

# El lhc: una fábrica de partículas para medir

## The lhc: a factory of particles to be measured

**Gabriela Navarro**

Facultad de Ciencias, Universidad Antonio Nariño  
gabriela.navarro@uan.edu.co

### Resumen

La física de partículas siempre ha sido un tema de interés no sólo para los científicos sino también para el público en general. Conocer cómo está compuesta la materia y cómo es la naturaleza del Universo han sido temas que el hombre siempre se ha cuestionado. En este artículo describiremos brevemente el Modelo Estándar, teoría que explica las propiedades e interacciones entre las partículas elementales, y cómo se hace para medirlas experimentalmente. En particular, nos concentraremos en la descripción del LHC y uno de sus detectores ATLAS, con el cual el grupo Experimental de Altas Energías de la Universidad Antonio Nariño tiene colaboración.

### Abstract

Particle physics has always been a subject of interest not only for scientists but also for the general public. The mankind has always questioned about the nature of the Universe and matter composition. In this article we will briefly describe the Standard Model of particles, theory that explains the properties and interactions between the elementary particles, and how we measure them experimentally. In particular, we will focus on the description of the LHC and one of its detectors ATLAS, and its Collaboration with Universidad Antonio Nariño's Experimental High Energy group.

**Palabras clave:**  
Standard Model,  
LHC, ATLAS,  
Higgs.

### La teoría de la física de partículas: el modelo Standard

La pregunta es: ¿qué hace un físico de partículas, qué estudia, cómo lo hace? Desde la antigüedad, al hombre le interesó no sólo observar los fenómenos naturales que ocurrían a su alrededor, sino también tratar de explicarlos. Una de sus inquietudes era saber de qué estaban formadas las cosas: desde los seres vivos hasta los planetas y galaxias. A través de la historia, los físicos han aprendido, con diferentes experimentos, que la materia se compone de moléculas, y que estas se conforman a su vez por átomos, e incluso que los

átomos están formados por un núcleo, compuesto de protones, neutrones y electrones. ¿Son estos los componentes fundamentales de la materia? Ahora sabemos que no, que protones y neutrones también tienen estructura: partículas denominadas “quarks”. Un físico de partículas estudia precisamente esto, cuáles son las propiedades de las partículas elementales que componen la materia y cómo interactúan entre ellas.

En la naturaleza existen cuatro interacciones fundamentales. La más conocida es la interacción gravitatoria –que se manifiesta entre dos cuerpos que poseen masa– y la electromagnética, presente en fenómenos eléctricos y magnéticos. Las otras dos interacciones son las llamadas débil y fuerte, presentes en decaimientos radiactivos y fuerzas nucleares, respectivamente.

En los años 60 se propuso una teoría que describe a las partículas elementales y sus interacciones electromagnética, débil y fuerte: el Modelo Estándar (Glashow, 1961; Weinberg, 1967; Salam, 1968; Altarelli, 2005). El contenido de partículas elementales del ME se ilustra en la figura 1. Los quarks vienen en seis sabores diferentes y se combinan para formar otras partículas llamadas en general hadrones, como por ejemplo protones o

neutrones. Dentro de los leptones encontramos al electrón, quizá el más conocido de todas. Los bosones de Gauge son las partículas intermedias de las interacciones que pueden darse entre quarks y leptones. El fotón es el intermediario de la interacción electromagnética, los bosones Z y W de la débil y el gluon de la fuerte.

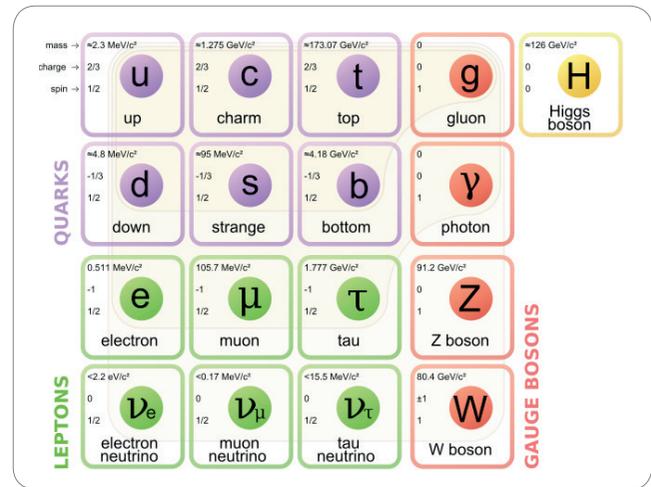


Imagen 1: Modelo estándar de partículas elementales. Fuente: Cultura científica (2014).

En la Imagen 1 se distinguen seis leptones (electrón y el neutrino electrónico, el muon y el neutrino muónico, el tau y el neutrino tauónico), seis quarks ordenados en tres generaciones (up y down, charm y strange, top y bottom), 4 bosones que son los portadores de las cuatro fuerzas fundamentales (fotón, gluón, bosón Z y bosón W), y el bosón de Higgs que es el encargado de proporcionar la masa a todas las demás partículas.

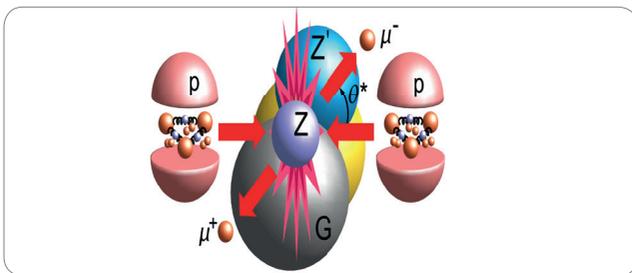
Ahora bien, el ME no predice que estas partículas tengan masa. De los experimentos se sabe que los electrones, protones y neutrones tienen masa, por ejemplo. Además, la descripción de las interacciones electromagnética y débil como tal no es exacta, ya que no describe las diferencias entre ambas. En 1964, tres grupos independientes estudiaron este problema e introdujeron el llamado mecanismo de Brout-Englert-Higgs (Higgs, 1964), que permite romper la simetría

entre la interacción electromagnética y débil y como consecuencia se generan las masas de las partículas y aparece un nuevo Bosón, denominado Bosón de Higgs.

Todas estas partículas han sido descubiertas a lo largo de los años en diferentes experimentos, comprobando las hipótesis del ME con gran precisión. Si bien el ME ha resultado muy exitoso en sus predicciones, los físicos saben que no es para nada el modelo que explica todos los fenómenos observados en la actualidad. Por ejemplo, la presencia de la materia oscura o la oscilación de neutrinos, fenómenos comprobados experimentalmente. A lo largo de los años, los físicos teóricos han propuesto una gran cantidad de teorías que explicarían estos fenómenos, las cuales implican la presencia de nuevas partículas. Estas teorías se denominan, en general, física más allá del ME o simplemente *nueva física*.

### Los experimentos: el lhc

¿Pero en qué consisten estos experimentos que confirman la existencia de las partículas y miden sus propiedades? La idea principal es hacer colisionar dos partículas que se mueven con gran velocidad y estudiar los resultados de esa colisión (Ver Imagen 2). Es como romper algo que para saber de qué está compuesto.



**Imagen 2:** Representación de la colisión entre 2 protones, desde la cual se produce una nueva partícula que luego decae a dos muones. Fuente: CMS-CERN (s.f.).

Para ello se utilizan los aceleradores de partículas, que son máquinas que utilizan campos electromagnéticos para acelerar partículas cargadas.

Existen aceleradores de partículas de diferentes clases y con el transcurso de los años, se han ido incorporando mejoras que han permitido descubrir más y más partículas como así también medir sus propiedades físicas.

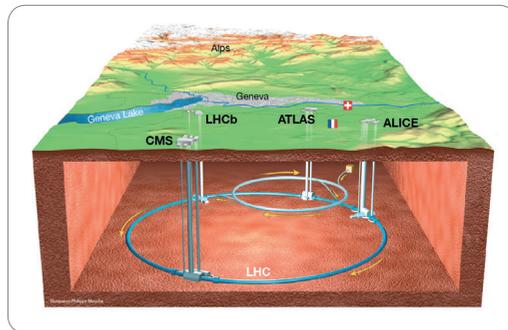
Actualmente, los físicos viven una época muy activa desde que el Gran Colisionador de Hadrones (LHC, por sus siglas en inglés) (Evans & Bryant, 2008) entró en funcionamiento a fines de 2009. Se trata del acelerador de partículas más grande y poderoso construido hasta ahora y se encuentra situado en el Centro Europeo para la Investigación Nuclear (CERN), en la frontera entre Suiza y Francia. Consiste de un anillo de imanes superconductores de 27 km de circunferencia, a través del cual circulan protones en direcciones opuestas, que son acelerados para incrementar su energía antes de hacerlos colisionar. La colisión de estos haces de protones se realiza en cuatro puntos diferentes, donde se sitúan 4 detectores denominados ATLAS, CMS, Alice y LHCb (Imagen 3). Los dos primeros están diseñados para propósito múltiple, mientras que Alice y LHCb pretenden estudiar fenómenos particulares (el plasma de quark-gluons y la física del quark b, respectivamente). Para construir y mantener en funcionamiento estos detectores, se forman

colaboraciones que involucran muchos científicos pertenecientes a diferentes institutos de investigación o universidades de alrededor del mundo. Los científicos de estas colaboraciones son quienes analizan los datos obtenidos de los detectores como así también se encargan de la operación y mantenimiento de los mismos.

Los períodos de toma de datos del LHC se denominan “Run”: del año 2010 al 2013 (Run 1); y del año 2015 al 2018 (Run 2). Actualmente, el LHC no se encuentra en funcionamiento ya que se vienen acondicionando acelerador y detectores para las condiciones que se tendrán durante el Run 3 (previsto para los años 2021-2023).

### La UAN en el experimento atlas

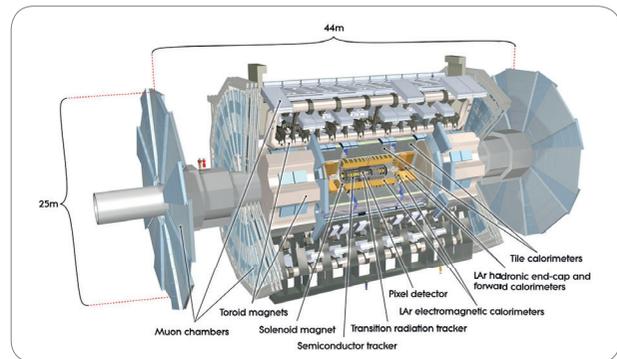
El grupo experimental de altas energías de la UAN hace parte de la colaboración creada para



**Imagen 3:** Vista general del Large Hadron Collider (LHC) bajo la ciudad de Ginebra (Suiza), con sus cuatro principales experimentos: ATLAS, CMS, ALICE y LHCb. Fuente: CMS-CERN (2014).

analizar los datos del detector ATLAS, comúnmente llamada Colaboración ATLAS, desde el 2007. Se trata de una colaboración de aproximadamente 3000 físicos y estudiantes de doctorado pertenecientes a alrededor de 175 Instituciones alrededor del mundo.

ATLAS es un detector diseñado para la búsqueda del Bosón de Higgs, entre otros objetivos (Aad *et al.*, 2008a). Se encuentra ubicado 100 metros bajo tierra y pesa alrededor de 7000 toneladas (Imagen 4). Se compone de seis sub-detectores ubicados en capas alrededor del punto de colisión de los protones que permiten la medición de las diferentes propiedades de las partículas que surgen de dicha colisión.

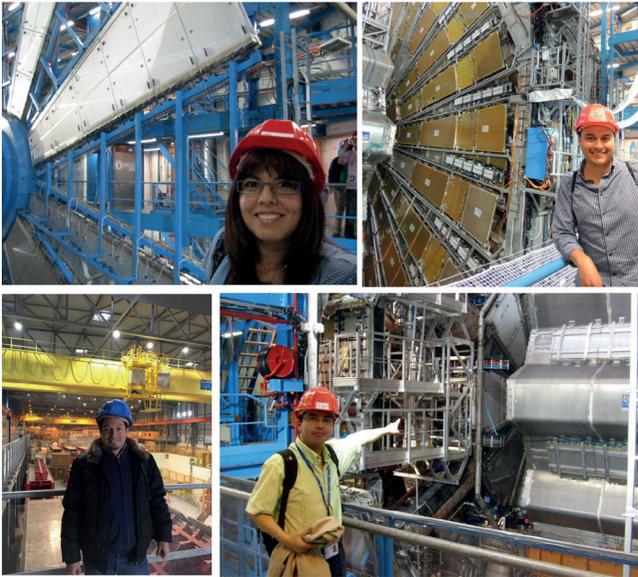


**Figura 4:** El detector ATLAS es uno de los dos más grandes experimentos del LHC. Sus cuatro principales componentes son el detector interno, el calorímetro, el espectrómetro de muones y el sistema de imanes. Fuente: CMS-CERN (2014)

En estos años de funcionamiento Run 1 y 2 del LHC, el detector ATLAS ha publicado muchos resultados que incluyen mediciones muy precisas de parámetros del ME (Aaboud *et al.*, 2018a, 2018b) y gran cantidad de búsquedas de nuevas partículas (Aaboud *et al.*, 2019a, 2019b, 2018c), no predichas por el ME. Pero sin duda el resultado de mayor impacto hasta el momento ha sido el descubrimiento del Bosón de Higgs, partícula que hasta ese momento había sido esquivada en los aceleradores anteriores. En julio del 2012, la Colaboración ATLAS y la colaboración CMS anunciaron el descubrimiento de una nueva

partícula (Aad *et al.*, 2012; Chatrchyan *et al.*, 2012) en la búsqueda del Bosón de Higgs del ME. Con el tiempo se confirmó que esta partícula tiene las propiedades del Bosón de Higgs del ME y se han comenzado a medir sus propiedades físicas (Aaboud *et al.*, 2019c, 2018d, 2018e, 2018f, 2018g, 2018h).

El grupo de la UAN (Imagen 5) ha hecho diferentes contribuciones desde su vinculación con la Colaboración ATLAS, tanto en estudios del funcionamiento del detector como en diferentes análisis de búsquedas de nuevas partículas.



**Figura 5:** De izquierda a derecha y de arriba a abajo: Gabriela Navarro, Carlos Sandoval, Deywis Moreno y Yohany Rodríguez, integrantes del grupo experimental de altas energías de la UAN y quienes en su mayoría han permanecido activos en la colaboración internacional del experimento ATLAS. Fuente: archivo particular.

Durante el período anterior a la puesta en funcionamiento del LHC, el grupo estuvo enfocado en particular en estudios que evalúan la eficiencia del funcionamiento del trigger de electrones y fotones del detector. El trigger es un componente esencial de un detector ya que es el responsable de seleccionar en primera instancia la información que puede ser relevante y de interés físico para ser almacenada

y utilizada posteriormente en los diferentes análisis. Resulta entonces muy importante que la eficiencia del trigger sea alta para que el detector almacene datos relevantes y que sean de utilidad.

Cuando el LHC comenzó sus actividades, las colaboraciones dedicaron un tiempo para calibrar el funcionamiento del detector. Durante el Run 1, el grupo participó en la calibración de la medición de la energía de los llamados jets, que son chorros de partículas hadrónicas que resultan de las colisiones protón-protón (Aad *et al.*, 2008b). Durante el Run 2, el grupo colaboró en la medición de la eficiencia con la que el detector identifica electrones de baja energía (Aaboud *et al.*, 2019d).

En cuanto a análisis de búsquedas de nuevas partículas, durante el Run 1, el grupo hizo parte de un análisis de búsqueda de bosones Higgs con carga eléctrica (Aaboud *et al.*, 2016) y bosones de Higgs decayendo a partículas neutras (sin carga eléctrica) (Aad *et al.*, 2015), que no están predichos por el ME y de ser encontrados, sería indicio de nueva física. Con los datos provenientes del Run 2, el grupo acaba de finalizar una búsqueda de leptones pesados y neutros,

que también corresponde a búsquedas de física más allá del ME (Navarro *et al.*, 2019).

El LHC ofrece una oportunidad única en el estudio sobre la naturaleza de nuestro universo

con relación a las energías nunca antes exploradas. La colaboración con el detector ATLAS le ha permitido al grupo de la UAN ser participe de un momento histórico en la Física de Altas Energías. Muchos resultados aún están por darse en los próximos años, estemos atentos a las novedades en este campo.

## Referencias

- Aaboud, M. *et al.* (2016). Search for charged Higgs bosons in the  $H_{\pm} \rightarrow tb$  decay channel in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13\text{TeV}$  using the ATLAS detector (ATLAS Collaboration). *Journal of High Energy Physics*, 127 [doi.org/10.1007/JHEP03(2016)127].
- Aaboud, M. *et al.* (2018a). Measurement of the  $Z\gamma \rightarrow \nu\bar{\nu}\gamma$  production cross section in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$  with the ATLAS detector and limits on anomalous triple gauge-boson couplings (ATLAS Collaboration). *J. High Energ. Phys.* 12(10) [doi:10.1007/JHEP12(2018)010].
- Aaboud, M. *et al.* (2018b).  $ZZ \rightarrow \ell+\ell-\ell'+\ell'-$  cross-section measurements and search for anomalous triple gauge couplings in 13 TeV pp collisions with the ATLAS detector (ATLAS Collaboration). *Phys. Rev. D* 97, 032005. [doi:10.1103/PhysRevD.97.032005].
- Aaboud, M. *et al.* (2018c). Search for charged Higgs bosons decaying via  $H_{\pm} \rightarrow \tau_{\pm}\nu\tau$  in the  $\tau$ +jets and  $\tau$ +lepton final states with 36 fb<sup>-1</sup> of pp collision data recorded at  $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$  with the ATLAS experiment (ATLAS Collaboration). *J. High Energ. Phys.* 139 [https://doi.org/10.1007/JHEP09(2018)139].
- Aaboud, M. *et al.* (2018d). Measurement of the Higgs boson mass in the  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$  y  $H \rightarrow \gamma\gamma$  channels with  $\sqrt{s} = 13\text{TeV}$  pp collisions using the ATLAS detector (ATLAS Collaboration). *Physics Letters B*, 784. [doi.org/10.1016/j.physletb.2018.07.050].
- Aaboud, M. *et al.* (2018e). Combined measurement of differential and total cross sections in the  $H \rightarrow \gamma\gamma$  channels and the  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$  decay channels at  $\sqrt{s} = 13\text{TeV}$  with the ATLAS detector (ATLAS Collaboration). *Physics Letters B*, 786, 114. [doi.org/10.1016/j.physletb.2018.09.019].
- Aaboud, M. *et al.* (2018f). Measurements of Higgs boson properties in the diphoton decay channel with 36 fb<sup>-1</sup> of pp collision data at  $\sqrt{s} = 13\text{TeV}$  with the ATLAS detector (ATLAS Collaboration). *Phys. Rev. D*, 98, 052005 [doi/10.1103/PhysRevD.98.052005 s08001].
- Aaboud, M. *et al.* (2018g). Observation of  $H \rightarrow b\bar{b}$  decays and  $VH$  production with the ATLAS detector (ATLAS Collaboration). *Physics Letters B*, 786, 59. [doi.org/10.1016/j.physletb.2018.09.013].
- Aaboud, M. *et al.* (2019a). Search for squarks and gluinos in final states with hadronically decaying  $\tau$ -leptons, jets, and missing transverse momentum using pp collisions at  $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$  with the ATLAS detector (ATLAS Collaboration). *Phys. Rev. D* 99, 012009 [doi:10.1103/PhysRevD.99.012009].
- Aaboud, M. *et al.* (2019b). Search for long-lived particles produced in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13\text{ TeV}$  that decay into displaced hadronic jets in the ATLAS muon spectrometer (ATLAS Collaboration). *Phys. Rev. D* 99, 052005. [doi: https://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.052005].
- Aaboud, M. *et al.* (2019c). Measurements of gluon-gluon fusion and vector-boson fusion Higgs boson production cross-section in the  $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$  decay channel in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7\text{TeV}$  with the ATLAS detector (ATLAS Collaboration). *Physics Letters B*, 789. [doi.org/10.1016/j.physletb.2018.11.064].
- Aaboud, M. *et al.* (2019d). Electron reconstruction and identification in the ATLAS experiment using the 2015 and 2016 LHC proton-proton collision data at  $\sqrt{s} = 13\text{TeV}$  (ATLAS Collaboration). Tomado de: [https://arxiv.org/abs/1902.04655v1].

- Aaboud, M. *et al.* (ATLAS Collaboration) (2018h). Observation of Higgs boson production in association with a top quark pair at the LHC with the ATLAS detector. *Physics Letters B*, 784, 173. [doi.org/10.1016/j.physletb.2018.07.035].
- Aad, G. *et al.* (2008a). The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider (ATLAS Collaboration) *JINST*, 3, S08003 [doi:10.1088/1748-0221/3/08/S08003].
- Aad, G. *et al.* (2008b). Expected Performance of the ATLAS Experiment - Detector, *Trigger and Physics*. Tomado de: [https://arxiv.org/abs/0901.0512].
- Aad, G. *et al.* (2012). Combined search for the Standard Model Higgs boson using up to 4.9 fb<sup>-1</sup> of pp collision data at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector at the LHC (ATLAS Collaboration). *Physics Letters B*, 710(1). [doi.org/10.1016/j.physletb.2012.02.044].
- Aad, G. *et al.* (2015). Search for invisible decays of the Higgs boson produced in association with a hadronically decaying vector boson in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV with the ATLAS detector (ATLAS Collaboration). *Eur. Phys. J. C*, 75:337 [doi.org/10.1140/epjc/s10052-015-3551-1].
- Altarelli, G. (2005). *The Standard Model of Particle Physics*. Tomado de: [arxiv.org/abs/hep-ph/0510281].
- Chatrchyan, S. *et al.* (2012). Combined results of searches for the Standard Model Higgs boson in pp collisions at  $\sqrt{s} = 7$  TeV. *Physics Letters B*, 710(1). 37(CMS collaboration). *Revista. SayWa*, vol 1, #2, julio-diciembre 2019 [doi.org/10.1016/j.physletb.2012.02.064].
- CMS-CERN (2014). Overall view of the LHC. The CMS Experiment at CERN. Disponible en: [https://cds.cern.ch/record/1708847].
- CMS-CERN (s.f.). The weak mixing of light and heavy. The CMS Experiment at CERN. Disponible en: [https://cms.cern/news/weak-mixing-light-and-heavy].
- Cultura científica (2014). Del modelo standard. *Culturacientifica.com* - Cuaderno de cultura científica. Disponible en: [https://culturacientifica.com/2014/06/17/del-modelo-estandar/].
- Evans, L. & Bryant, P. (2008). LHC Machine. *Journal of Instrumentation*, 3(08). [doi:10.1088/1748-0221/3/08/].
- Glashow, S. (1961). Partial-symmetries of weak interactions. *Nuclear Physics*, 22(4), pp. 579-588 [doi:10.1016/0029-5582(61)90469-2].
- Higgs, P. (1964). Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons. *Physical Review Letters*, 13(16), pp. 508-509 [doi:10.1103/physrevlett.13.508].
- Salam, A. (1968). *Elementary particle physics: Relativistic groups and analyticity. Proceedings of the eighth Nobel symposium held May, 1968 at Lerum, Sweden*. Stockholm: Almquist & Wiksell.
- Weinberg, S. (1967). A Model of Leptons. *Physical Review Letters*, 19(21), pp.1264-1266 [doi:10.1103/physrevlett.19.1264].

## **Gabriela Alejandra Navarro Busso**

Gabriela Navarro es profesora asociada e investigadora del grupo experimental de física de altas energías de la Universidad Antonio Nariño. Es miembro de la colaboración internacional del experimento ATLAS desde el año 2007. Obtuvo su título en física en la Universidad de Buenos Aires en Argentina y su doctorado en el año 2007 en la misma Universidad.

