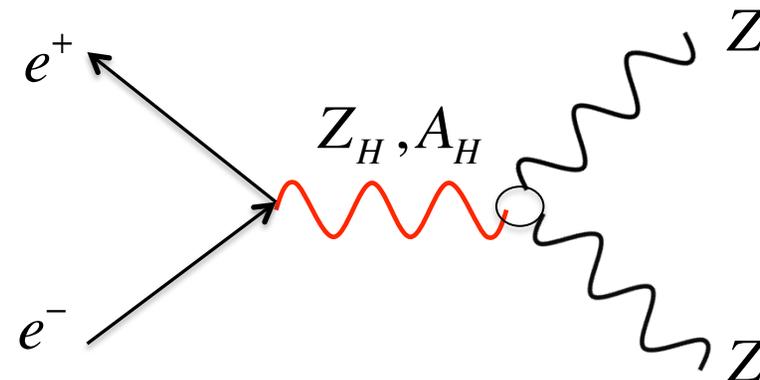


NUEVA FÍSICA EN LA PRODUCCIÓN DE BNN

Proceso $e^+e^- \rightarrow ZZ$



Una desviación en la sección eficaz en la producción de bosones de norma neutros, podría indicar la existencia de bosones de norma pesados del **Modelo de Higgs Pequeño**.



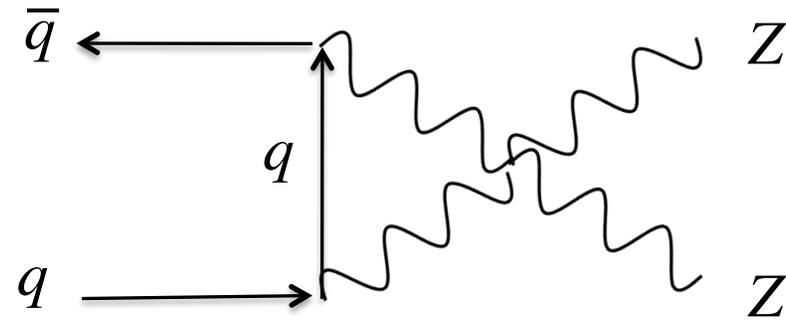
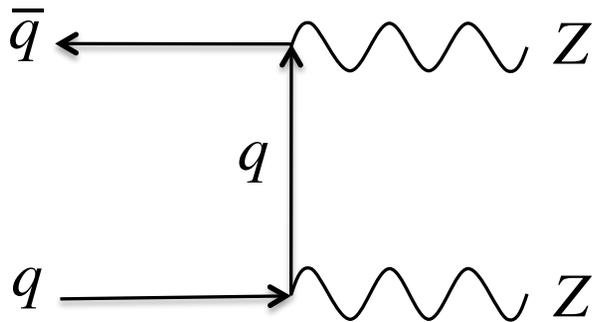
G Tavares-Velasco et al 2012 J. Phys. G. Nucl. Part. Phys. 39 015003



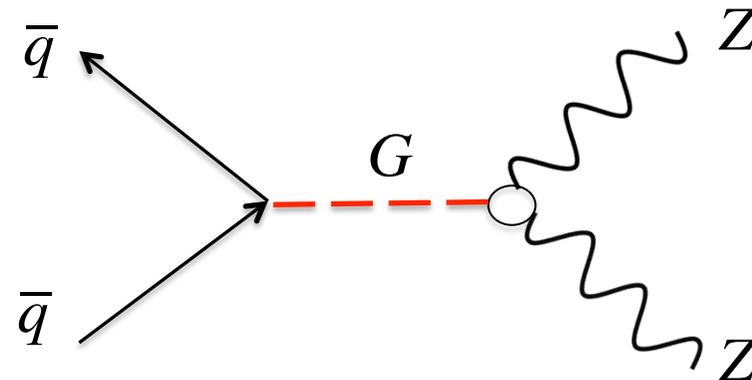


NUEVA FÍSICA EN LA PRODUCCIÓN DE BNN

Proceso $\bar{q}q \rightarrow ZZ$



Una desviación en la sección eficaz en la producción de bosones de norma neutros, podría indicar la existencia de un **Gravitón en Dimensiones Extras**.



Martin Kober et al, Phys. Rev. D 76, 125001 (2007).





ESTRUCTURA MATEMÁTICA DE LOS ATBNN

El lagrangiano efectivo que describe la interacción $ZV^*\gamma$ contiene operadores de orden 6 y 8, este tiene la siguiente estructura:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{ZV^*\gamma} = \frac{e}{m_Z^2} \left\{ \right. & \underline{-[h_1^\gamma (\partial^\alpha F_{\alpha\mu}) + h_1^Z (\partial^\alpha Z_{\alpha\mu})] Z_\beta F^{\mu\beta}} \\ & - \frac{1}{m_Z^2} \left[\underline{h_2^\gamma (\partial_\alpha \partial_\beta \partial^\rho F_{\rho\mu}) + h_2^Z [\partial_\alpha \partial_\beta (\partial^2 + m_Z^2) Z_\mu]} \right] Z^\alpha F^{\mu\beta} \\ & \underline{-[h_3^\gamma (\partial_\beta F^{\beta\mu}) + h_3^Z (\partial_\beta Z^{\beta\mu})] Z^\alpha \tilde{F}_{\mu\alpha}} \\ & \left. + \frac{1}{2m_Z^2} \left[\underline{h_4^\gamma (\partial^2 \partial^\beta F^{\mu\alpha}) + h_4^Z (\partial^2 + m_Z^2) \partial^\beta Z^{\mu\alpha}} \right] Z_\beta \tilde{F}_{\mu\alpha} \right\} \end{aligned}$$

Gounaris, J. Layssac, and F. Renard, Phys.Rev. D62, 073012 (2000)





ESTRUCTURA MATEMÁTICA DE LOS ATBNN

El lagrangiano efectivo que describe la interacción $ZV^*\gamma$ contiene operadores de orden 6 y 8, este tiene la siguiente estructura:

$$\mathcal{L}_{ZV^*\gamma} = \frac{e}{m_Z^2} \left\{ \begin{aligned} & -[h_1^\gamma (\partial^\alpha F_{\alpha\mu}) + h_1^Z (\partial^\alpha Z_{\alpha\mu})] Z_\beta F^{\mu\beta} \\ & - \frac{1}{m_Z^2} [h_2^\gamma (\partial_\alpha \partial_\beta \partial^\rho F_{\rho\mu}) + h_2^Z [\partial_\alpha \partial_\beta (\partial^2 + m_Z^2) Z_\mu]] Z^\alpha F^{\mu\beta} \\ & - [h_3^\gamma (\partial_\beta F^{\beta\mu}) + h_3^Z (\partial_\beta Z^{\beta\mu})] Z^\alpha \tilde{F}_{\mu\alpha} \\ & + \frac{1}{2m_Z^2} [h_4^\gamma (\partial^2 \partial^\beta F^{\mu\alpha}) + h_4^Z (\partial^2 + m_Z^2) \partial^\beta Z^{\mu\alpha}] Z_\beta \tilde{F}_{\mu\alpha} \end{aligned} \right\}$$

Aquí h_i^V son factores de forma, donde las estructuras de Lorentz asociadas a $i=1,2$ son *impares ante CP* y *pares ante CP*, para $i=3,4$.





ESTRUCTURA MATEMÁTICA DE LOS ATBNN

El lagrangiano efectivo que describe la interacción $ZV^*\gamma$ contiene operadores de orden 6 y 8, este tiene la siguiente estructura:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{ZV^*\gamma} = \frac{e}{m_Z^2} \left\{ & -[h_1^\gamma (\partial^\alpha F_{\alpha\mu}) + h_1^Z (\partial^\alpha Z_{\alpha\mu})] Z_\beta F^{\mu\beta} \right. \\ & - \frac{1}{m_Z^2} [h_2^\gamma (\partial_\alpha \partial_\beta \partial^\rho F_{\rho\mu}) + h_2^Z [\partial_\alpha \partial_\beta (\partial^2 + m_Z^2) Z_\mu]] Z^\alpha F^{\mu\beta} \\ & - [h_3^\gamma (\partial_\beta F^{\beta\mu}) + h_3^Z (\partial_\beta Z^{\beta\mu})] Z^\alpha \tilde{F}_{\mu\alpha} \\ & \left. + \frac{1}{2m_Z^2} [h_4^\gamma (\partial^2 \partial^\beta F^{\mu\alpha}) + h_4^Z (\partial^2 + m_Z^2) \partial^\beta Z^{\mu\alpha}] Z_\beta \tilde{F}_{\mu\alpha} \right\} \end{aligned}$$

Aquí h_i^V son factores de forma, donde las estructuras de Lorentz asociadas a $i=1,2$ son impares ante CP y pares ante CP , para $i=3,4$. El vértice que se deriva de este lagrangiano y que además, respeta la simetría de Bose es el siguiente:

$$\Gamma_{ZV^*\gamma}^{\alpha\beta\mu}(p_1, p_2, q) = i \frac{(p_2^2 - m_V^2)}{m_Z^2} \left[h_1^V (q^\beta g^{\alpha\mu} - q^\alpha g^{\beta\mu}) + \frac{h_2^V}{m_Z^2} p_2^\alpha [(q \cdot p_2) g^{\beta\mu} - q^\beta p_2^\mu] \right. \\ \left. - h_3^V \varepsilon^{\beta\alpha\mu\rho} p_{2\rho} - \frac{h_4^V}{m_Z^2} p_2^\alpha \varepsilon^{\beta\mu\rho\sigma} p_{2\rho} q_\sigma \right]$$

K. Hagiwara et al, Nucl. Phys. B 282, 253 (1987)





ESTRUCTURA MATEMÁTICA DE LOS ATBNN

El lagrangiano efectivo que describe la interacción $ZV^*\gamma$ contiene operadores de orden 6 y 8, este tiene la siguiente estructura:

$$\mathcal{L}_{ZV^*\gamma} = \frac{e}{m_Z^2} \left\{ \begin{aligned} & -[h_1^\gamma (\partial^\alpha F_{\alpha\mu}) + h_1^Z (\partial^\alpha Z_{\alpha\mu})] Z_\beta F^{\mu\beta} \\ & - \frac{1}{m_Z^2} [h_2^\gamma (\partial_\alpha \partial_\beta \partial^\rho F_{\rho\mu}) + h_2^Z [\partial_\alpha \partial_\beta (\partial^2 + m_Z^2) Z_\mu]] Z^\alpha F^{\mu\beta} \\ & - [h_3^\gamma (\partial_\beta F^{\beta\mu}) + h_3^Z (\partial_\beta Z^{\beta\mu})] Z^\alpha \tilde{F}_{\mu\alpha} \\ & + \frac{1}{2m_Z^2} [h_4^\gamma (\partial^2 \partial^\beta F^{\mu\alpha}) + h_4^Z (\partial^2 + m_Z^2) \partial^\beta Z^{\mu\alpha}] Z_\beta \tilde{F}_{\mu\alpha} \end{aligned} \right\}$$

Los respectivas cotas experimentales más recientes son las siguientes:

CP-impar

$$|h_1^Z| < 0.23 \quad |h_1^\gamma| < 0.14$$

DELPHI Collaboration, Eur. Phys. J. C51, 525 (2007), 0706.2741

$$-0.087 < h_2^Z < 0.079 \quad -0.050 < h_2^\gamma < 0.023$$

L3 Collaboration, Phys. Lett B 597 (2004) 119–130

CP-par

$$|h_3^Z| < 2.7 \times 10^{-3} \quad |h_3^\gamma| < 2.9 \times 10^{-3}$$

$$|h_4^Z| < 1.3 \times 10^{-5} \quad |h_4^\gamma| < 1.5 \times 10^{-5}$$

CMS Collaboration, JHEP 1301, 063 (2013), 1211.4890





ESTRUCTURA MATEMÁTICA DE LOS ATBNN

Para la interacción ZZV^* , el lagrangiano contiene únicamente operadores de orden 6 y su estructura tiene la siguiente forma:

$$\mathcal{L}_{ZZV^*} = \frac{e}{m_Z^2} \left\{ -[f_4^\gamma (\partial_\mu F^{\mu\beta}) + f_4^Z (\partial_\mu Z^{\mu\beta})] Z_\alpha (\partial^\alpha Z_\beta) + [f_5^\gamma (\partial^\alpha F_{\alpha\mu}) + f_5^Z (\partial^\alpha F_{\alpha\mu})] \tilde{Z}^{\mu\beta} Z_\beta \right\}$$

en este caso las estructuras de Lorentz asociadas al factor de forma f_4^V son **impares ante CP**, mientras que la asociada a f_5^V son **pares ante CP**.





ESTRUCTURA MATEMÁTICA DE LOS ATBNN

Para la interacción ZZV^* , el lagrangiano contiene únicamente operadores de orden 6 y su estructura tiene la siguiente forma:

$$\mathcal{L}_{ZZV^*} = \frac{e}{m_Z^2} \left\{ -[f_4^\gamma (\partial_\mu F^{\mu\beta}) + f_4^Z (\partial_\mu Z^{\mu\beta})] Z_\alpha (\partial^\alpha Z_\beta) + [f_5^\gamma (\partial^\alpha F_{\alpha\mu}) + f_5^Z (\partial^\alpha F_{\alpha\mu})] \tilde{Z}^{\mu\beta} Z_\beta \right\}$$

en este caso las estructuras de Lorentz asociadas al factor de forma f_4^V es impares ante CP, mientras que la asociada a f_5^V son pares ante CP. Entonces, el vértice asociado y que además también respeta la simetría de Bose, tiene la siguiente forma:

$$\Gamma_{ZZV^*}^{\alpha\beta\mu}(p_1, p_2, q) = i \frac{(q^2 - m_V^2)}{m_Z^2} \left[f_4^V (q^\alpha g^{\beta\mu} + q^\beta g^{\alpha\mu}) - f_5^V \varepsilon^{\mu\alpha\beta\rho} (p_1 - p_2)_\rho \right]$$

donde para el bosón Z $m_V = m_Z$

y para el fotón $m_V = 0$

K. Hagiwara et al, Nucl. Phys. B 282, 253 (1987)





ESTRUCTURA MATEMÁTICA DE LOS ATBNN

Para la interacción ZZV^* , el lagrangiano contiene únicamente operadores de orden 6 y su estructura tiene la siguiente forma:

$$\mathcal{L}_{ZZV^*} = \frac{e}{m_Z^2} \left\{ -[f_4^\gamma (\partial_\mu F^{\mu\beta}) + f_4^Z (\partial_\mu Z^{\mu\beta})] Z_\alpha (\partial^\alpha Z_\beta) + [f_5^\gamma (\partial^\alpha F_{\alpha\mu}) + f_5^Z (\partial^\alpha F_{\alpha\mu})] \tilde{Z}^{\mu\beta} Z_\beta \right\}$$

Los respectivas cotas experimentales más recientes son las siguientes:

CP-impar

$$-0.011 < f_4^Z < 0.012$$

$$-0.013 < f_4^\gamma < 0.015$$

CP-par

$$|f_5^Z| < 0.012$$

$$|f_5^\gamma| < 0.014$$

CMS Collaboration, JHEP 1310, 164 (2013), 1309.1117





EVOLUCIÓN DE LAS MEDICIONES EXPERIMENTALES

LEP

$$|h_1^Z| < 0.23$$
$$-0.087 < h_2^Z < 0.079$$

L3 Collaboration, Phys. Lett B
597 (2004) 119–130

$$|f_4^Z| < 0.30$$

L3 Collaboration, Phys. Lett B
597 (2004) 119–130

LHC $\sqrt{s} = 7\text{TeV}$

*Aún no hay algo
reportado*

$$-0.011 < f_4^Z < 0.012$$

5.0 fb⁻¹, CMS Collaboration, JHEP 1310,
164 (2013), 1309.1117

$$|f_4^Z| < 0.004$$

19.6 fb⁻¹, CMS Collaboration, arXiv:
1406.0113 Submitted on 31 May 2014 to
Phys. Lett. B

LHC $\sqrt{s} = 14\text{TeV}$

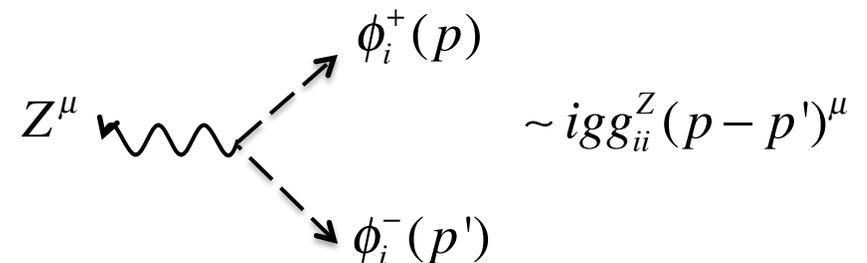
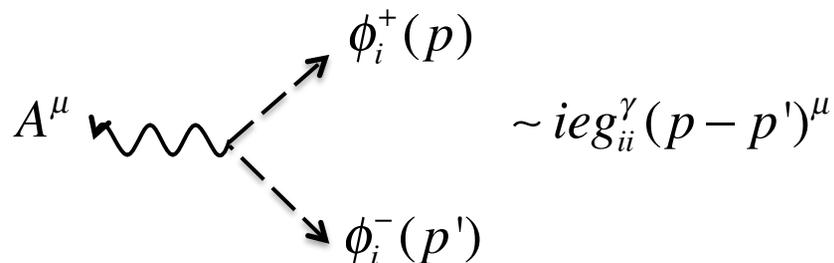




SECTOR ESCALAR CON CAMBIO DE SABOR

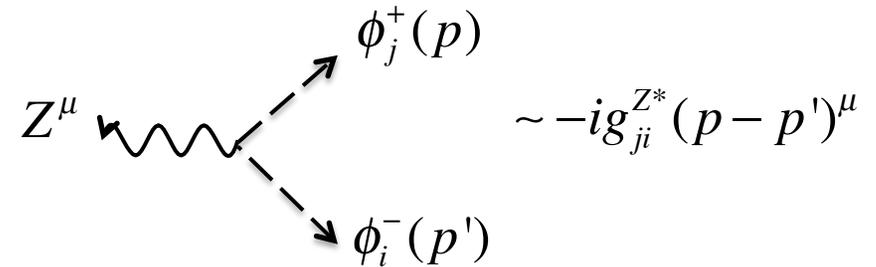
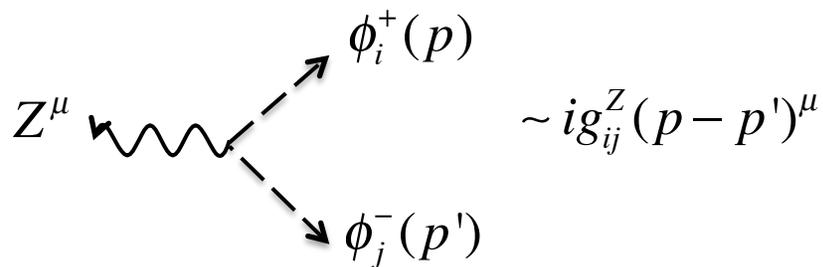
Vamos a considerar el sector escalar de algún modelo renormalizable, pero con más de un bosón escalar cargado. La parte que describe la interacción entre bosones de norma neutros con escalares cargados, es la siguiente:

$$\mathcal{L}_{FC} = ie \sum_i g_{ii} A_\mu \phi_i^+ \overleftrightarrow{\partial}^\mu \phi_i^- + ig \sum_i g_{ii} Z_\mu \phi_i^+ \overleftrightarrow{\partial}^\mu \phi_i^-$$



donde g_{ii} son números reales. Además se considera una parte adicional, donde el bosón Z puede cambiar sabor en este sector.

$$\mathcal{L}_{FV} = ig \sum_{i \neq j} Z_\mu g_{ij} \phi_i^+ \overleftrightarrow{\partial}^\mu \phi_j^- + h.c.$$



aquí g_{ij} es un número complejo.





ATBNN INDUCIDOS POR EL SECTOR ESCALAR

Acoplamiento $Z_\alpha(p_1)Z_\beta^*(p_2)A_\mu(q)$

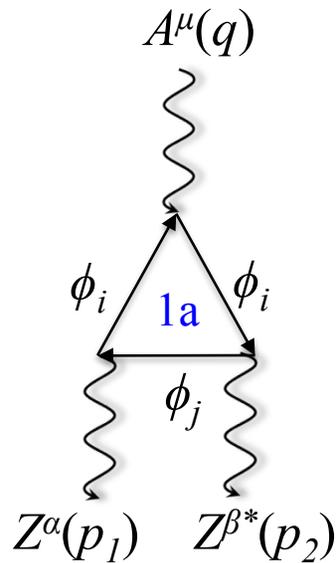
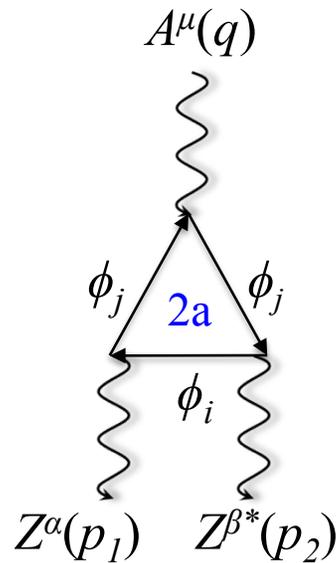
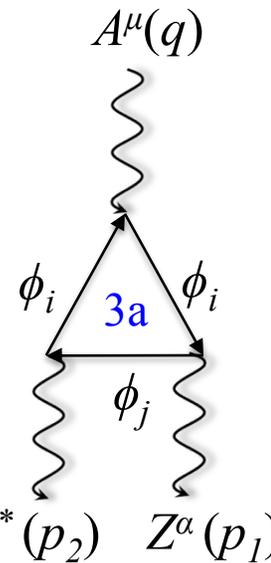


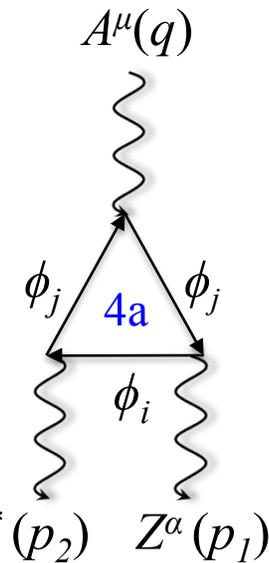
Diagrama A



más $i \leftrightarrow j$



más $p_1^\alpha \leftrightarrow p_2^\beta$ por la simetría de Bose



$$\Gamma_{ZZ^*}^{\alpha\beta\mu}(p_1, p_2, q) = i \frac{(p_2^2 - m_Z^2)}{m_Z^2} \left[\boxed{h_1^Z} (q^\beta g^{\alpha\mu} - q^\alpha g^{\beta\mu}) + \boxed{h_2^Z} p_2^\alpha [(q \cdot p_2) g^{\beta\mu} - q^\beta p_2^\mu] - h_3^Z \varepsilon^{\beta\alpha\mu\rho} p_{2\rho} - \frac{h_4^Z}{m_Z^2} p_2^\alpha \varepsilon^{\beta\mu\rho\sigma} p_{2\rho} q_\sigma \right]$$

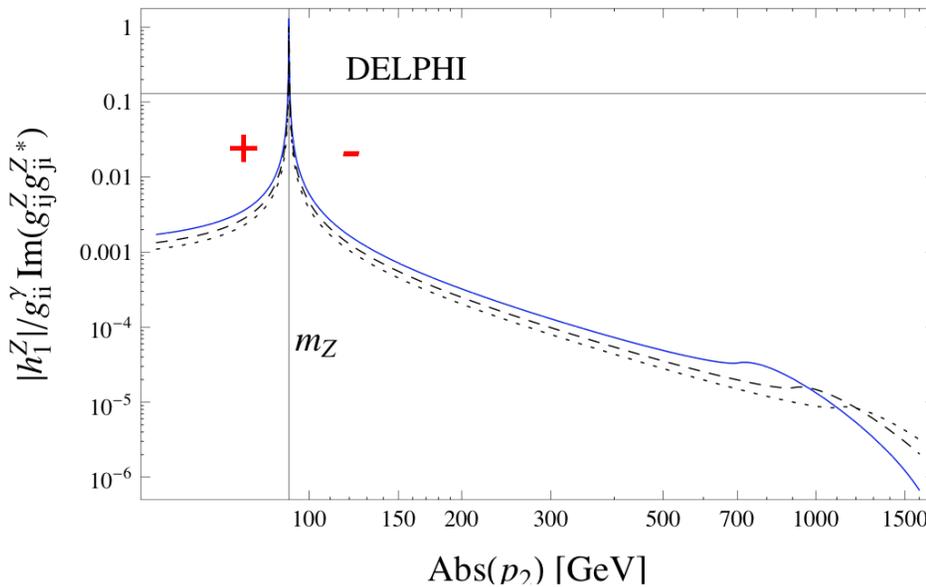




ATBNN INDUCIDOS POR EL SECTOR ESCALAR

Acoplamiento $Z_\alpha(p_1)Z_\beta^*(p_2)A_\mu(q)$

$$h_1^Z = \frac{m_Z^2 g_{ii}^\gamma \text{Im}(g_{ij}^Z g_{ji}^{Z*})}{12\pi^2 (m_Z^2 - p_2^2)^3} H_1(p_2^2, \Delta m_{ij}, m_i^2)$$



Parámetros utilizados

$$m_i = 300, 400, 500 \text{ GeV}$$

$$\Delta m_i = m_i - m_j = 100 \text{ GeV}$$

$$\Gamma_{ZZ^* \gamma}^{\alpha\beta\mu}(p_1, p_2, q) = i \frac{(p_2^2 - m_Z^2)}{m_Z^2} \left[h_1^Z (q^\beta g^{\alpha\mu} - q^\alpha g^{\beta\mu}) + \frac{h_2^Z}{m_Z^2} p_2^\alpha [(q \cdot p_2) g^{\beta\mu} - q^\beta p_2^\mu] - h_3^Z \varepsilon^{\beta\alpha\mu\rho} p_{2\rho} - \frac{h_4^Z}{m_Z^2} p_2^\alpha \varepsilon^{\beta\mu\rho\sigma} p_{2\rho} q_\sigma \right]$$

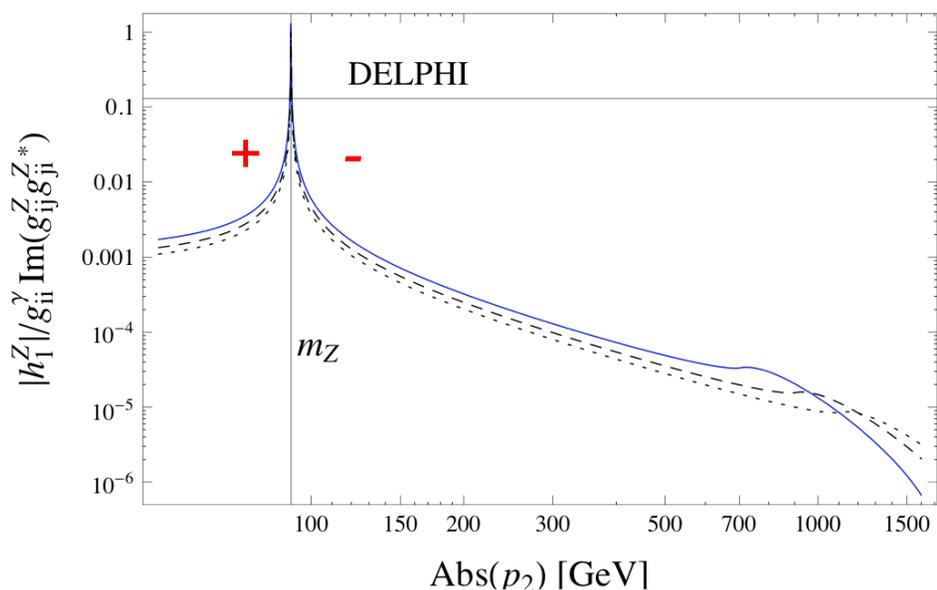




ATBNN INDUCIDOS POR EL SECTOR ESCALAR

Acoplamiento $Z_\alpha(p_1)Z_\beta^*(p_2)A_\mu(q)$

$$h_1^Z = \frac{m_Z^2 g_{ii}^\gamma \text{Im}(g_{ij}^Z g_{ji}^{Z*})}{12\pi^2 (m_Z^2 - p_2^2)^3} H_1(p_2^2, \Delta m_{ij}, m_i^2)$$



Parámetros utilizados

$$m_i = 300, 400, 500 \text{ GeV}$$

$$\Delta m_i = m_i - m_j = 100 \text{ GeV}$$

Cota experimental más reciente

$$\sqrt{s} = 183 - 208 \text{ GeV}$$

$$|h_1^Z| < 0.23 \quad |h_1^\gamma| < 0.14$$

DELPHI Collaboration, Eur. Phys. J. C51, 525 (2007), 0706.2741

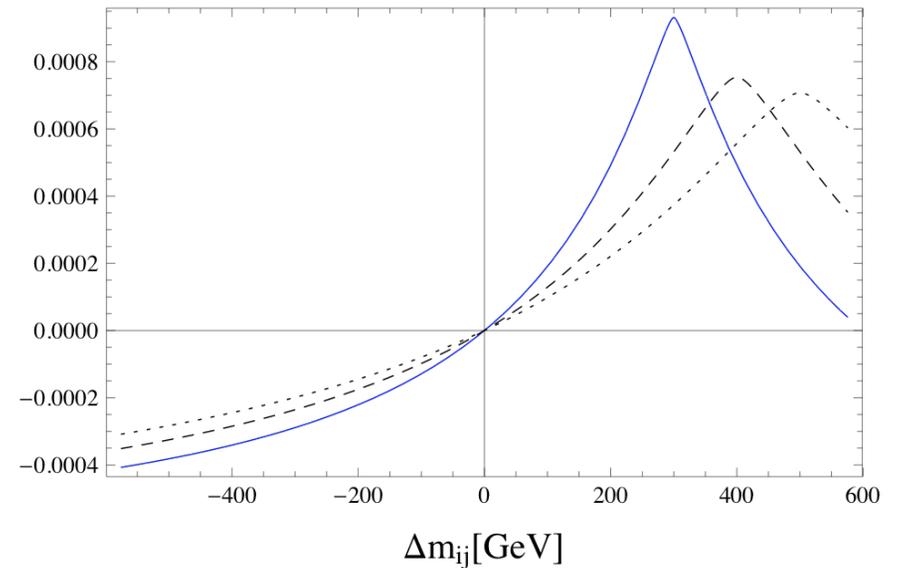
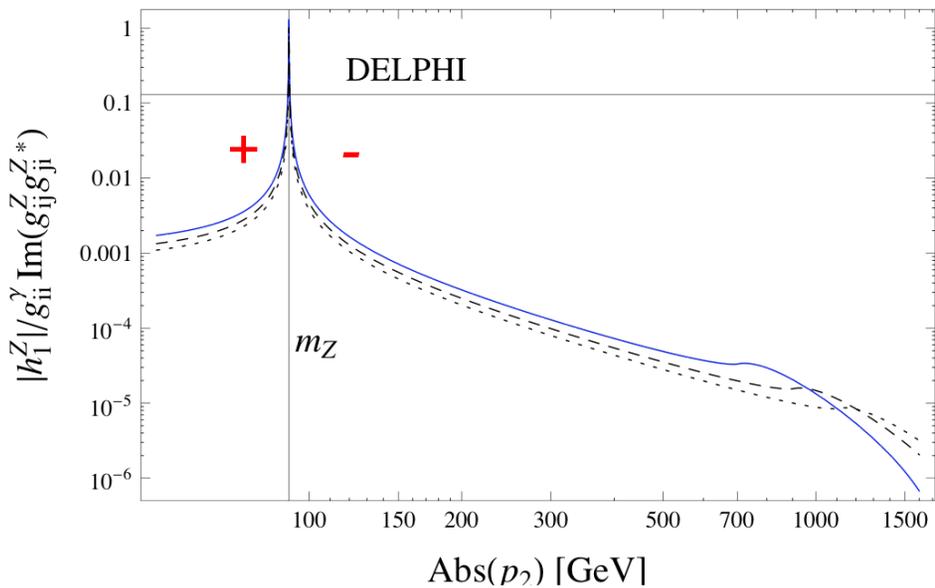




ATBNN INDUCIDOS POR EL SECTOR ESCALAR

Acoplamiento $Z_\alpha(p_1)Z_\beta^*(p_2)A_\mu(q)$

$$h_1^Z = \frac{m_Z^2 g_{ii}^\gamma \text{Im}(g_{ij}^Z g_{ji}^{Z*})}{12\pi^2 (m_Z^2 - p_2^2)^3} H_1(p_2^2, \Delta m_{ij}, m_i^2)$$



Cota experimental más reciente

$$\sqrt{s} = 183 - 208 \text{ GeV}$$

$$|h_1^Z| < 0.23 \quad |h_1^\gamma| < 0.14$$

DELPHI Collaboration, Eur. Phys. J. C51, 525 (2007), 0706.2741





ATBNN INDUCIDOS POR EL SECTOR ESCALAR

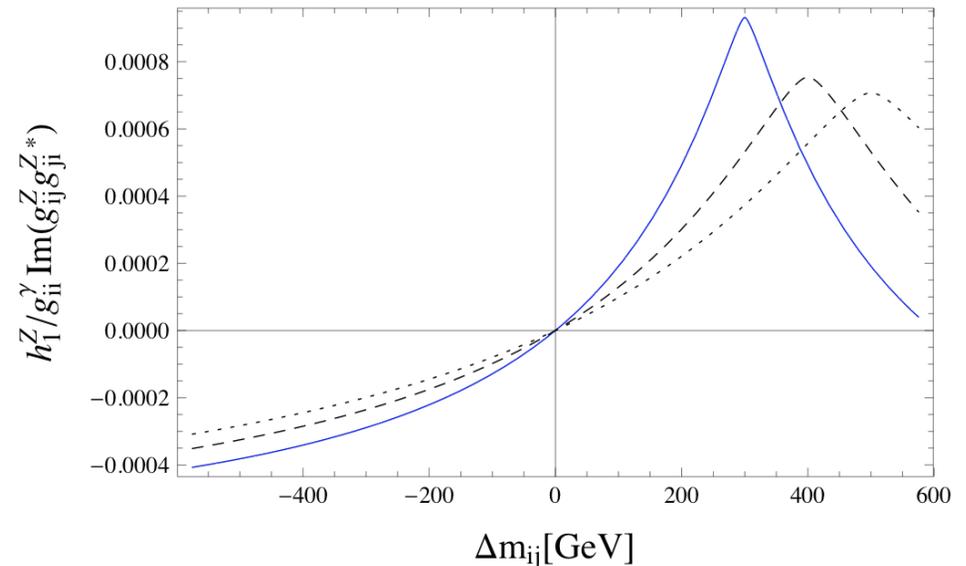
Acoplamiento $Z_\alpha(p_1)Z_\beta^*(p_2)A_\mu(q)$

$$h_1^Z = \frac{m_Z^2 g_{ii}^\gamma \text{Im}(g_{ij}^Z g_{ji}^{Z*})}{12\pi^2 (m_Z^2 - p_2^2)^3} H_1(p_2^2, \Delta m_{ij}, m_i^2)$$

Párametros utilizados

$$m_i = 300, 400, 500 \text{ GeV}$$

$$|p_2| = 300 \text{ GeV}$$



Cota experimental más reciente

$$\sqrt{s} = 183 - 208 \text{ GeV}$$

$$|h_1^Z| < 0.23 \quad |h_1^\gamma| < 0.14$$

DELPHI Collaboration, Eur. Phys. J. C51, 525 (2007), 0706.2741





ATBNN INDUCIDOS POR EL SECTOR ESCALAR

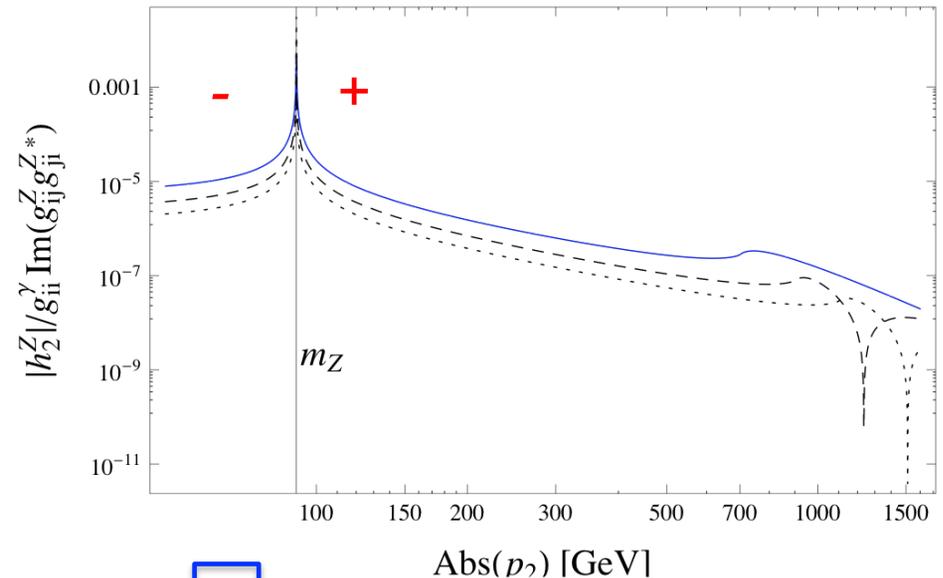
Acoplamiento $Z_\alpha(p_1)Z_\beta^*(p_2)A_\mu(q)$

$$h_2^Z = \frac{m_Z^4 g_{ii}^\gamma \text{Im}(g_{ij}^Z g_{ji}^{Z*})}{6\pi^2 (m_Z^2 - p_2^2)^4} H_2(p_2^2, \Delta m_{ij}, m_i^2)$$

Parámetros utilizados

$$m_i = 300, 400, 500 \text{ GeV}$$

$$\Delta m_i = m_i - m_j = 100 \text{ GeV}$$



$$\Gamma_{ZZ^*\gamma}^{\alpha\beta\mu}(p_1, p_2, q) = i \frac{(p_2^2 - m_Z^2)}{m_Z^2} \left[h_1^Z (q^\beta g^{\alpha\mu} - q^\alpha g^{\beta\mu}) + \boxed{h_2^Z} p_2^\alpha [(q \cdot p_2) g^{\beta\mu} - q^\beta p_2^\mu] - h_3^Z \varepsilon^{\beta\alpha\mu\rho} p_{2\rho} - \frac{h_4^Z}{m_Z^2} p_2^\alpha \varepsilon^{\beta\mu\rho\sigma} p_{2\rho} q_\sigma \right]$$





ATBNN INDUCIDOS POR EL SECTOR ESCALAR

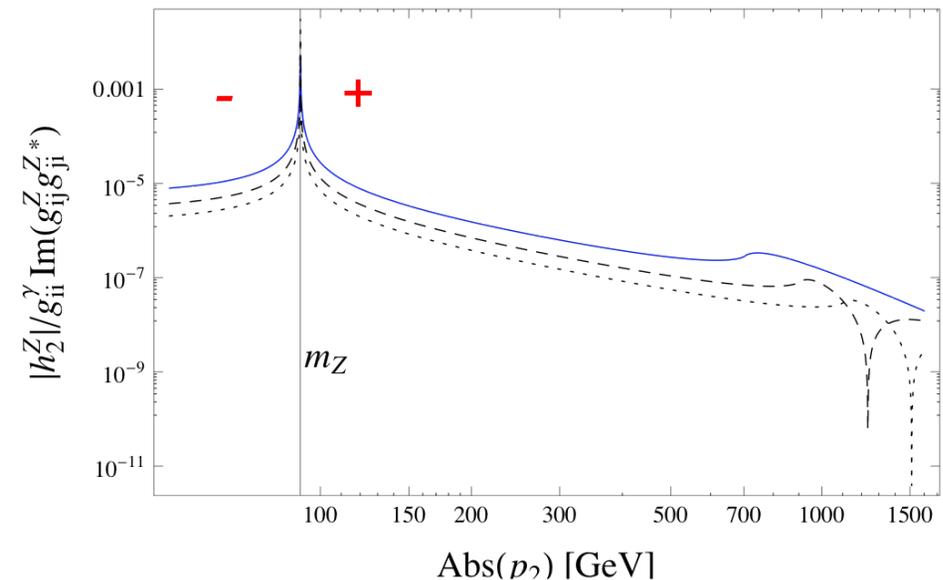
Acoplamiento $Z_\alpha(p_1)Z_\beta^*(p_2)A_\mu(q)$

$$h_2^Z = \frac{m_Z^4 g_{ii}^\gamma \text{Im}(g_{ij}^Z g_{ji}^{Z*})}{6\pi^2 (m_Z^2 - p_2^2)^4} H_2(p_2^2, \Delta m_{ij}, m_i^2)$$

Parámetros utilizados

$$m_i = 300, 400, 500 \text{ GeV}$$

$$\Delta m_i = m_i - m_j = 100 \text{ GeV}$$



Cota experimental más reciente

$$\sqrt{s} = 183 - 208 \text{ GeV}$$

$$-0.087 < h_2^Z < 0.079 \quad -0.050 < h_2^\gamma < 0.023$$

L3 Collaboration, Phys. Lett B 597 (2004) 119–130

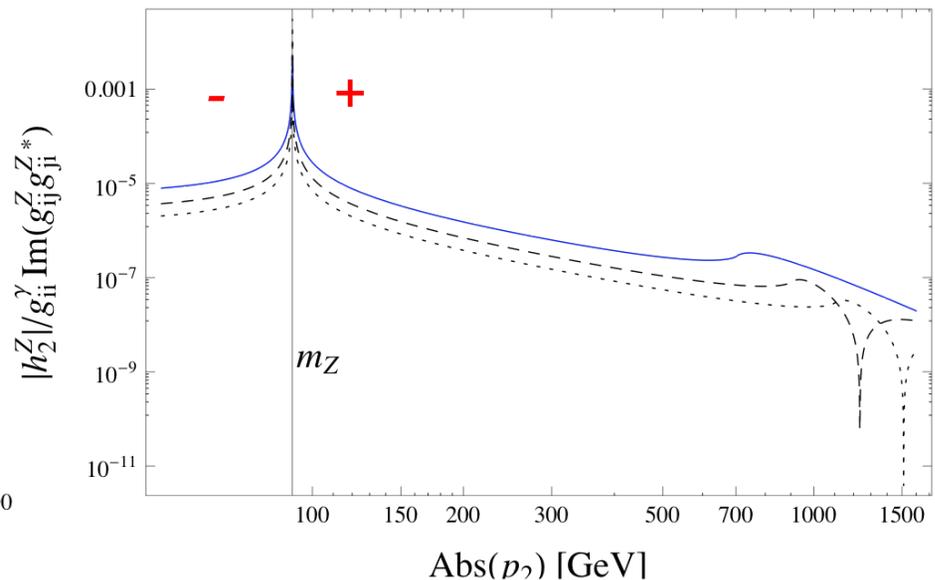
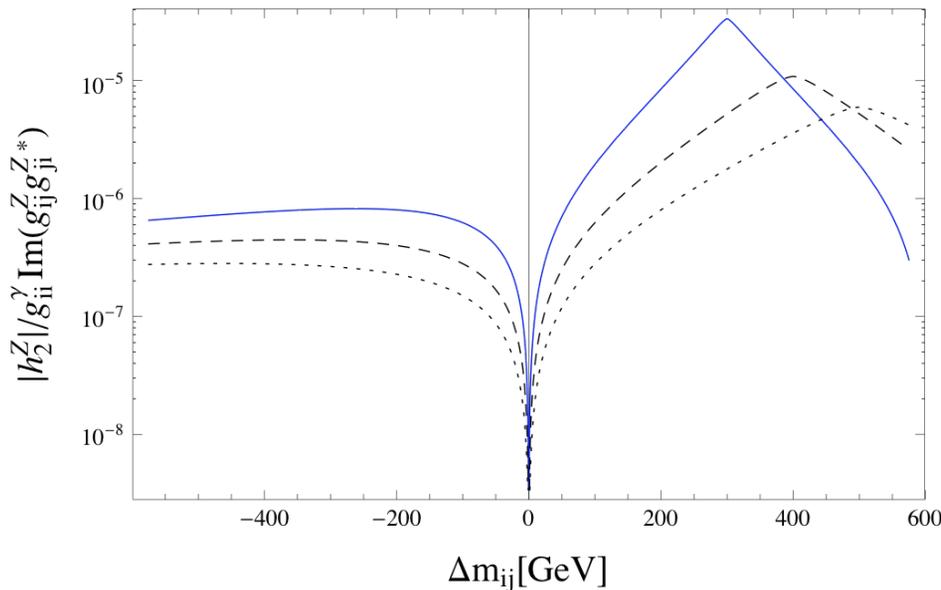




ATBNN INDUCIDOS POR EL SECTOR ESCALAR

Acoplamiento $Z_\alpha(p_1)Z_\beta^*(p_2)A_\mu(q)$

$$h_2^Z = \frac{m_Z^4 g_{ii}^\gamma \text{Im}(g_{ij}^Z g_{ji}^{Z*})}{6\pi^2 (m_Z^2 - p_2^2)^4} H_2(p_2^2, \Delta m_{ij}, m_i^2)$$



Cota experimental más reciente

$$\sqrt{s} = 183 - 208 \text{ GeV}$$

$$-0.087 < h_2^Z < 0.079 \quad -0.050 < h_2^\gamma < 0.023$$

L3 Collaboration, Phys. Lett B 597 (2004) 119–130

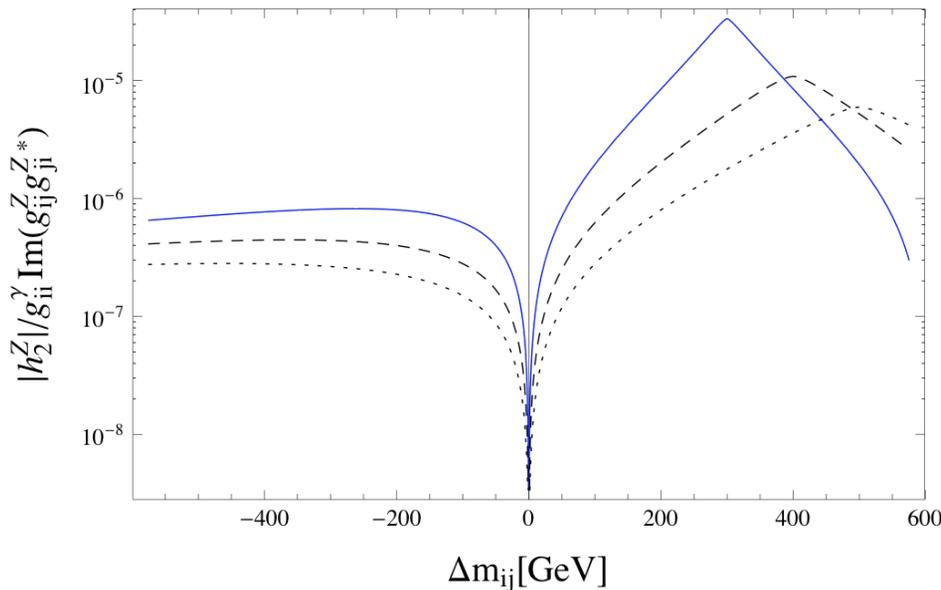




ATBNN INDUCIDOS POR EL SECTOR ESCALAR

Acoplamiento $Z_\alpha(p_1)Z_\beta^*(p_2)A_\mu(q)$

$$h_2^Z = \frac{m_Z^4 g_{ii}^\gamma \text{Im}(g_{ij}^Z g_{ji}^{Z*})}{6\pi^2 (m_Z^2 - p_2^2)^4} H_2(p_2^2, \Delta m_{ij}, m_i^2)$$



Párametros utilizados

$$m_i = 300, 400, 500 \text{ GeV}$$

$$|p_2| = 300 \text{ GeV}$$

Cota experimental más reciente

$$\sqrt{s} = 183 - 208 \text{ GeV}$$

$$-0.087 < h_2^Z < 0.079 \quad -0.050 < h_2^\gamma < 0.023$$

L3 Collaboration, Phys. Lett B 597 (2004) 119–130





ATBNN INDUCIDOS POR EL SECTOR ESCALAR

Acoplamiento $Z_\alpha(p_1)Z_\beta(p_2)Z_\mu^*(q)$

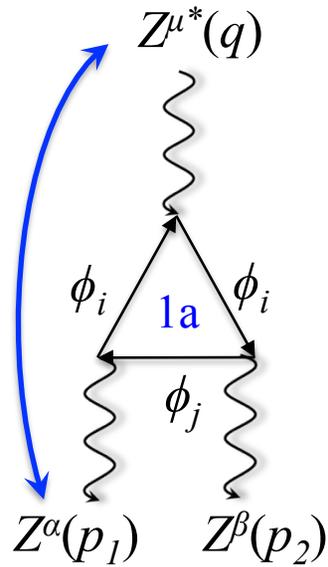


Diagrama A

$$+ i \leftrightarrow j$$

$$+ p_1^\alpha \leftrightarrow p_2^\beta = 4$$

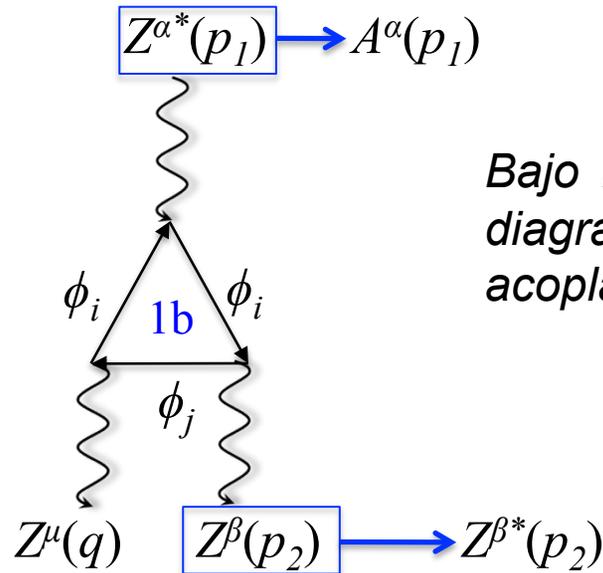


Diagrama B

$$+ i \leftrightarrow j$$

$$+ p_1^\alpha \leftrightarrow p_2^\beta = 4$$

Bajo los adecuados cambios, el diagrama B podría reproducir el acoplamiento $Z_\mu(q)Z_\beta^*(p_2)A_\alpha(p_1)$

$$\Gamma_{ZZ^*\gamma}^{\mu\beta\alpha}(q, p_2, p_1)$$

Para que se cumpla la simetría de Bosé en el acoplamiento $Z_\alpha(p_1)Z_\beta(p_2)Z_\mu^*(q)$, se requieren un total de doce diagramas.





ATBNN INDUCIDOS POR EL SECTOR ESCALAR

Acoplamiento $Z_\alpha(p_1)Z_\beta(p_2)Z_\mu^*(q)$

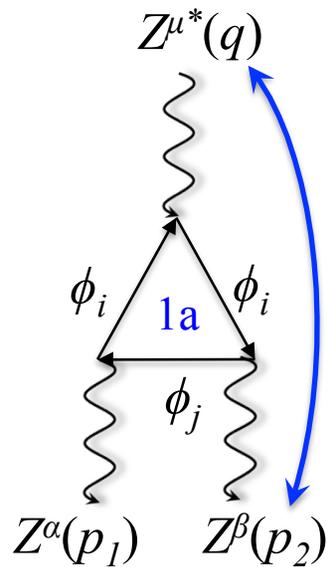


Diagrama A

$$+ i \leftarrow \rightarrow j$$

$$+ p_1^\alpha \leftarrow \rightarrow p_2^\beta = 4$$

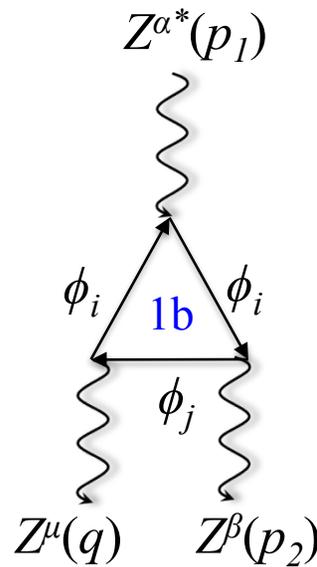


Diagrama B

$$+ i \leftarrow \rightarrow j$$

$$+ p_1^\alpha \leftarrow \rightarrow p_2^\beta = 4$$

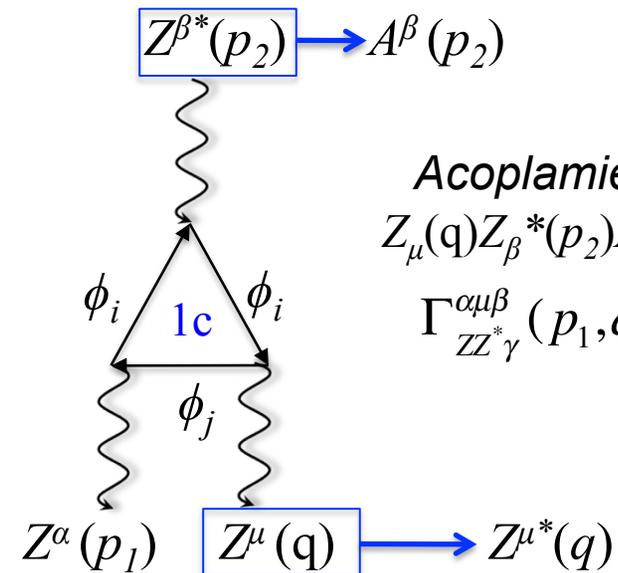


Diagrama C

$$+ i \leftarrow \rightarrow j$$

$$+ p_1^\alpha \leftarrow \rightarrow p_2^\beta = 4$$

Acoplamiento
 $Z_\mu(q)Z_\beta^*(p_2)A_\alpha(p_1)$
 $\Gamma_{ZZ^*\gamma}^{\alpha\mu\beta}(p_1, q, p_2)$

Para que se cumpla la simetría de Bosé en el acoplamiento $Z_\alpha(p_1)Z_\beta(p_2)Z_\mu^(q)$, se requieren un total de doce diagramas.*





ATBNN INDUCIDOS POR EL SECTOR ESCALAR

Acoplamiento $Z_\alpha(p_1)Z_\beta(p_2)Z_\mu^*(q)$

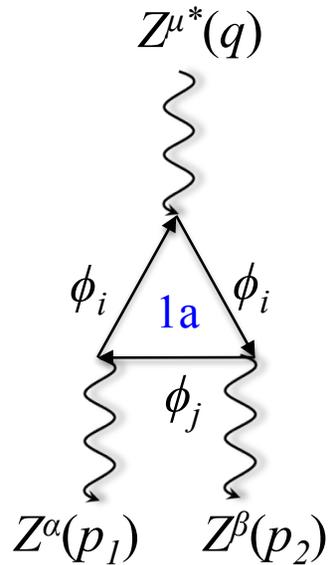


Diagrama A

$$+ i \leftarrow \rightarrow j$$

$$+ p_1^\alpha \leftarrow \rightarrow p_2^\beta = 4$$

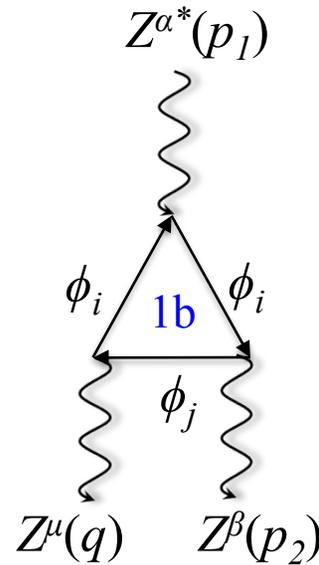


Diagrama B

$$+ i \leftarrow \rightarrow j$$

$$+ p_1^\alpha \leftarrow \rightarrow p_2^\beta = 4$$

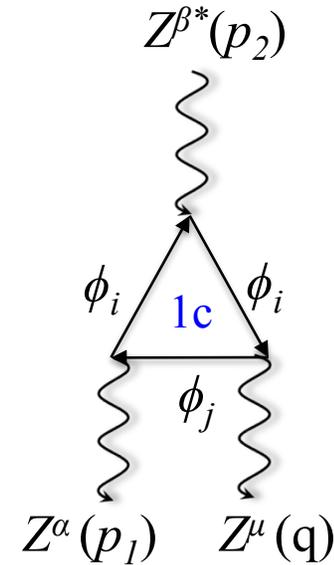


Diagrama C

$$+ i \leftarrow \rightarrow j$$

$$+ p_1^\alpha \leftarrow \rightarrow p_2^\beta = 4$$

$$\Gamma_{ZZZ^*}^{\alpha\beta\mu}(p_1, p_2, q) = i \frac{(q^2 - m_Z^2)}{m_Z^2} \left[f_4^Z (q^\alpha g^{\beta\mu} + q^\beta g^{\alpha\mu}) - f_5^Z \varepsilon^{\mu\alpha\beta\rho} (p_1 - p_2)_\rho \right]$$

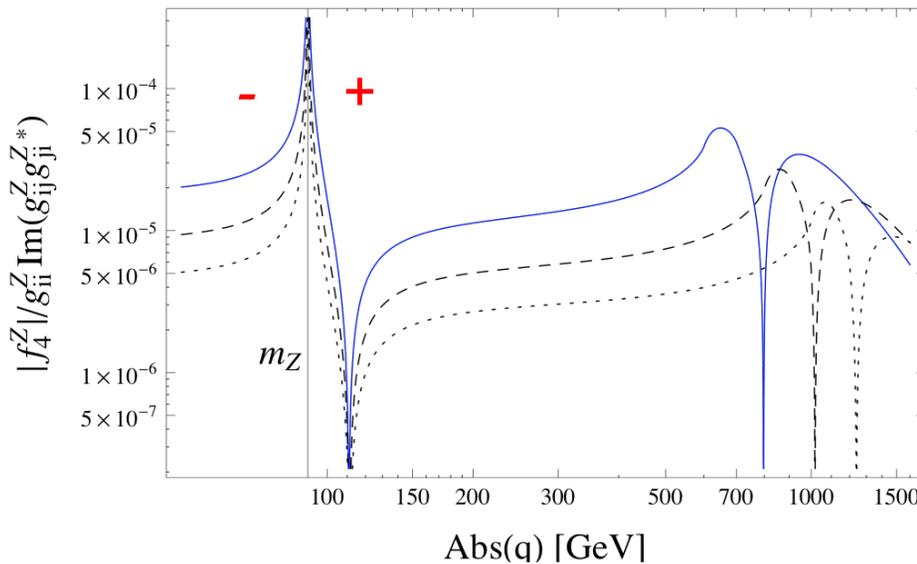




ATBNN INDUCIDOS POR EL SECTOR ESCALAR

Acoplamiento $Z_\alpha(p_1)Z_\beta(p_2)Z_\mu^*(q)$

$$f_4^Z = \frac{m_Z^2 g_{ii}^Z \text{Im}(g_{ij}^Z g_{ji}^{Z*})}{24\pi^2 s_W q^2 (q^2 - 4m_Z^2)(q^2 - m_Z^2)^2} F_4^Z(q^2, \Delta m_{ij}, m_i^2)$$



Parámetros utilizados

$$m_i = 300, 400, 500 \text{ GeV}$$

$$\Delta m_i = m_i - m_j = 100 \text{ GeV}$$

$$\Gamma_{ZZZ^*}^{\alpha\beta\mu}(p_1, p_2, q) = i \frac{(q^2 - m_Z^2)}{m_Z^2} \left[f_4^Z (q^\alpha g^{\beta\mu} + q^\beta g^{\alpha\mu}) - f_5^Z \varepsilon^{\mu\alpha\beta\rho} (p_1 - p_2)_\rho \right]$$

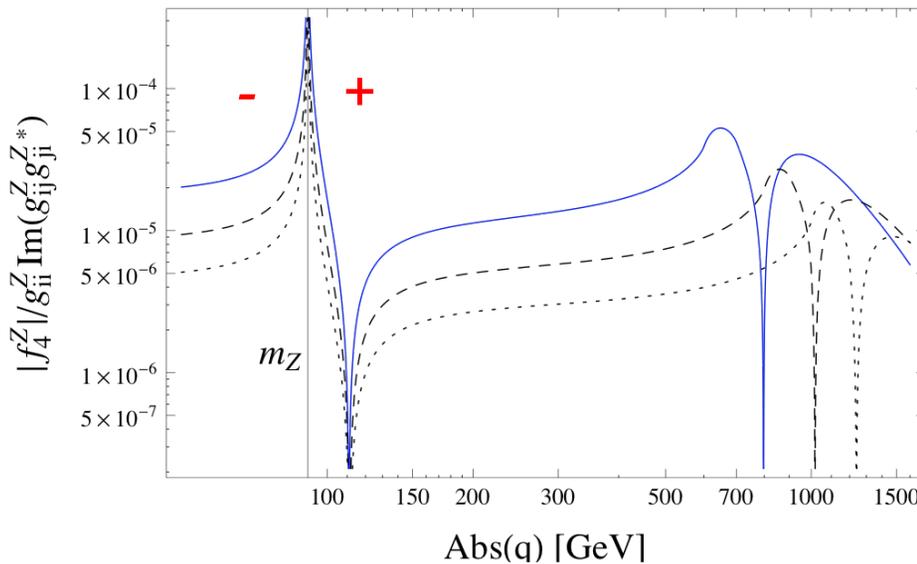




ATBNN INDUCIDOS POR EL SECTOR ESCALAR

Acoplamiento $Z_\alpha(p_1)Z_\beta(p_2)Z_\mu^*(q)$

$$f_4^Z = \frac{m_Z^2 g_{ii}^Z \text{Im}(g_{ij}^Z g_{ji}^{Z*})}{24\pi^2 s_W q^2 (q^2 - 4m_Z^2)(q^2 - m_Z^2)^2} F_4^Z(q^2, \Delta m_{ij}, m_i^2)$$



Parámetros utilizados

$$m_i = 300, 400, 500 \text{ GeV}$$

$$\Delta m_i = m_i - m_j = 100 \text{ GeV}$$

Cota experimental más reciente

$$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$$

$$-0.011 < f_4^Z < 0.012$$

CMS Collaboration, JHEP 1310, 164 (2013), 1309.1117

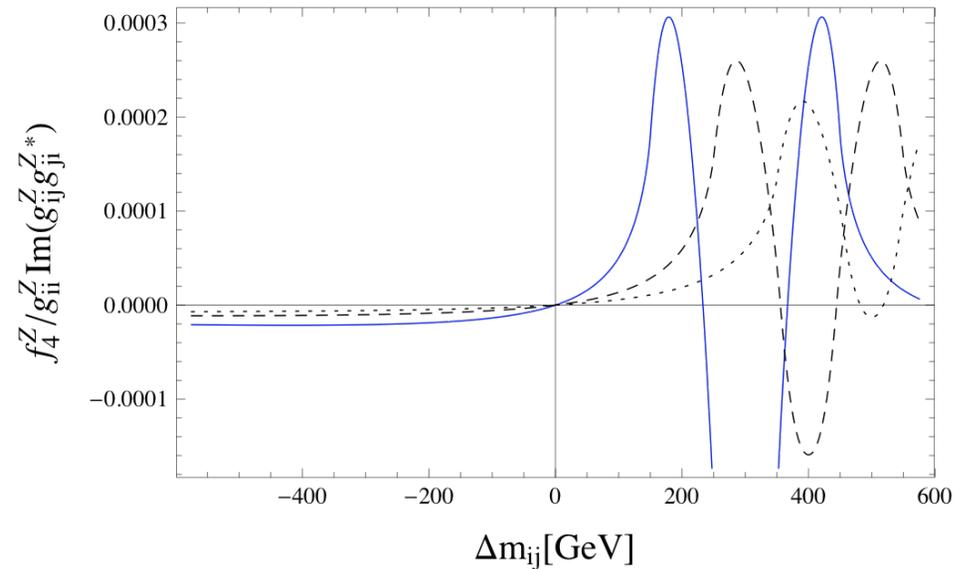
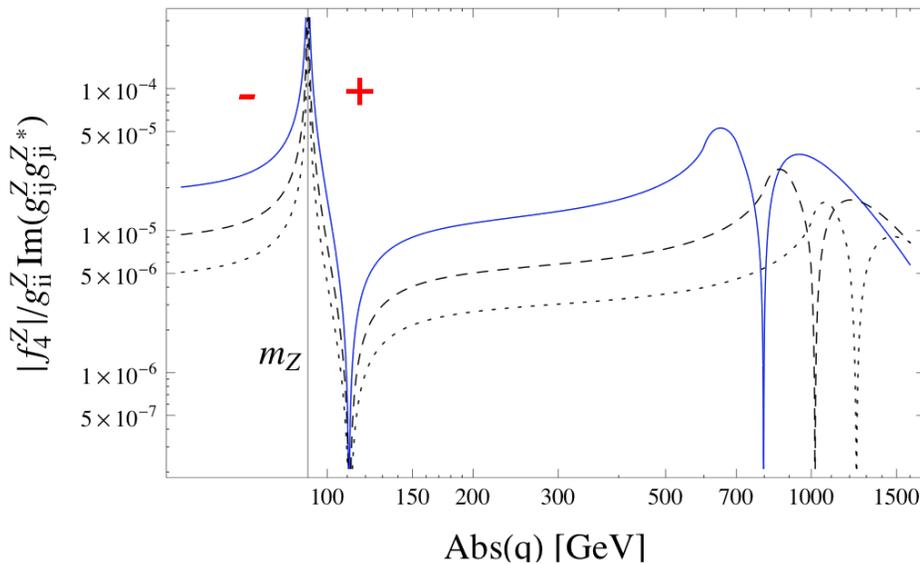




ATBNN INDUCIDOS POR EL SECTOR ESCALAR

Acoplamiento $Z_\alpha(p_1)Z_\beta(p_2)Z_\mu^*(q)$

$$f_4^Z = \frac{m_Z^2 g_{ii}^Z \text{Im}(g_{ij}^Z g_{ji}^{Z*})}{24\pi^2 s_W q^2 (q^2 - 4m_Z^2)(q^2 - m_Z^2)^2} F_4^Z(q^2, \Delta m_{ij}, m_i^2)$$



Cota experimental más reciente

$$\sqrt{s} = 7\text{TeV}$$

$$-0.011 < f_4^Z < 0.012$$

CMS Collaboration, JHEP 1310, 164 (2013), 1309.1117





ATBNN INDUCIDOS POR EL SECTOR ESCALAR

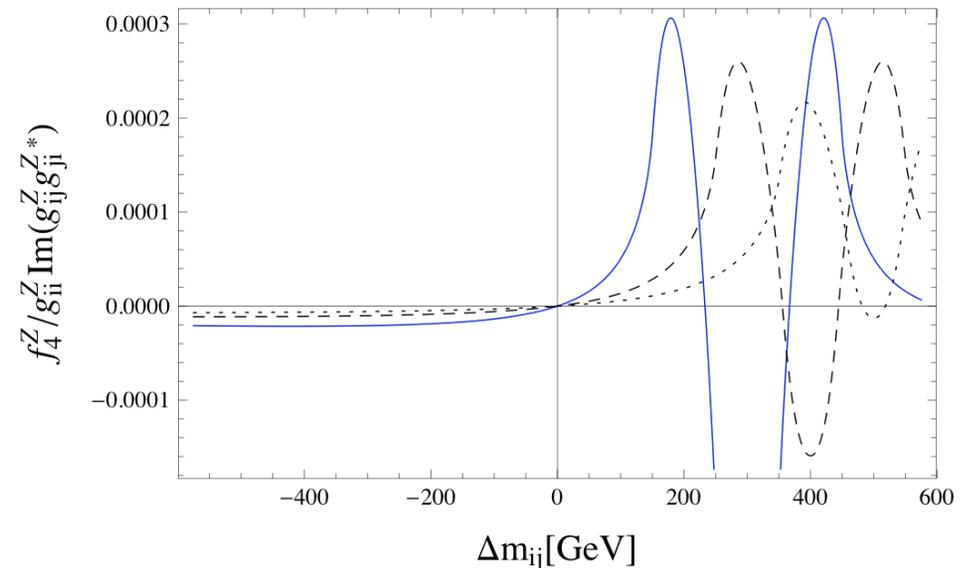
Acoplamiento $Z_\alpha(p_1)Z_\beta(p_2)Z_\mu^*(q)$

$$f_4^Z = \frac{m_Z^2 g_{ii}^Z \text{Im}(g_{ij}^Z g_{ji}^{Z*})}{24\pi^2 s_W q^2 (q^2 - 4m_Z^2)(q^2 - m_Z^2)^2} F_4^Z(q^2, \Delta m_{ij}, m_i^2)$$

Párametros utilizados

$$m_i = 300, 400, 500 \text{ GeV}$$

$$|q| = 300 \text{ GeV}$$



Cota experimental más reciente

$$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$$

$$-0.011 < f_4^Z < 0.012$$

CMS Collaboration, JHEP 1310, 164 (2013), 1309.1117





CONCLUSIONES

- 1.- *Se ha mostrado la importancia que podría tener la producción experimental de pares de bosones de norma neutros.*
- 2.- *En el sector escalar se inducen los acoplamientos triples de bosones de norma neutros que violan CP, pero únicamente sí existe cambio de sabor.*
- 3.- *Para el acoplamiento $ZZ^*\gamma$, se encuentran los siguientes rangos para los factores de forma.*

$$|h_1^Z| = 10^{-2} - 10^{-6} \quad |h_2^Z| = 10^{-5} - 10^{-8}$$

- 4.- *Para el acoplamiento ZZZ^* , se encuentra el siguiente rango para el respectivo factor de forma.*

$$|f_4^Z| = 10^{-5} - 10^7$$

