

PROTOCOLO DEL PROYECTO

TÍTULO DEL PROYECTO:

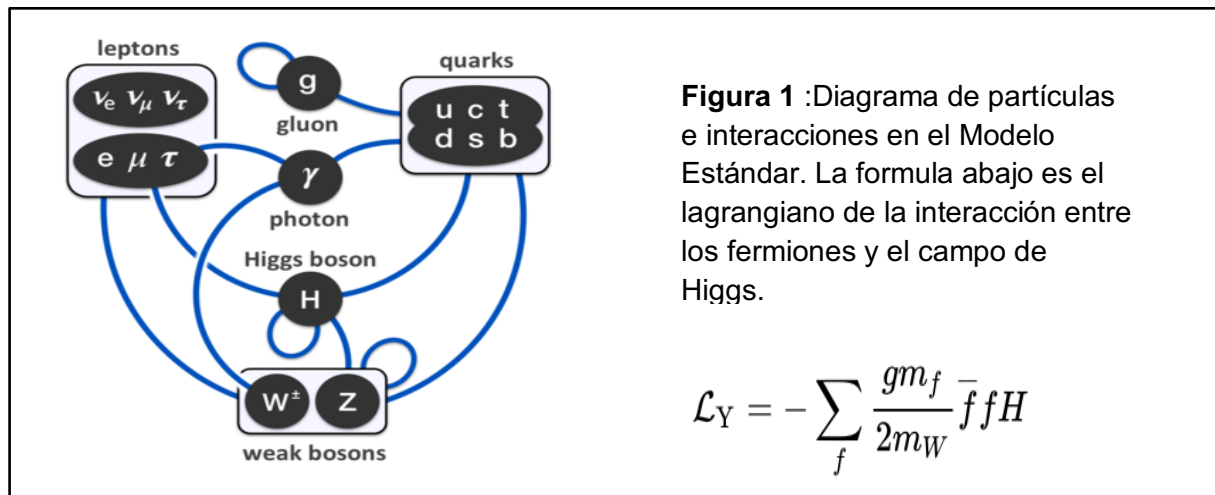
Producción del bosón de Higgs en asociación con un solo quark de tipo top en colisiones protón-protón con el experimento CMS del CERN.

RESUMEN

En este proyecto se propone estudiar el canal producción del bosón de Higgs asociado con un solo quark top en el Large Hadron Collider del laboratorio CERN. La medición de este proceso complementa otras mediciones del parámetro de acoplamiento del quark top y el bosón de Higgs, y es parte del programa de física de las colaboraciones internacionales CMS y ATLAS. Se propone estudiar cual es el canal optimo para la búsqueda de este proceso que no se ha podido observar con los datos actuales, estudiar aspectos de la reconstrucción y proyecciones para las fases futuras del LHC. Además de estudiar esta área de física de altas energías, el estudiante aprenderá a usar herramientas nuevas como programar en ROOT, c++ y Python. También a utilizar centros de computo de alto rendimiento y a presentar su trabajo en grupos de trabajo internacionales.

ANTECEDENTES

La teoría de las partículas fundamentales, el Modelo Estándar (SM), fue elaborada en la segunda parte del siglo pasado y hasta el momento a tenido éxito explicando los procesos de interacción y decaimiento de las partículas que se han medido en muchos experimentos de física de alta energía alrededor del mundo. El SM es una teoría cuántica de campos que describe tres familias de partículas (leptones y quarks) y sus interacciones por medio de bosones (gluon, foton, W, Z, H), ver Figura 1.

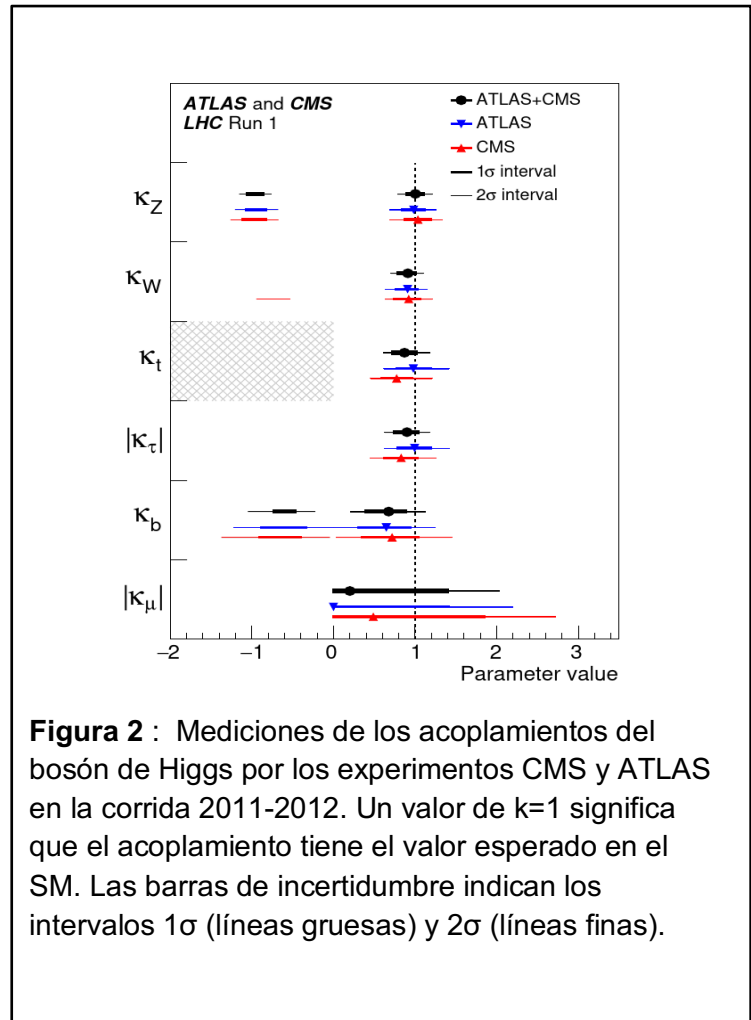


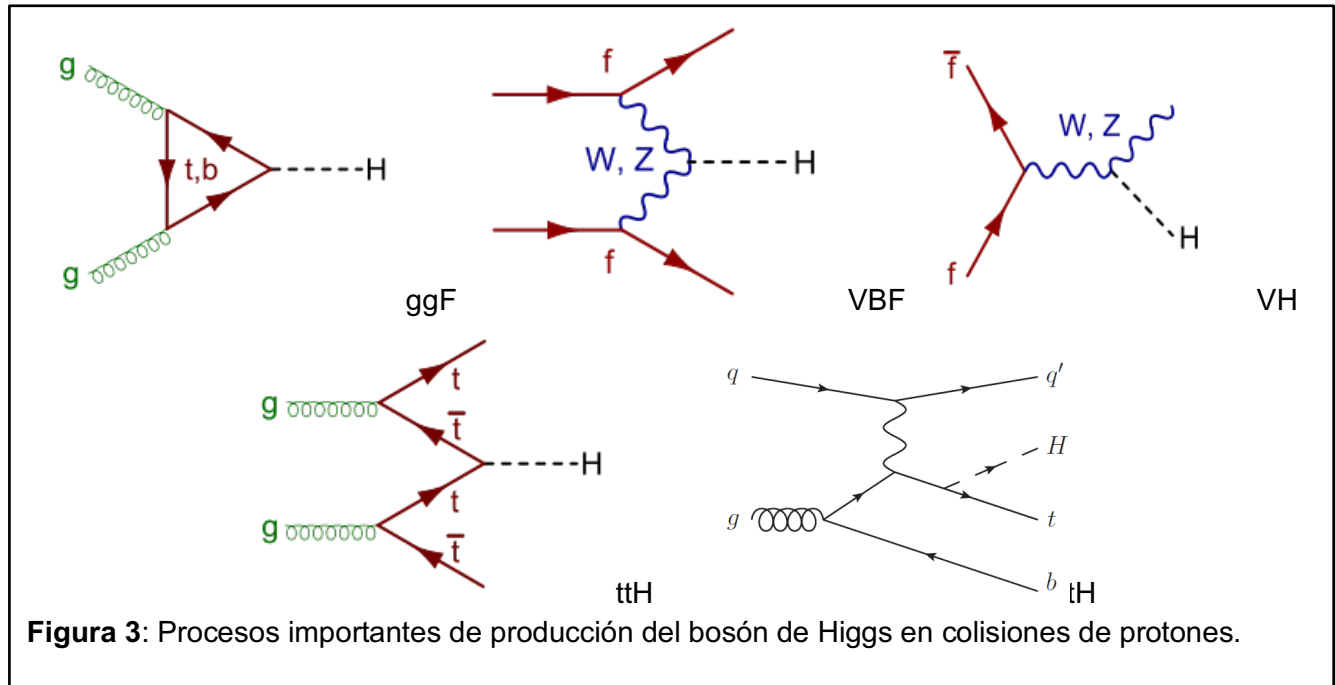
El campo de Higgs fue introducido en la teoría para explicar la relación y unificación entre las fuerzas Electromagnética y Débil mediante un rompimiento en la simetría del campo de Higgs. A la misma vez se introduce la interacción entre los fermiones (leptones y quarks) y el campo de Higgs, la cual genera las masas de estas partículas. Las partículas fundamentales no tienen masa en una teoría sin el mecanismo de Higgs. En el SM la interacción de los campos de fermiones y Higgs tiene un acoplamiento que es proporcional a la masa de cada fermión como se muestra en la formula en la Figura 1. Estos acoplamientos, llamados acoplamientos Yukawa, se pueden medir en experimentos donde se producen bosones de Higgs mediante colisiones de los fermiones, también en procesos donde el bosón de Higgs decae a estados finales donde se pueden reconstruir los fermiones.

Hasta los años 90's se había descubierto la existencia de casi todas las partículas del SM excepto el quark top y el bosón de Higgs. Estos habían eludido experimentos previos debido a dificultades en la producción o reconstrucción de sus decaimientos. El quark top fue descubierto en 1995 en el colisionador Tevatron del laboratorio Fermilab, este colisionador de protones opero con una energía de 1.8 TeV en el centro de masa hasta el 2010. El colisionador LHC en el laboratorio CERN, en Ginebra, Suiza, empezó sus operaciones en el 2010 colisionando protones a 7 TeV y posteriormente a 8 y 13 TeV.

En 2012, las colaboraciones ATLAS y CMS, con detectores en dos puntos donde se colisionan los protones en el LHC, anunciaron el descubrimiento de un nuevo bosón con una masa de 125 GeV. Hasta ahora, todas las medidas de las propiedades de este bosón son consistentes con las del bosón de Higgs del modelo estándar (SM), ver Figura 2. En esta figura se muestra un resumen de las mediciones de los acoplamientos de este bosón y las demás partículas que se obtuvieron con los datos de la primera corrida del LHC en 2011-2012. Los símbolos κ en esta grafica son los valores del acoplamiento en unidades del valor esperado en el SM. El bosón de Higgs fue descubierto en los canales de decaimiento a ZZ y par de fotones. El valor del acoplamiento κ_t se obtuvo indirectamente con la observación en el canal de dos fotones ya que esta interacción se media indirectamente por la interacción del Higgs con el top y el top con el fotón. Posteriormente el bosón se ha observado en los canales de WW y par de leptones tau.

Existen varios procesos de producción de Higgs en el LHC. Los mas prominentes son: gluon-fusión (ggF), vector-bosón fusión (VBF), en asociación con un bosón vector (VH), y en asociación con quarks top ($t\bar{t}H$, tH). Los diagramas de estos procesos se muestran en la Figura 3. Las primeras observaciones del bosón de Higgs, cuando decae a ZZ , WW , y par de fotones, han sido





por el canal de ggF el cual tiene la sección eficaz mas grande. Recientemente, se ha logrado observar por el canal de VBF cuando decae a par de leptones tau y también por el canal ttH en el cual se necesito reconstruir varios canales de decaimiento.

Los canales de producción ttH y tH donde el bosón de Higgs se acopla al quark top son de alto interés ya que este acoplamiento es el mayor en el SM. La producción por ttH y tH se describe por la teoría con diagramas de primer orden, esto hace que las predicciones tengan menor incertidumbre y permite mejores comparaciones con las mediciones experimentales. Desviaciones de las predicciones en el SM podrían señalar a física más allá del Modelo Estándar (BSM). Las mediciones precisas de propiedades son por tanto cruciales para responder a la pregunta de si la partícula encontrada es realmente el bosón de Higgs predicho por el SM.

PROPUESTA

En este proyecto se propone estudiar el bosón de Higgs en el proceso de producción de tH con el experimento CMS del CERN. Para estos estudios se usarán los datos de la corrida dos (2015-2018) del LHC y se espera también publicar proyecciones para la fase de alta luminosidad del LHC (HL-LHC) que empezara en el 2026.

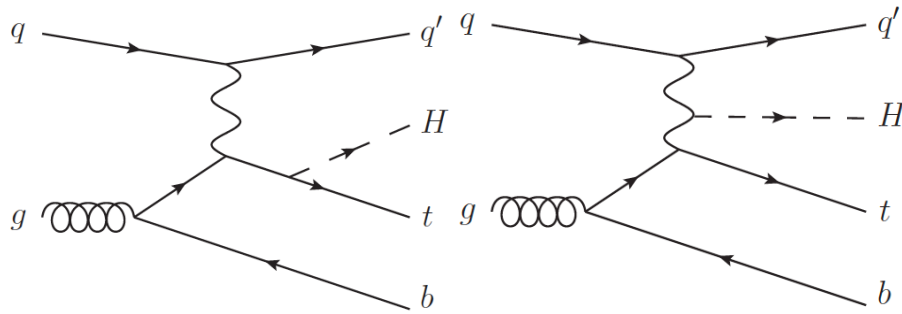


Figura 4: Diagramas Feynman para la producción de Higgs en asociación con solo quark top (tH).

JUSTIFICACION

En abril 2018 la colaboración CMS publico la primera observación del bosón de Higgs en el proceso ttH [1] el cual nos da información sobre la magnitud del parámetro top Yukawa del SM. Sin embargo, el proceso ttH no provee información sobre el signo de κ_t ya que este entra con la segunda potencia en las predicciones de la sección eficaz. El canal de producción de tH no ha sido antes visto y nos puede dar información complementaria a ttH ya que en este canal entran dos diagramas de Feynman que interfieren destructivamente, los diagramas se muestran en la Figura 4. La sección eficaz que se predice por el SM para el proceso tH es de 71 femtobarns (fb). En el caso que el top Yukawa tuviera un signo opuesto ($\kappa_t = -1$) esta sección eficaz seria mucho mayor, 739 fb. Este cambio de signo puede verse como una diferencia en la fase de los diagramas que podría generarse en modelos alternos al SM con física nueva y/o nuevas partículas fundamentales.

Las mediciones de las propiedades del bosón de Higgs, como su producción y decaimientos, forman parte integral del programa de física de las colaboraciones CMS y ATLAS que se llevara a cabo en las siguientes décadas. Con este proyecto nos unimos a este importante programa de actividad en un laboratorio de nivel internacional.

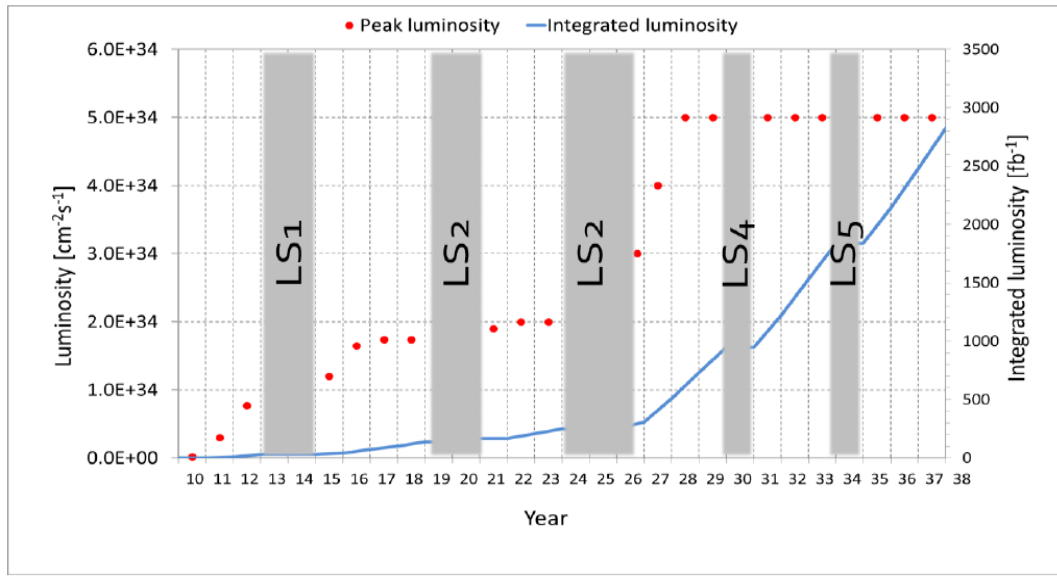


Figura 5: Rendimiento proyectado del LHC hasta 2038, que muestra las fechas preliminares para paradas prolongadas (LS) del LHC y luminosidades. Los puntos muestran la luminosidad instantánea mientras que la línea muestra la luminosidad acumulada.

HIPOTESIS

Los estudios de producción en el canal de $t\bar{t}H$ ya han empezado por las colaboraciones CMS y ATLAS con publicaciones basadas en datos de la corrida 2011-2012 [2] y algunos datos de la segunda corrida del 2015-2016 [3,4]. En estos resultados no se ha encontrado evidencia de señal y se han puesto límites superiores para la sección eficaz. Con el análisis de máxima sensibilidad se calcula un límite superior para la sección eficaz de una señal compuesta de $t\bar{t}H$ que corresponde 3.1 veces la esperada en el SM. En este análisis los métodos de reconstrucción no permiten discernir entre $t\bar{t}H$ y $t\bar{t}H$ debido a que la sección eficaz de $t\bar{t}H$ es mucho mayor a la de $t\bar{t}H$ y algunos eventos pasan las selecciones diseñadas para $t\bar{t}H$, la fracción de eventos de $t\bar{t}H$ sobre $t\bar{t}H+t\bar{t}H$ es de 5%. En modelos BSM esta fracción podría cambiar hasta 50% por ejemplo con $\kappa_t = -1$. Con estudios planeados en este proyecto se puede mejorar la fracción $t\bar{t}H/t\bar{t}H$ haciendo mejoras en la reconstrucción. Esto podría ayudar a obtener mejores límites para la producción de $t\bar{t}H$. Los datos que se han usado hasta ahora corresponden a solo 20% de los datos finales de la corrida que termina en 2018. La incertidumbre para la señal en el análisis actual es mayormente de carácter estadístico por lo cual agregando el total de datos en un nuevo análisis el próximo año se podrá mejorar la sensibilidad con un factor aproximado de 2.2.

Esto nos pondrá cerca del valor esperado en el SM y empieza a poner fuertes restricciones en otros modelos BSM.

Adicionalmente, el grupo planea contribuir a las actualizaciones del detector CMS que se planean para la tercera corrida (2021-2023) y la fase de alta luminosidad (2026-2038). En estas fases el número de datos se dobla y luego se multiplica por 10 respectivamente (ver Figura 5). Con estas adiciones se espera que se pueda medir la señal del bosón de Higgs en el canal $t\bar{t}$. Los resultados actuales se pueden usar para proyectar la sensibilidad en la tercera corrida y la fase de alta luminosidad y así contribuir a la planeación de las actualizaciones de CMS.

OBJETIVO GENERAL

Mediante este proyecto se investigará la producción del bosón de Higgs en asociación con un solo quark de tipo top ($t\bar{t}$) en colisiones protón-protón con el experimento CMS del LHC. Este mecanismo de producción del bosón de Higgs no ha sido observado antes por ningún experimento. El entender la producción del bosón de Higgs, así como sus decaimientos son una parte importante del programa de física de los experimentos del laboratorio internacional CERN que intenta completar las pruebas para verificar el Modelo Estándar, la teoría de las partículas fundamentales. Es importante recordar que existe un gran enigma en la física ya que sabemos que la materia ordinaria comprende solo el 5% del universo, otro 25% lo comprende lo que llamamos materia oscura. Actualmente no conocemos la composición de las partículas de materia oscura y cualquier desviación que se pueda medir en los parámetros del SM con los estudios en este proyecto nos podría dar indicaciones sobre las propiedades de esa parte del universo.

OBJETIVOS PARTICULARES

Búsquedas de nuevas señales en el experimento CMS como la de $t\bar{t}$ requieren de trabajar en diferentes aspectos que incluyen: los modelos de los ruidos que se hacen por simulación, técnicas de ajustes a los datos que incorporan los diferentes ruidos y la señal, entendimiento de las incertidumbres estadísticas y sistemáticas.

El grupo de altas energías cuenta con experiencia con el manejo de los diferentes paquetes de software que se usan en la simulación de eventos, con la reconstrucción de eventos y ajustes, y finalmente con el manejo de centros de cómputo de alto rendimiento que son necesarios para el procesamiento de los datos.

Algunos de los objetivos en este proyecto incluyen:

- estudiar uno de los canales de reconstrucción,
- verificar que la simulación de los eventos de señal sea adecuada,
- estudiar la extracción de la fuerza de la señal y la incertidumbre de esta.

METAS

Las metas de este proyecto son las siguientes.

- Comprender la física de partículas y el rol del bosón de Higgs desde un punto de vista experimental.
- Aprender a analizar y manipular datos usando lenguajes de programación modernos.
- Mejorar los ajustes a los datos y estudiar los efectos de las incertidumbres.
- Mejorar la sensibilidad a la señal de tH en los datos de la segunda corrida CMS.
- Estudiar la sensibilidad esperada para las diferentes fases del LHC.

METODOLOGIA

Para cada aspecto del proyecto se usan diferentes herramientas y procedimientos.

Los aspectos de la simulación de la producción de la señal se estudian a base de generadores como MadGraph y Pythia que simulan las interacciones de los quarks y gluones tomando en cuenta las distribuciones de probabilidad de cada tipo de partícula. Estos son paquetes de software que se controlan con archivos de configuración que definen varios aspectos como son los canales de decaimiento, la energía en el centro de masa y afinamientos en el desarrollo de los jets que se generan por la interacción Fuerte de los quarks.

La reconstrucción y selección de los eventos de tH requiere de utilizar software central de la colaboración CMS. Este software contiene los algoritmos que reconstruyen las partículas cargadas y neutrales partiendo de los depósitos de energía en las diferentes partes del detector. Estas partículas incluyen leptones, fotones y hadrones, los cuales tienen un tiempo de vida que les permite salir de la región de interacción. Estas partículas se utilizan para identificar la producción del top y del Higgs. En el caso del top, generalmente decae a un quark b y un bosón W. Posteriormente el W decae a dos leptones o dos quarks. La reconstrucción requiere de encontrar un jet de tipo b y dos leptones o dos jets. Mejoras en esta reconstrucción se pueden hacer estudiando las

distribuciones de momento transversal, las distribuciones angulares de las diferentes partículas, y otras variables. Incorporar nuevos datos a un análisis requiere de algunos cuidados ya que la calibración de los detectores y la reconstrucción de las partículas suele cambiar para cada periodo. Es necesario entender cualquier cambio en la eficiencia de reconstrucción. Esto generalmente se hace haciendo comparaciones de las diferentes distribuciones cinemáticas con periodos anteriores.

En los estudios de ajustes a los datos se utiliza software capaz de incorporar varias categorías de señal, varios componentes de ruido y varias incertidumbres. Es necesario incorporar varias categorías debido a las diferentes posibilidades de decaimiento del top y del Higgs. En diferentes canales hay diferentes ruidos con diferentes incertidumbres. En el caso cuando el bosón W del top decae a dos electrones estos pudieran ser dos quarks mal identificados, esto es diferente al caso de un W que decae a dos muones. La probabilidad que un jet sea mal identificado como un muon es mucho mas pequeña debido a que los muones pueden atravesar hasta las capas de afuera de CMS. Las incertidumbres en las eficiencias de identificación son incorporadas en los ajustes y deben ser actualizadas.

RESULTADOS ESPERADOS

Los resultados esperados de este proyecto son los siguientes:

- Mejorar los ajustes a los datos.
- Cálculos de los limites en la sección eficaz incorporando datos de la segunda corrida del LHC.
- Calcular proyecciones de la sensibilidad a la señal para las diferentes fases del LHC.

HABILIDADES QUE SE DESARROLLARAN

El estudiante desarrollara varias habilidades en base al trabajo en este proyecto:

- Aprenderá la física de las partículas fundamentales.
- Aprenderá a programar en lenguajes como c++, Python y ROOT
- Técnicas de análisis de datos como encontrar correlaciones.
- Utilizar cómputo de alto rendimiento.
- Hablar en público y en el idioma ingles.

INFRAESTRUCTURA, MOVILIDAD y RECURSOS

- Como parte del grupo de física de altas energías el estudiante tendrá acceso al clúster de computo ACARUS de la Unison y también remotamente a los centros de computo de los laboratorios Fermilab y CERN.
- El director de este proyecto esta actualmente aplicando a convocatorias de CONACYT para conseguir fondos para movilidad.
- Se colabora con grupos de investigación en los laboratorios Fermilab y CERN lo cual permite hacer estancias en estos centros de investigación.
- El estudiante podrá presentar su trabajo en congresos nacionales o internacionales.

CALENDARIO DE ACTIVIDADES

Las siguientes serán las actividades del estudiante durante este proyecto.

Verano 2018:

- Estudios independientes sobre el modelo estándar y el bosón de Higgs.
- Aprender el lenguaje de programación ROOT que es basado en c++.
- Aprender los conceptos básicos del análisis de datos en ROOT.

Semestre 2018-2:

- Curso optativo Física de Partículas.
- Estudios independientes sobre métodos estadísticos.
- Estudios de ajustes a los datos en uno de los canales de reconstrucción de tH.
- Estudiar los efectos de las incertidumbres en la fuerza de la señal de tH

Semestre 2019-1:

- Curso optativo por definir.
- Finalizar estudios de los datos de la corrida dos del LHC.
- Escritura de la tesis
- Participación en congreso

Bibliografia

1. The CMS collaboration, "Observation of $t\bar{t}H$ production", PRL 120 (2018) 231801
2. "Measurements of the Higgs boson production and decay rates and constraints on its couplings from a combined ATLAS and CMS analysis of the LHC pp collision data at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV", *J. High Energy Phys.* 08 (2016) 045.
3. The ATLAS Collaboration, "Search for $t\bar{t}H$ produced in association with top quarks and constraints on the Yukawa coupling between the top quark and the Higgs boson using data taken at 7 TeV and 8 TeV with the ATLAS detector", *Physics Letters B* 740 (2015) 222-242
4. The CMS collaboration, "Search for production of a Higgs boson and a single top quark in multilepton final states in proton collisions at 13 TeV", CMS-PAS-HIG-17-005
5. The CMS collaboration, "Search for $H \rightarrow b\bar{b}$ in association with a single top quark as a test of Higgs boson couplings at $\sqrt{s} = 13$ TeV", CMS-PAS-HIG-16-019