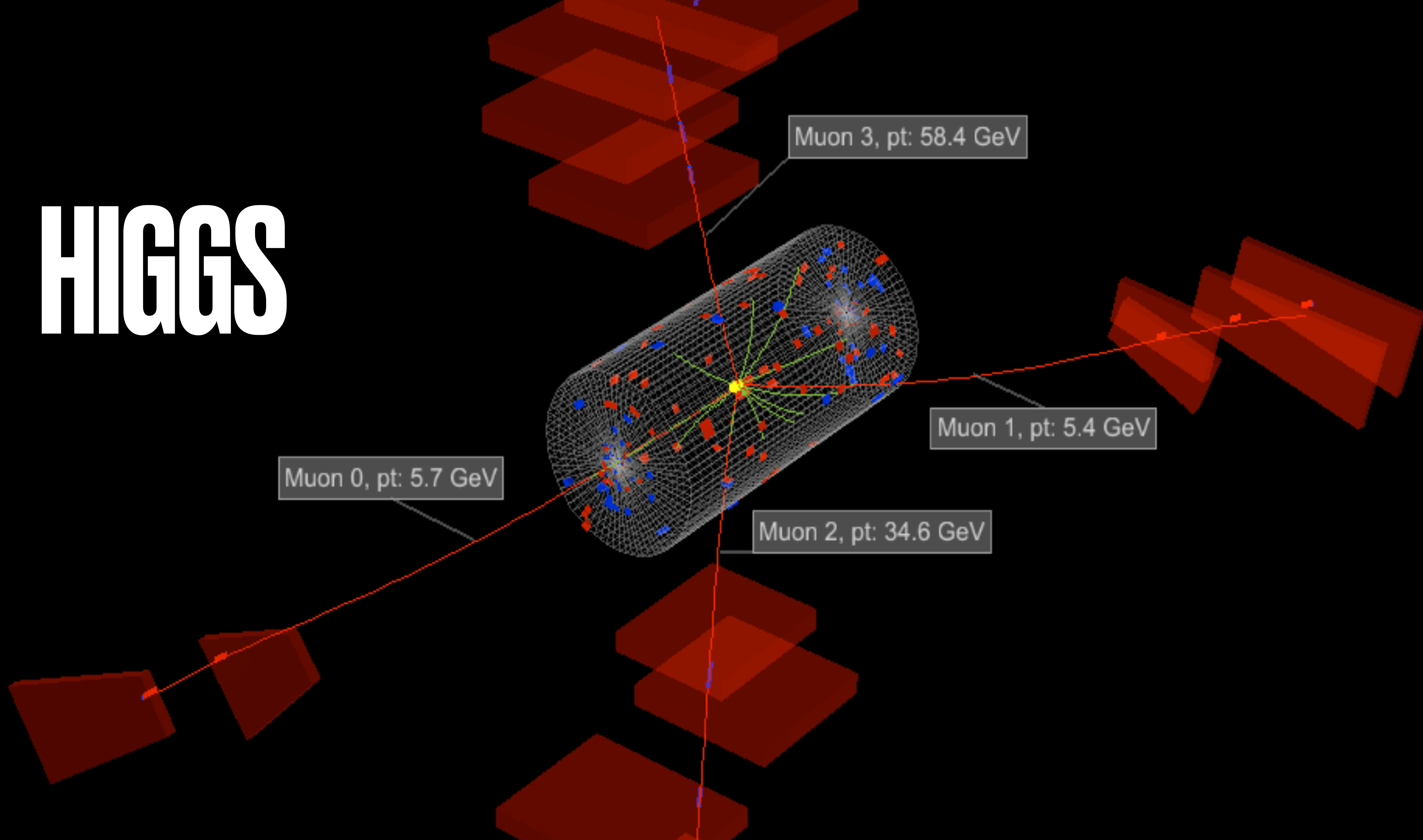


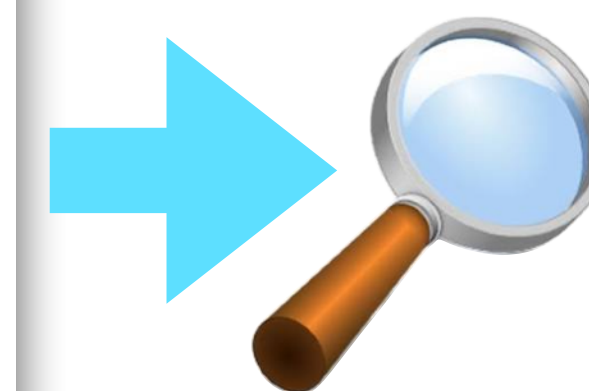
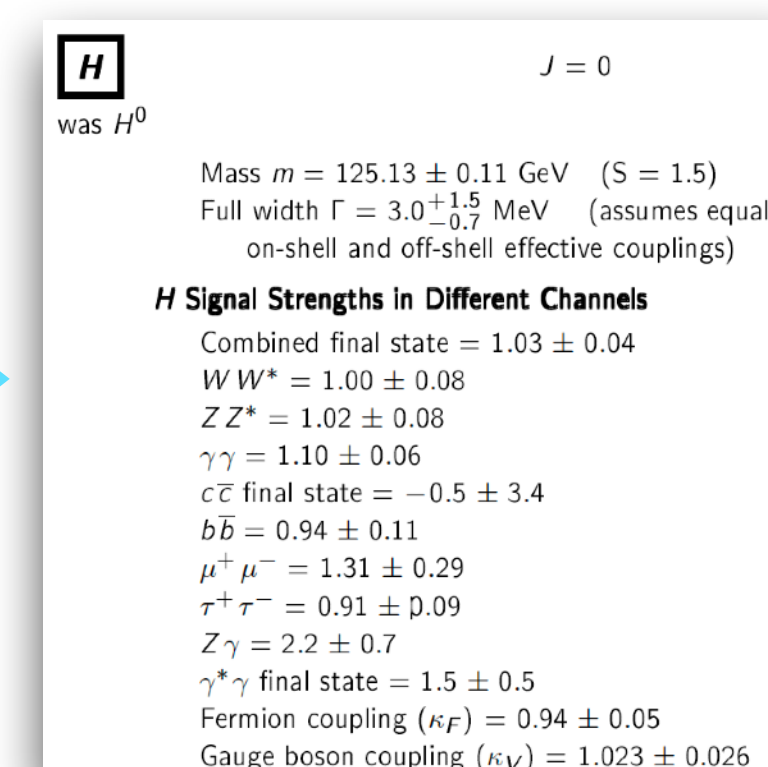
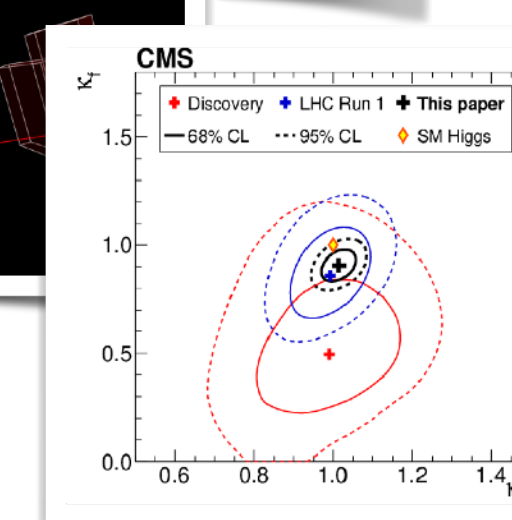
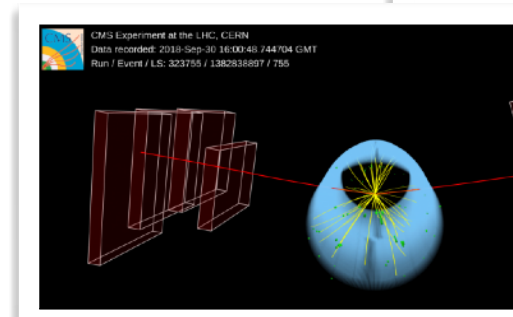
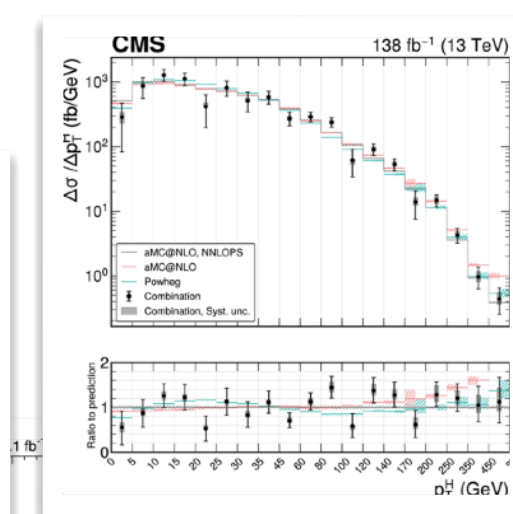
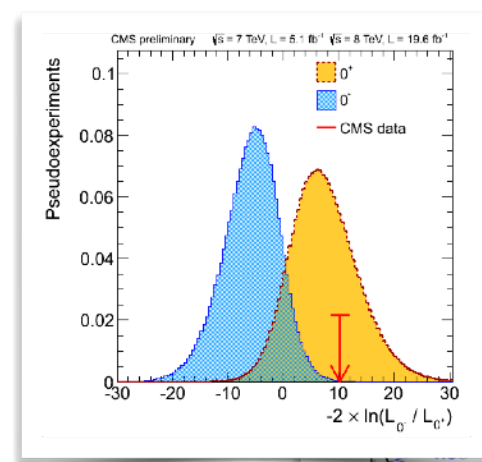
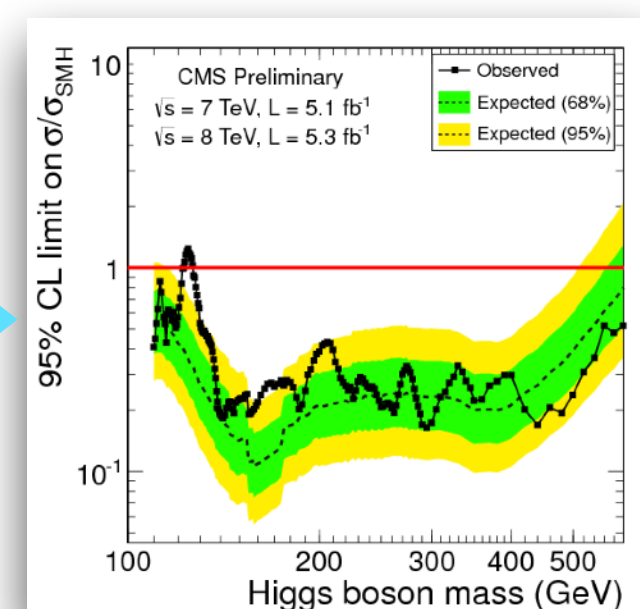
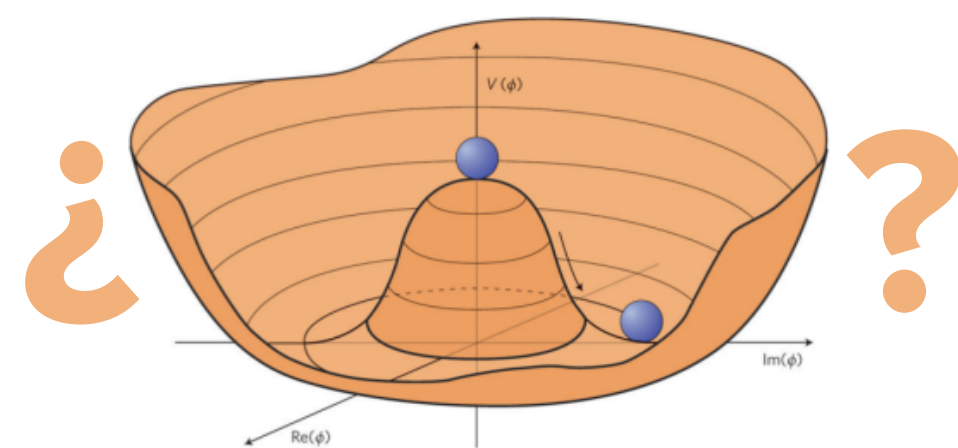
HIGGS



HIGGS, HIGGS, HIGGS...

UN NUEVO CAPITULO PARA LA FÍSICA DE PARTÍCULAS

- El descubrimiento del Higgs fue uno de los momentos más importantes para la física en las últimas décadas
- Estudiar su naturaleza nos lleva a los límites de nuestro conocimiento del Modelo Estándar... y más allá

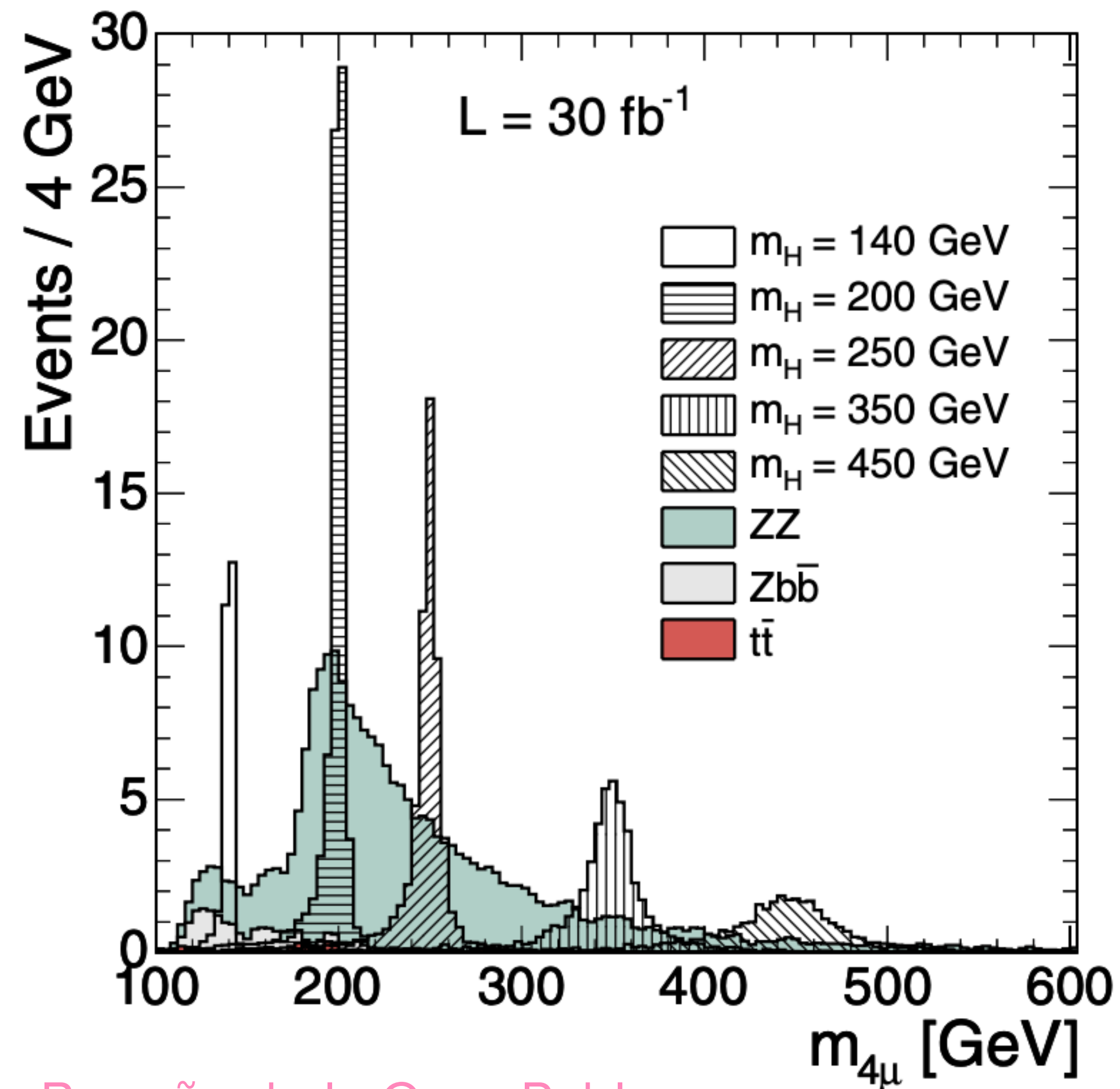


El CIEMAT ha participado en esta aventura desde el diseño, contribuyendo al establecimiento de la 'Física del boson de Higgs' como una amplia area experimental

DISEÑADO PENSANDO EN EL HIGGS

LOS ANÁLISIS ESTABAN LISTOS MUCHO ANTES DEL ARRANQUE DE LA TOMA DE DATOS

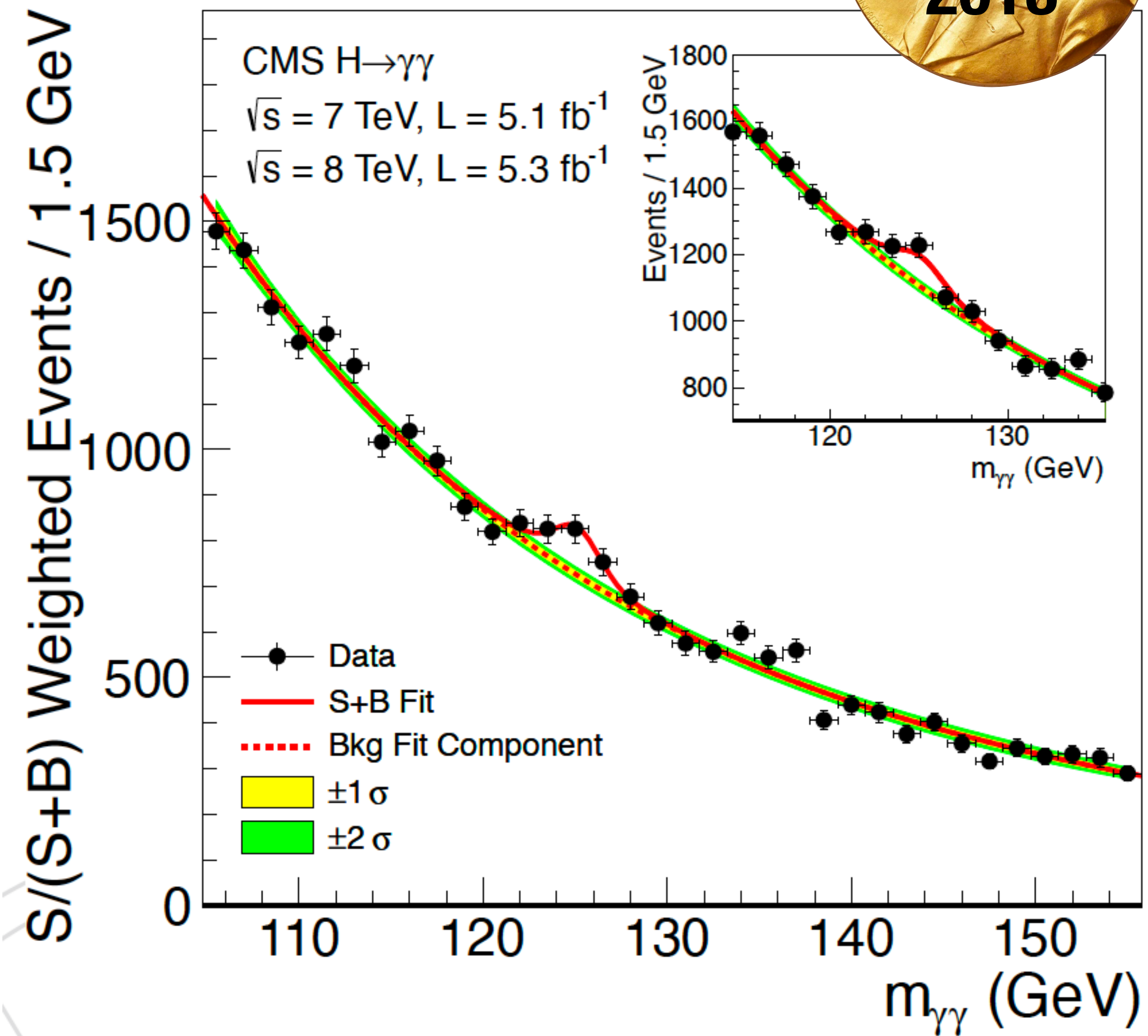
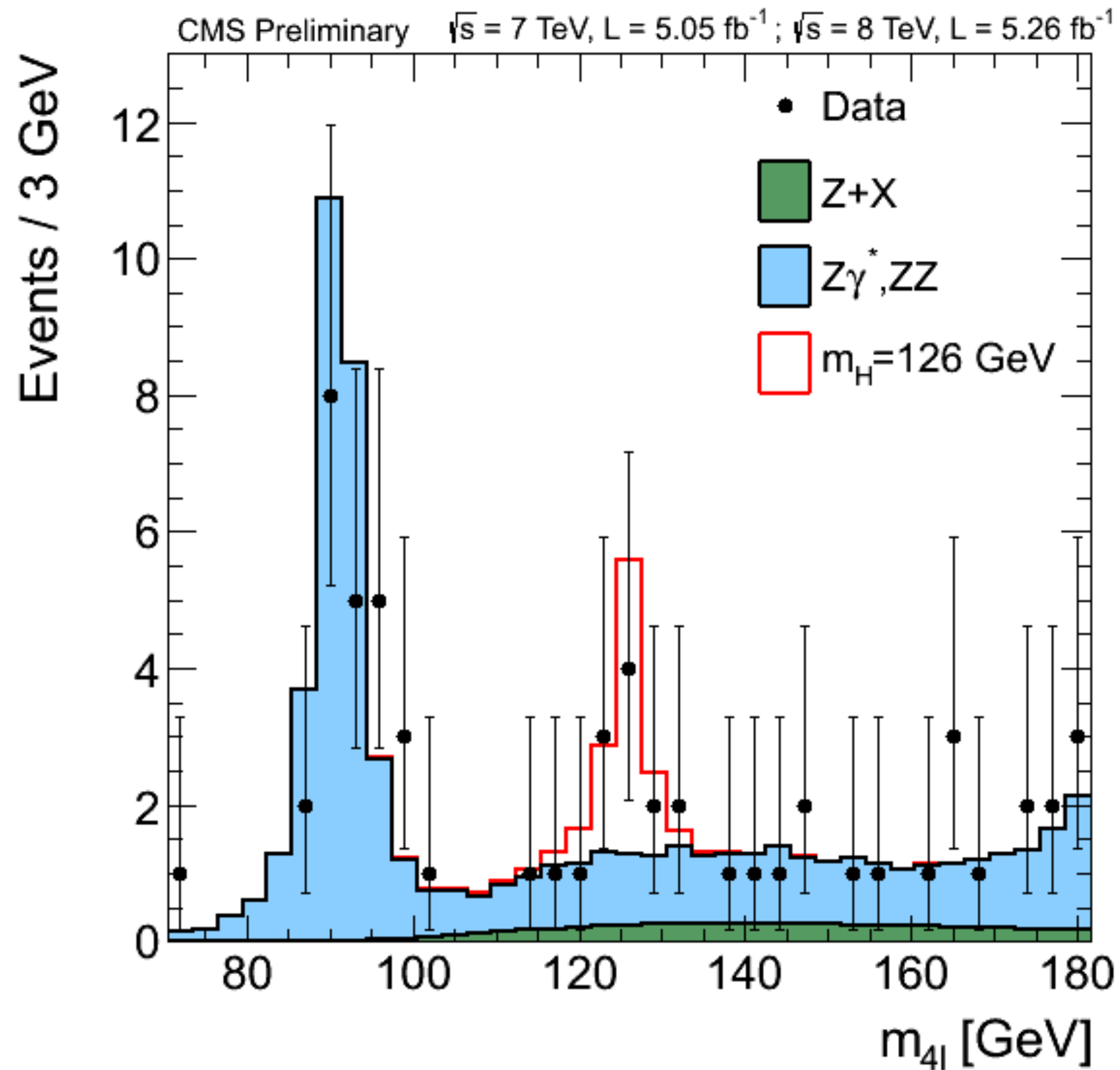
- La excelente reconstrucción, detección, e identificación de leptones y fotones fue diseñada pensando en el descubrimiento
- **CIEMAT contribuyó al programa de muones de CMS liderando la preparación del análisis $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$.** Desde estudiar el impacto de la calibración de la velocidad de deriva en las DT hasta la extracción final de la señal. Y no era fácil: software inestable e incompleto, muestras no centralizadas, muchas herramientas todavía por construir... ¿Quién se acuerda de CMSSim, ORCA...?
- PhD thesis: **María Aldaya Martín (2008):** Potencial de descubrimiento del boson de Higgs en 4μ . Supervisor: Pablo García



María Aldaya, Pedro Arce, José Caballero, Begoña de la Cruz, Pablo García, Jose María Hernandez Calama, Isabel Josa, Ester Ruiz Morales

Y LO ENCONTRAMOS

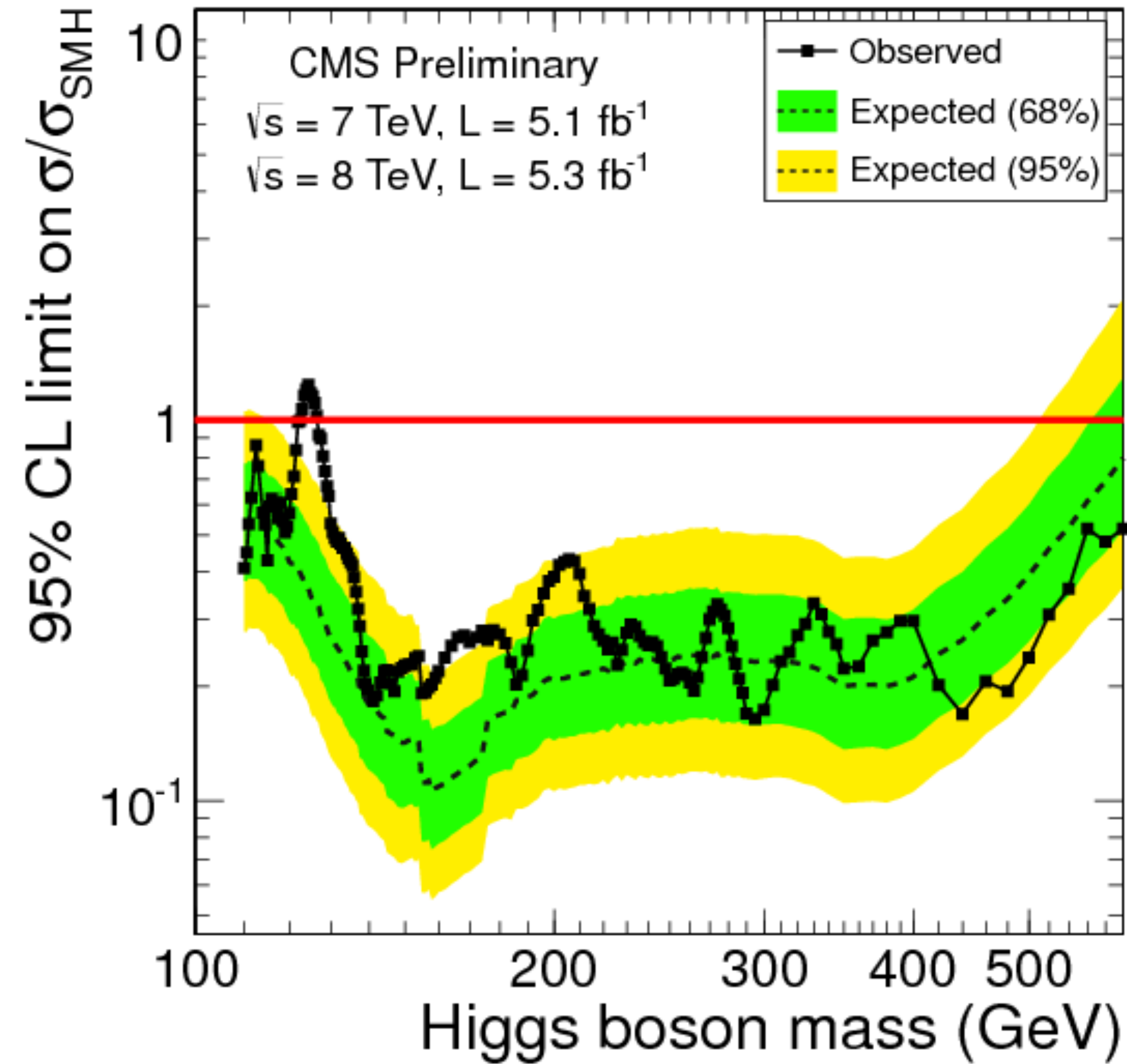
UN MOMENTO HISTÓRICO



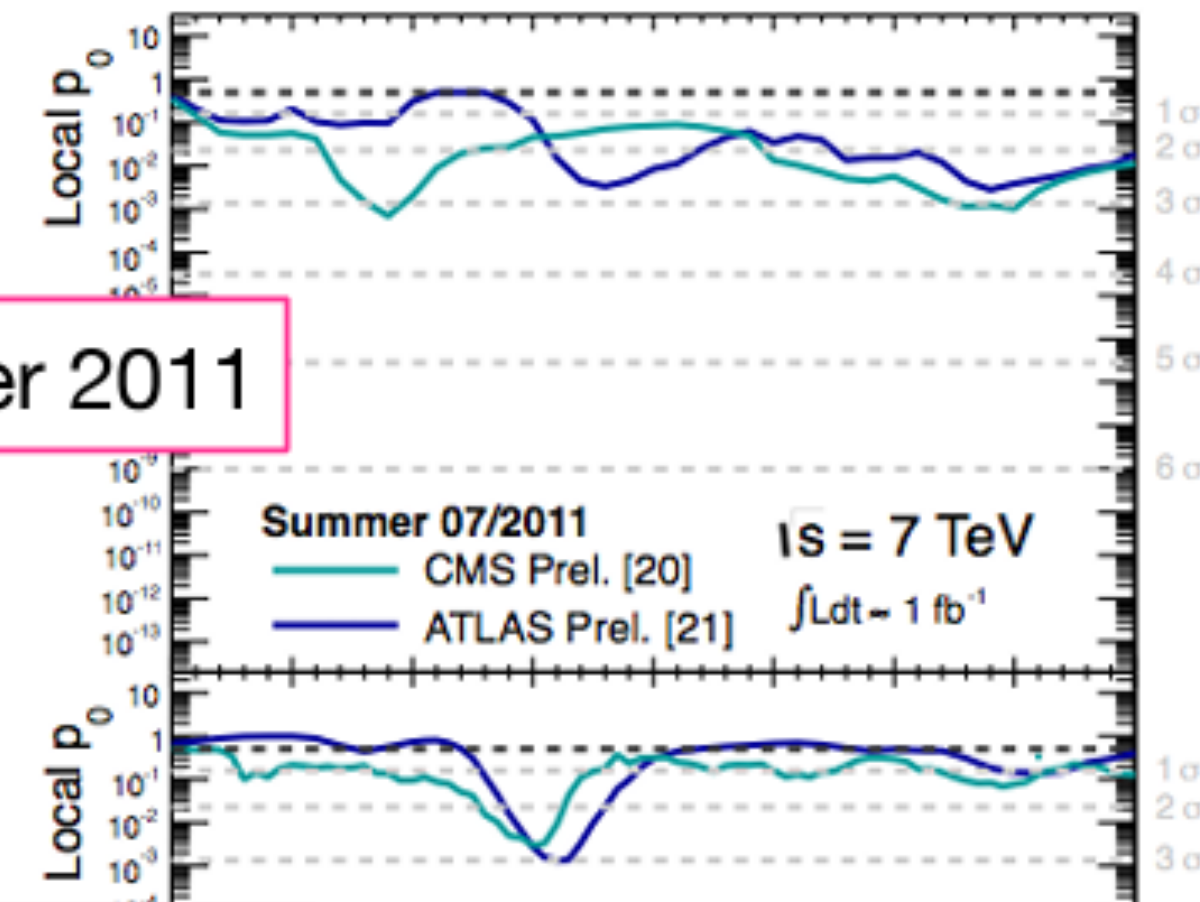
Y LO ENCONTRAMOS

UN MOMENTO HISTÓRICO

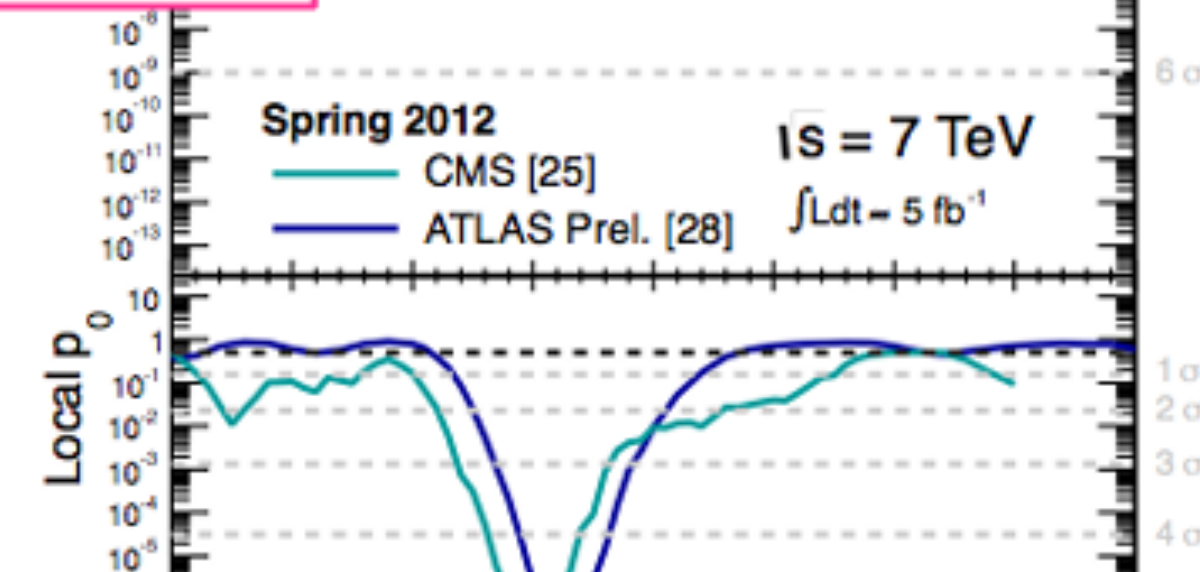
- El primer run del LHC fue trepidante: de las primeras colisiones en 2010, a exclusiones significativas con muy pocos datos, a señales claras en 2011, y la observación conjunta en 2012. Superamos todas las expectativas.
- Una nueva partícula! Muy parecida al esperado bosón, con propiedades que ya parecían confirmar la predicción del SM, aunque en 2012 aún nos quedaba mucho por entender



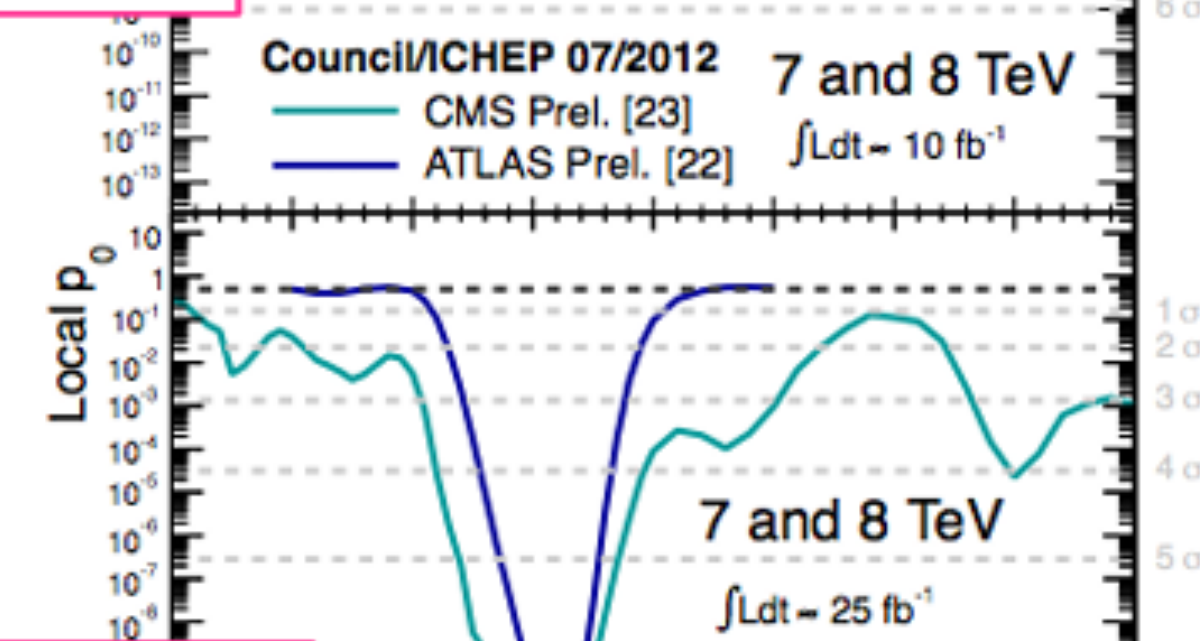
Summer 2011



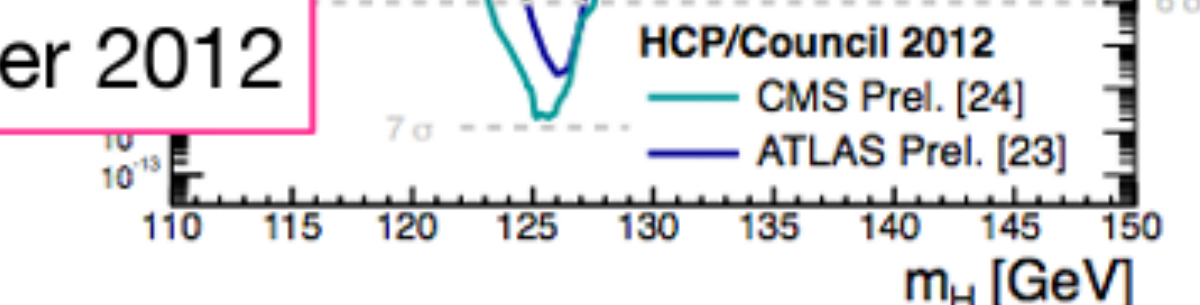
December 2011



Summer 2012

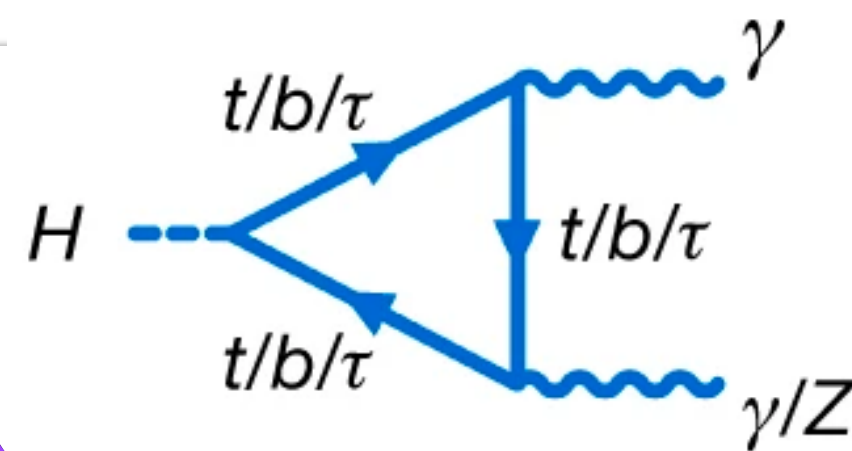
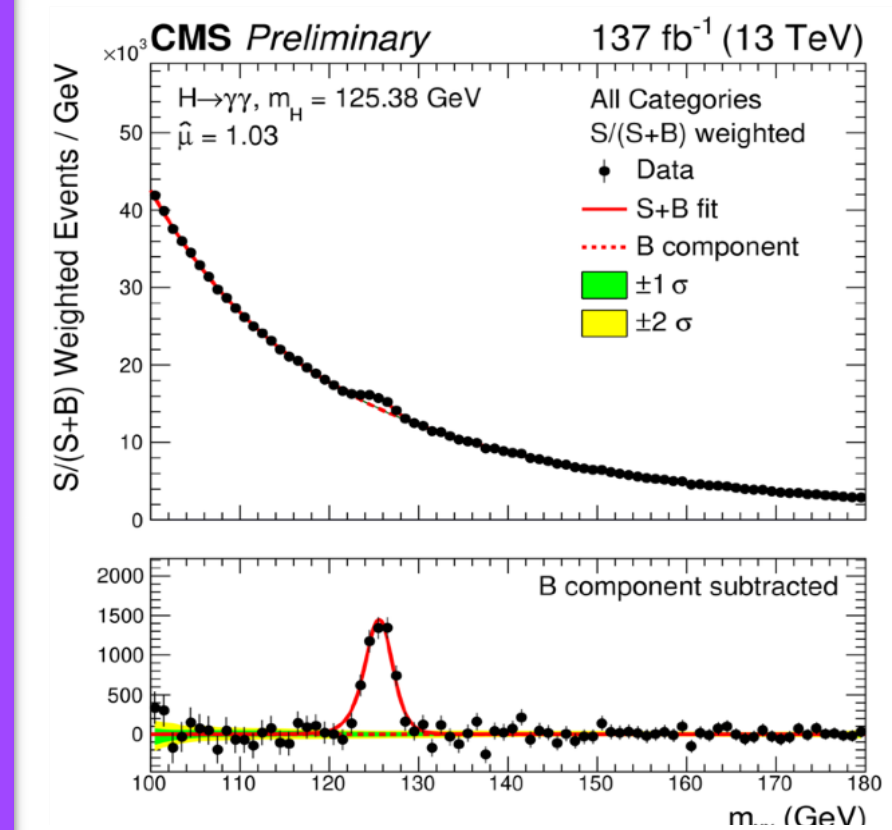
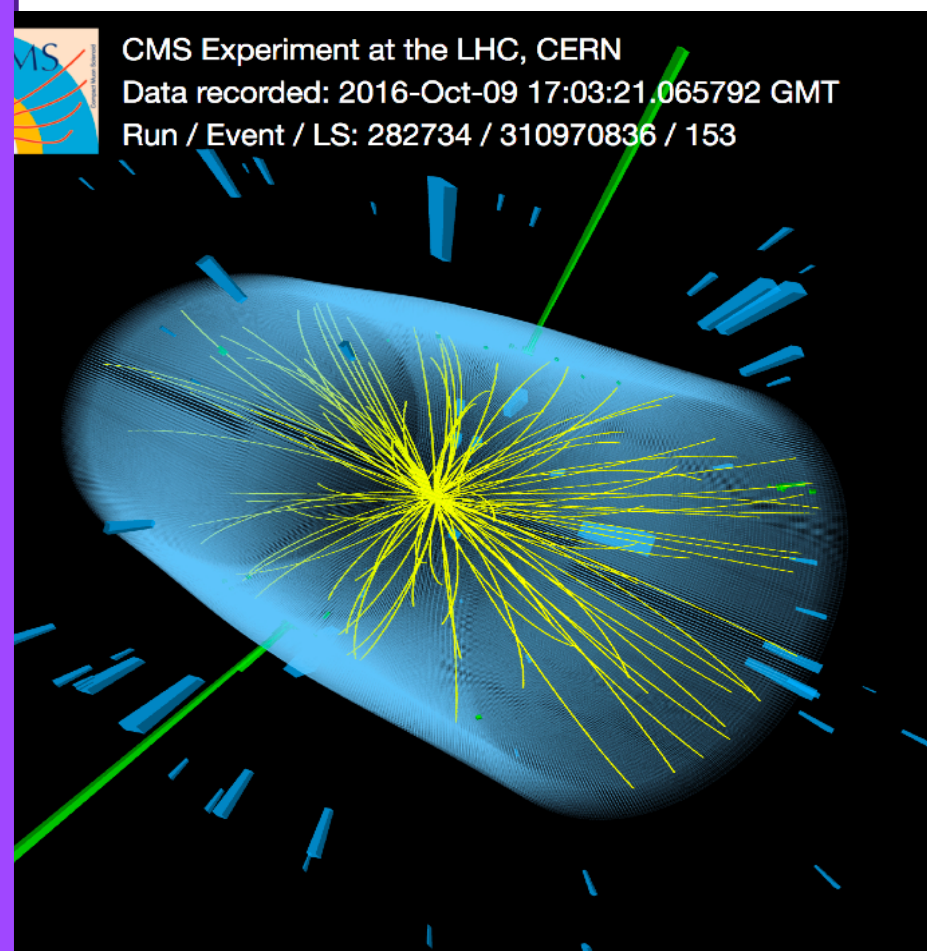


December 2012



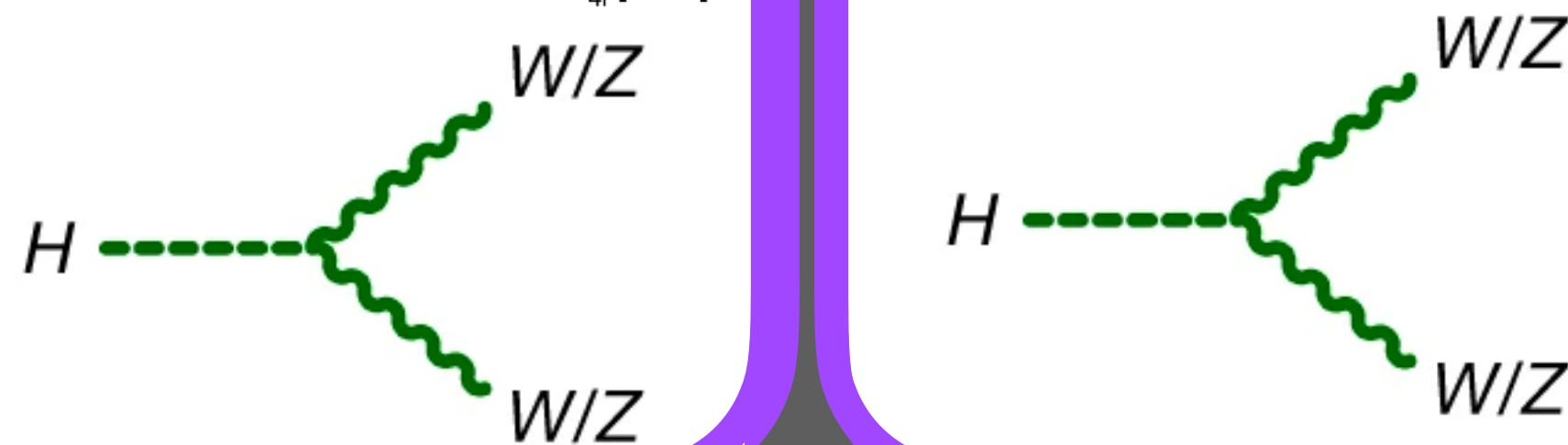
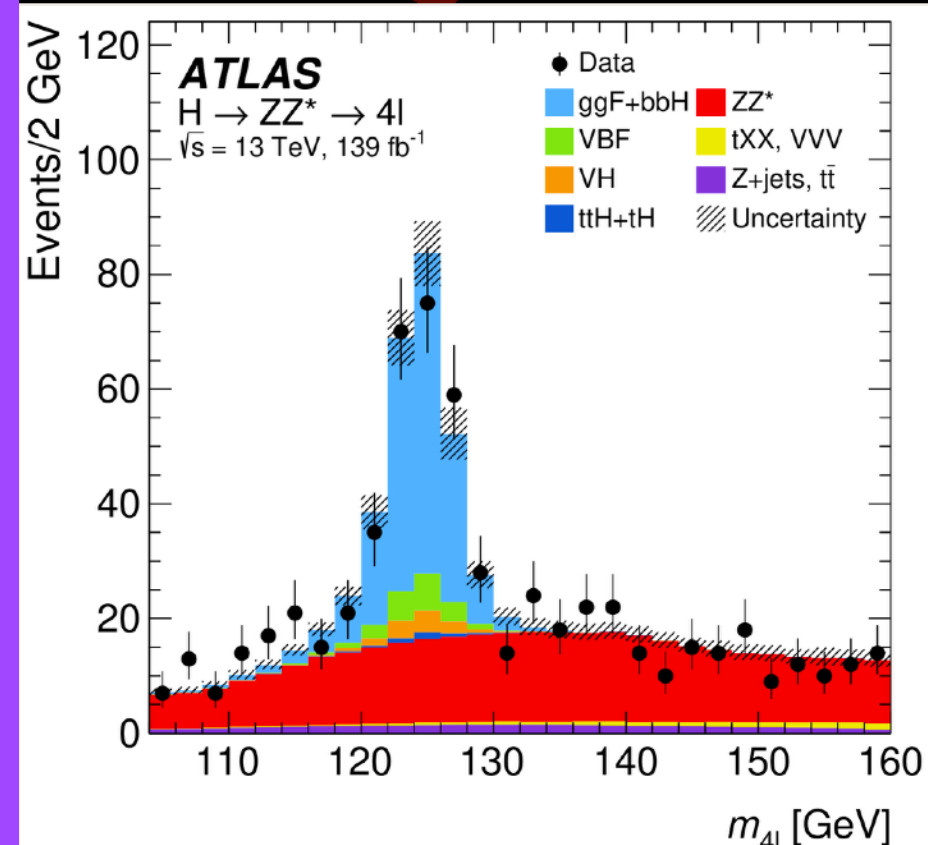
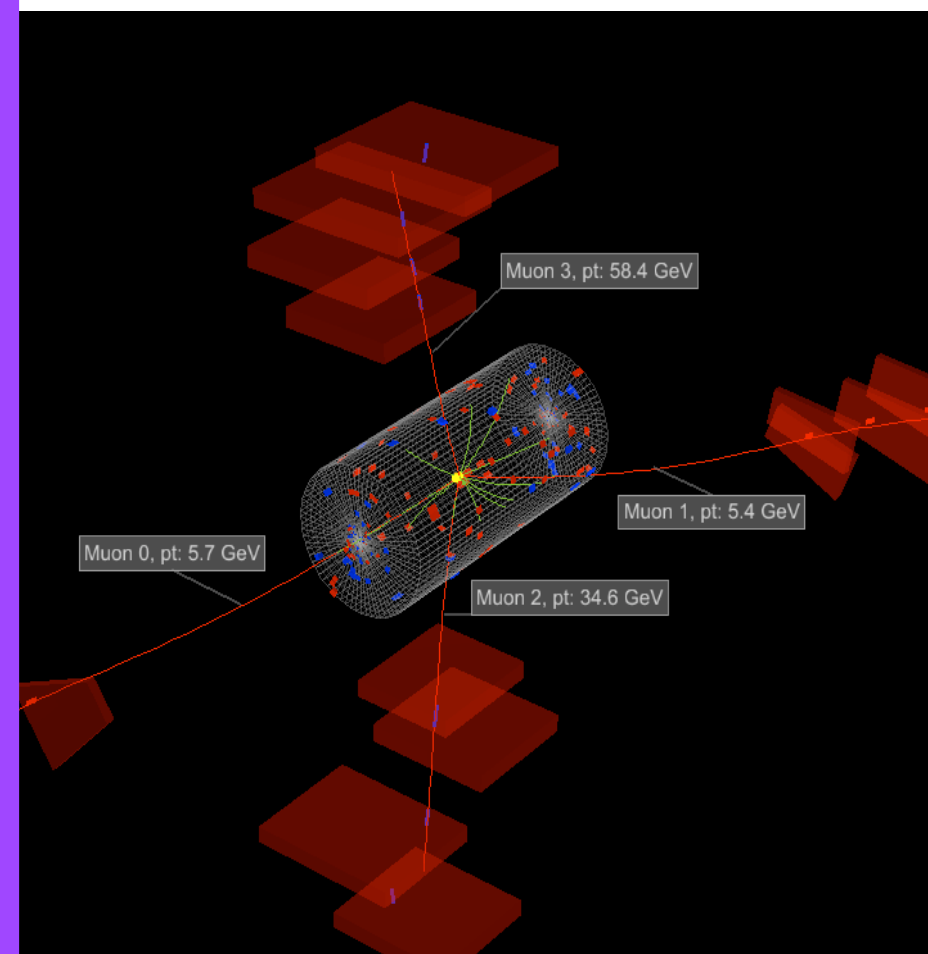
$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

Br~0.2%



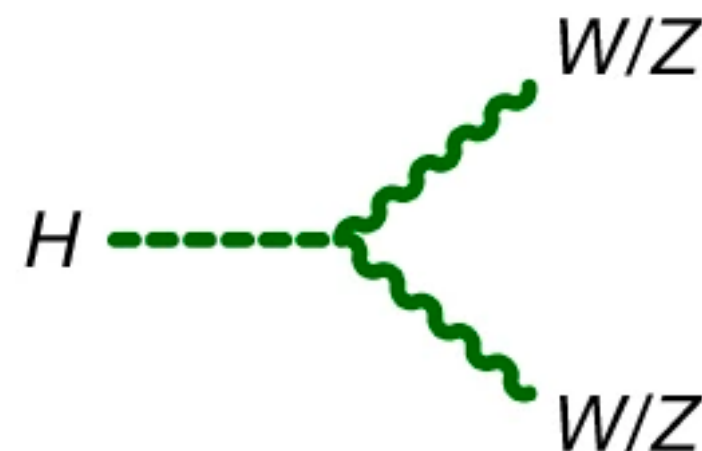
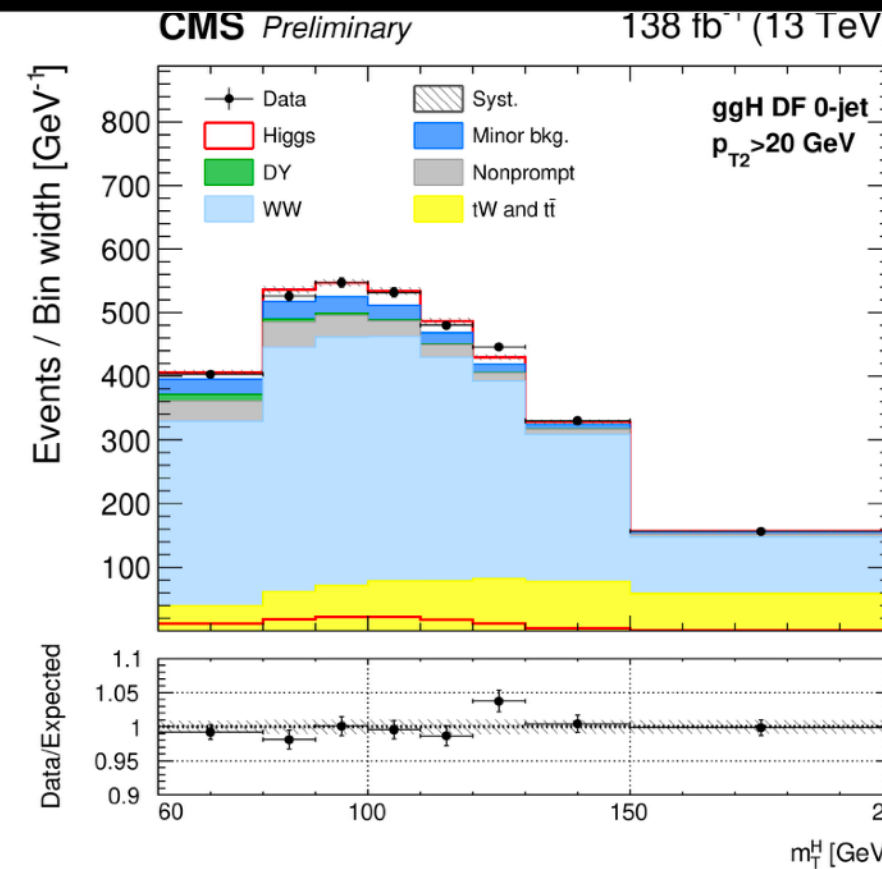
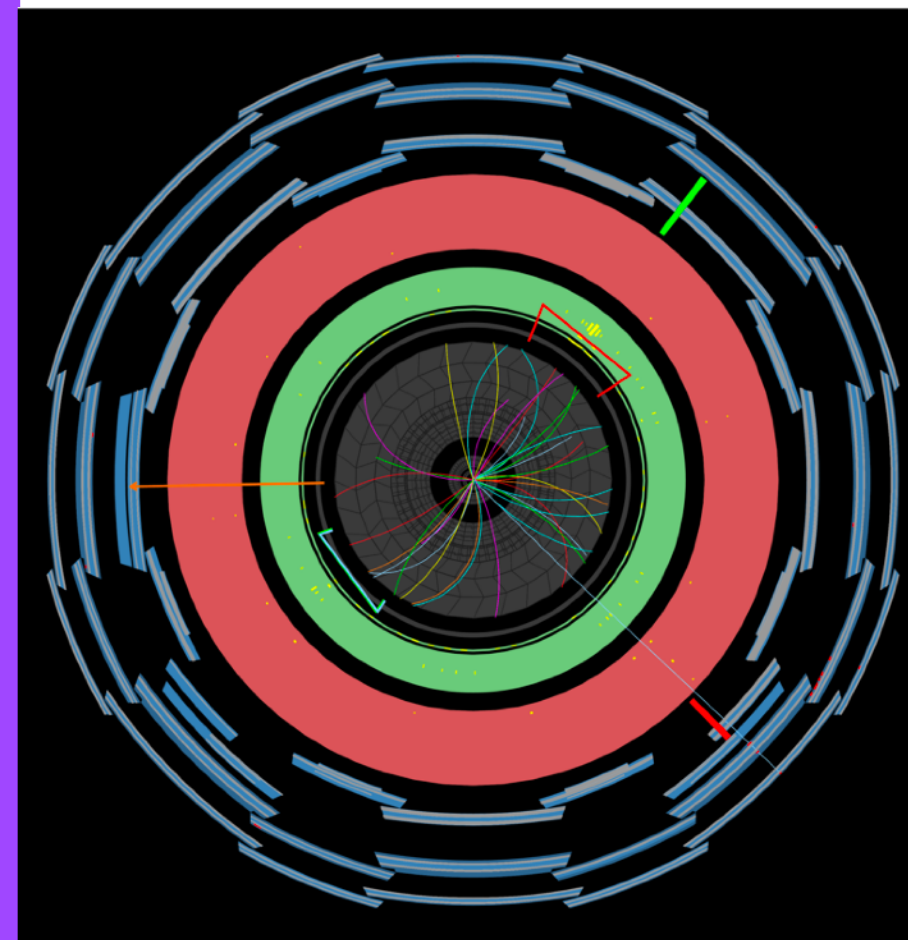
$$H \rightarrow ZZ$$

Br~3%



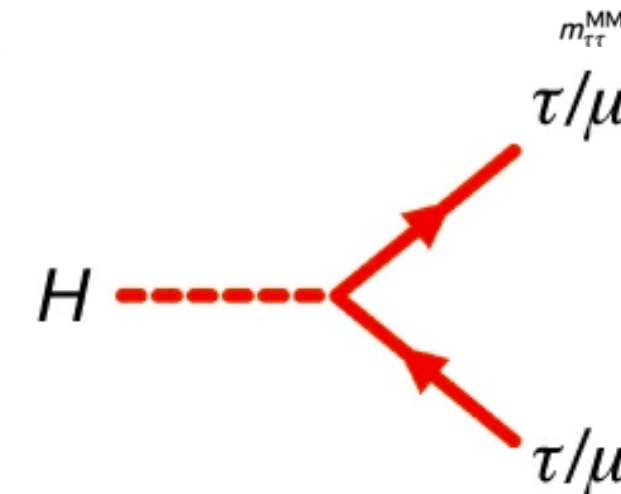
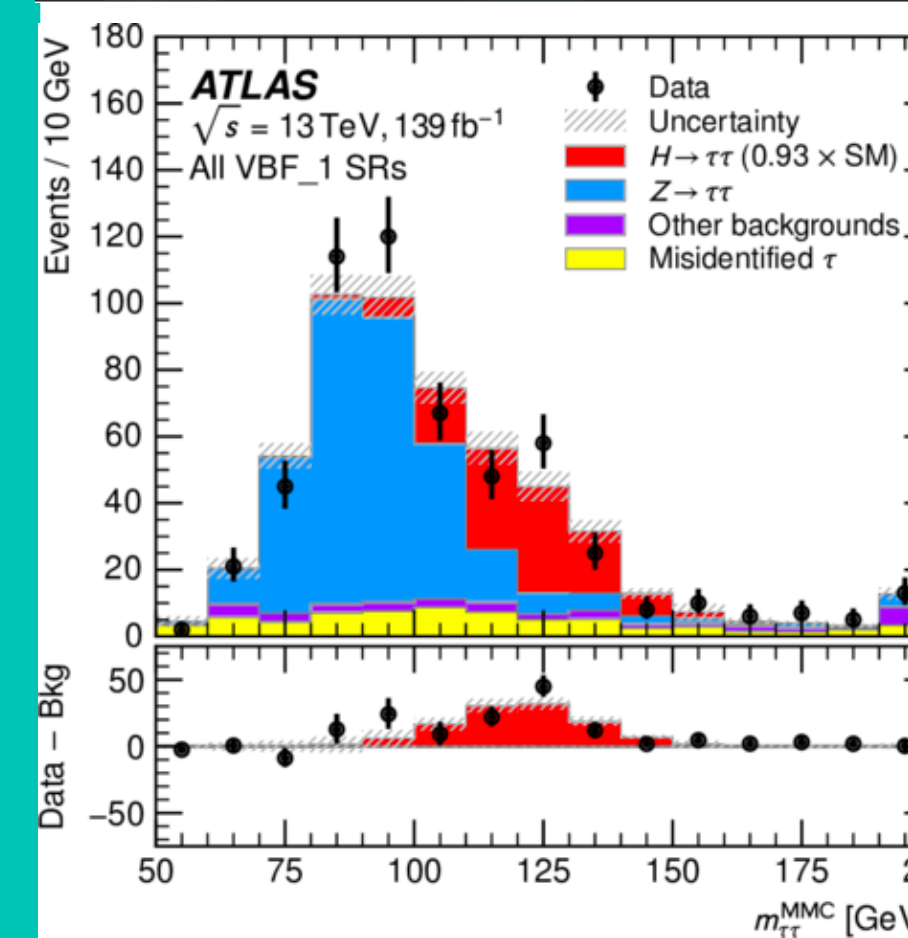
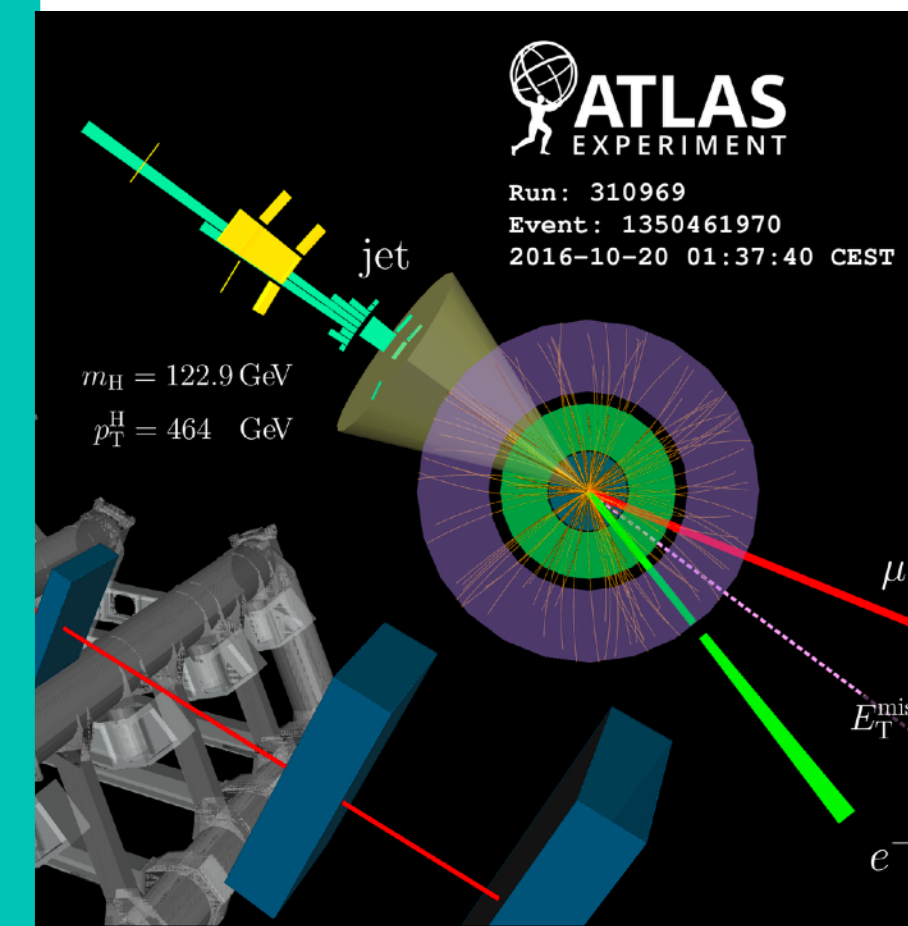
$$H \rightarrow WW$$

Br~22%



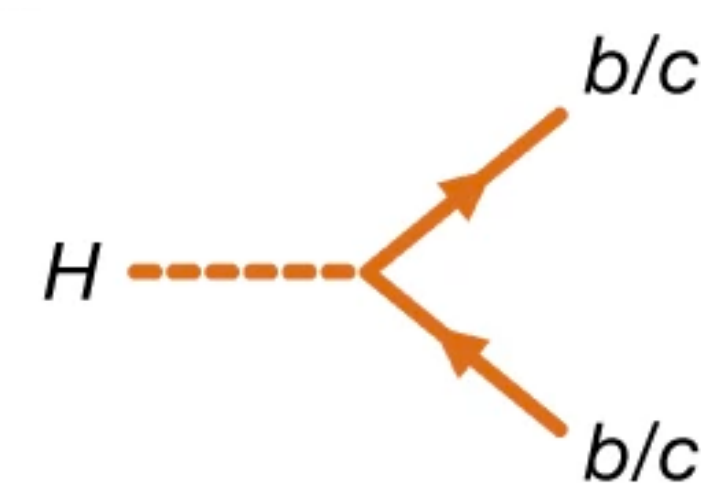
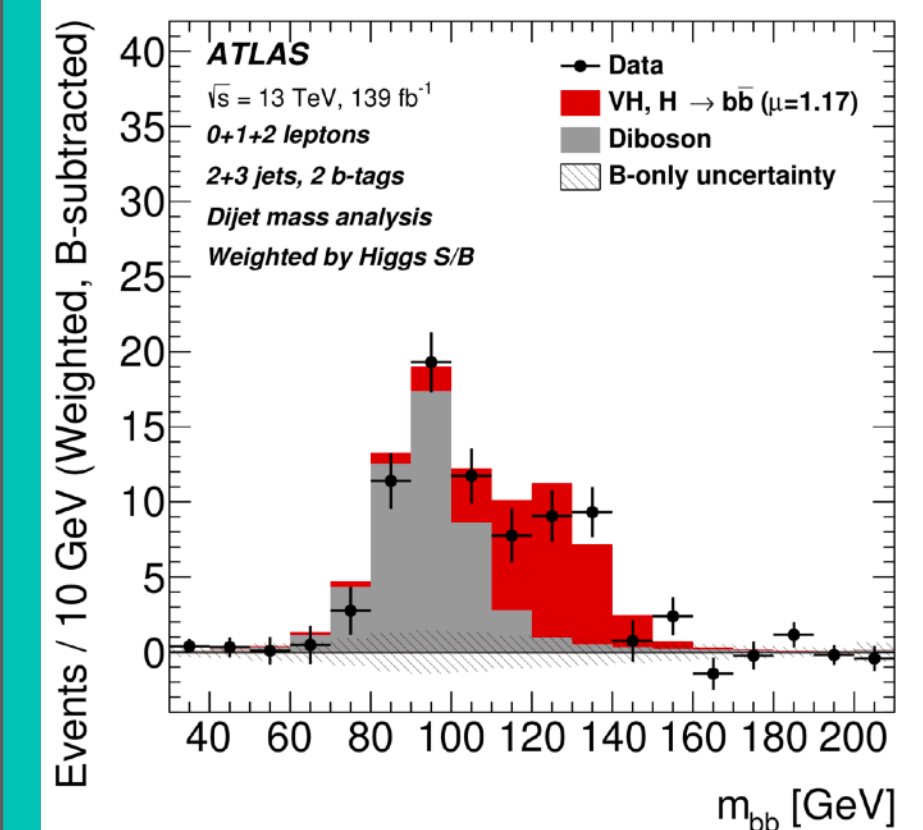
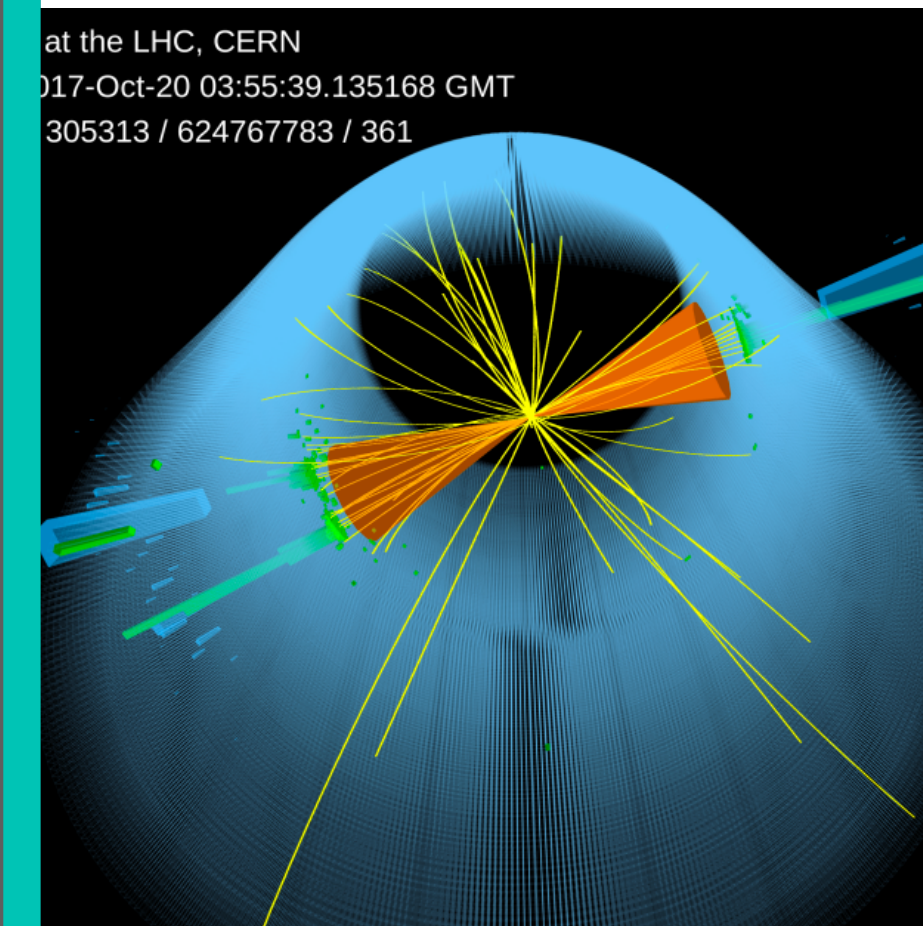
$$H \rightarrow \tau\tau$$

Br~6%



$$H \rightarrow bb$$

Br~58%



H → ZZ: DEL DESCUBRIMIENTO A LA PRECISIÓN Y A LAS BÚSQUEDAS

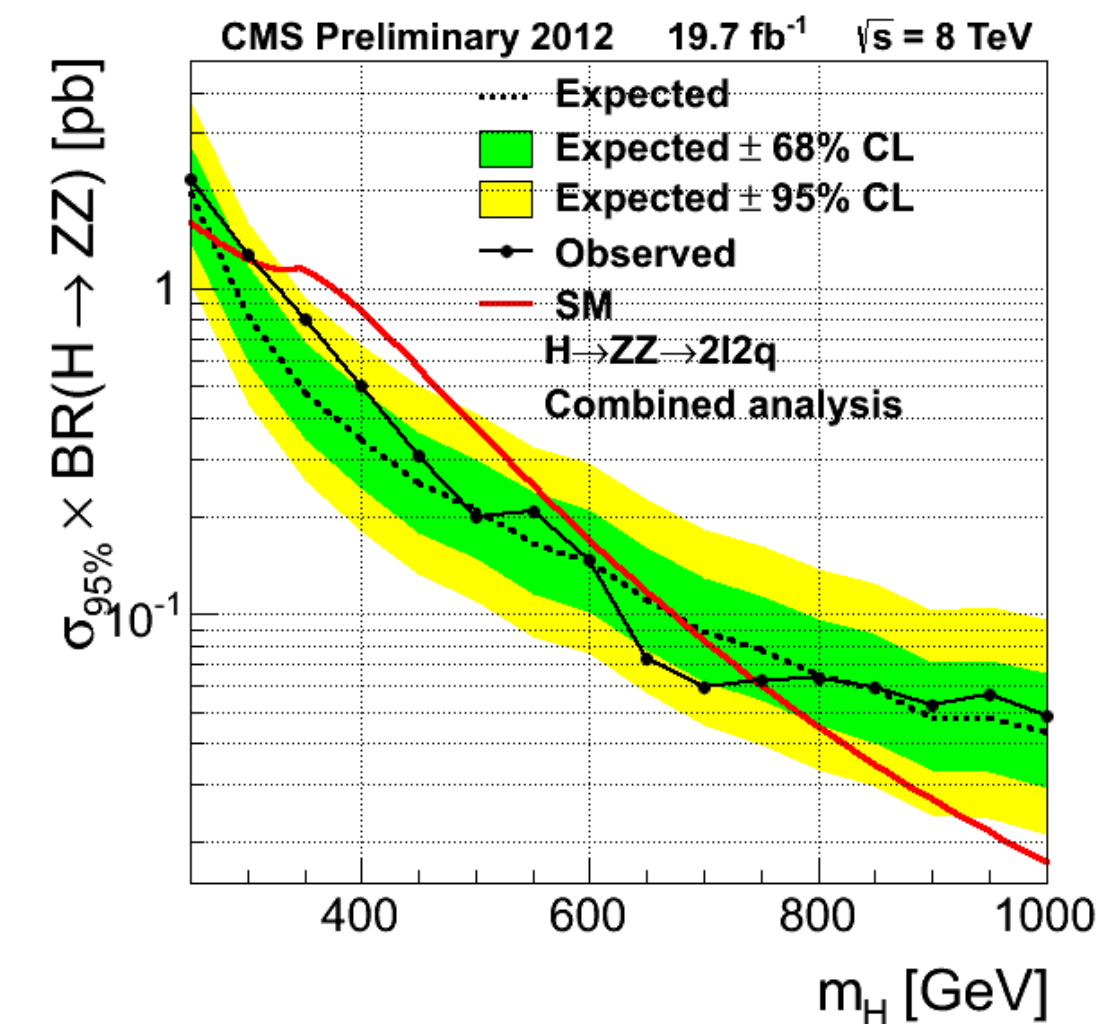
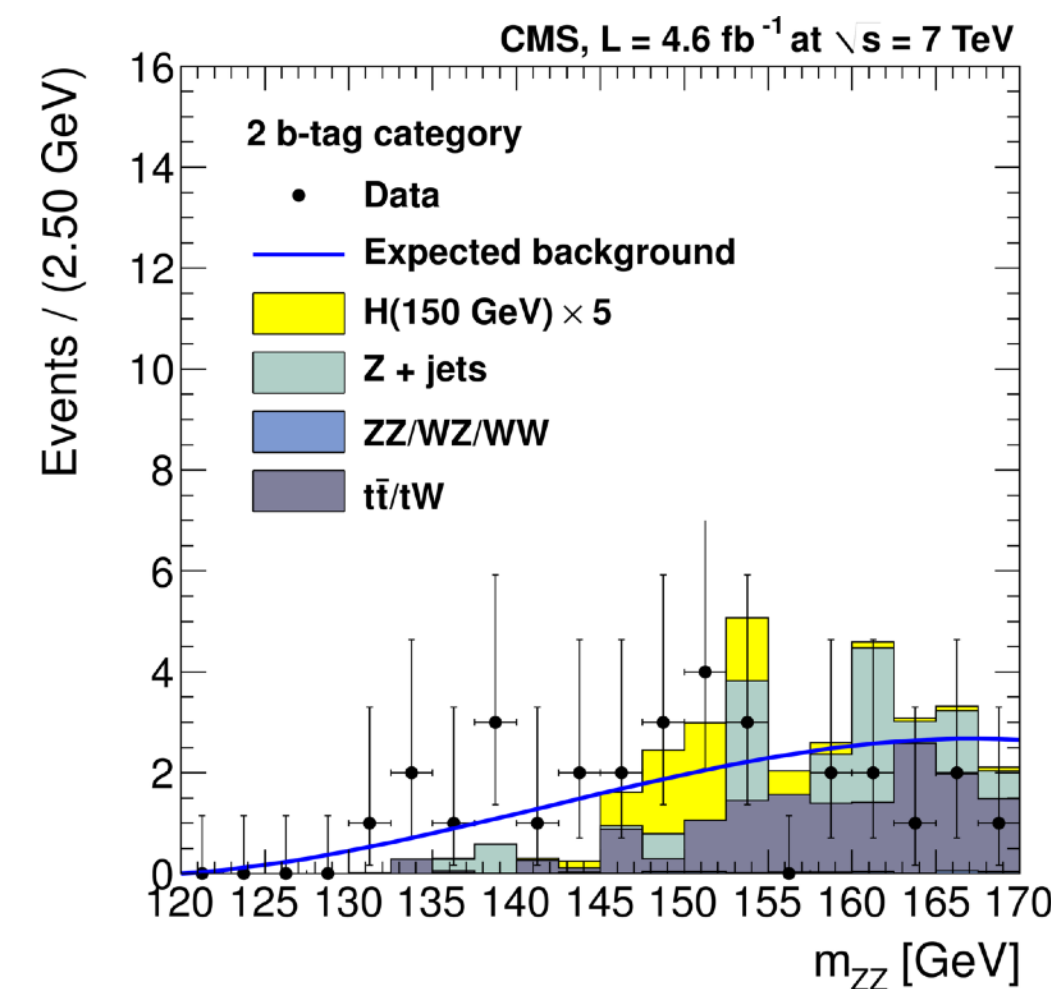
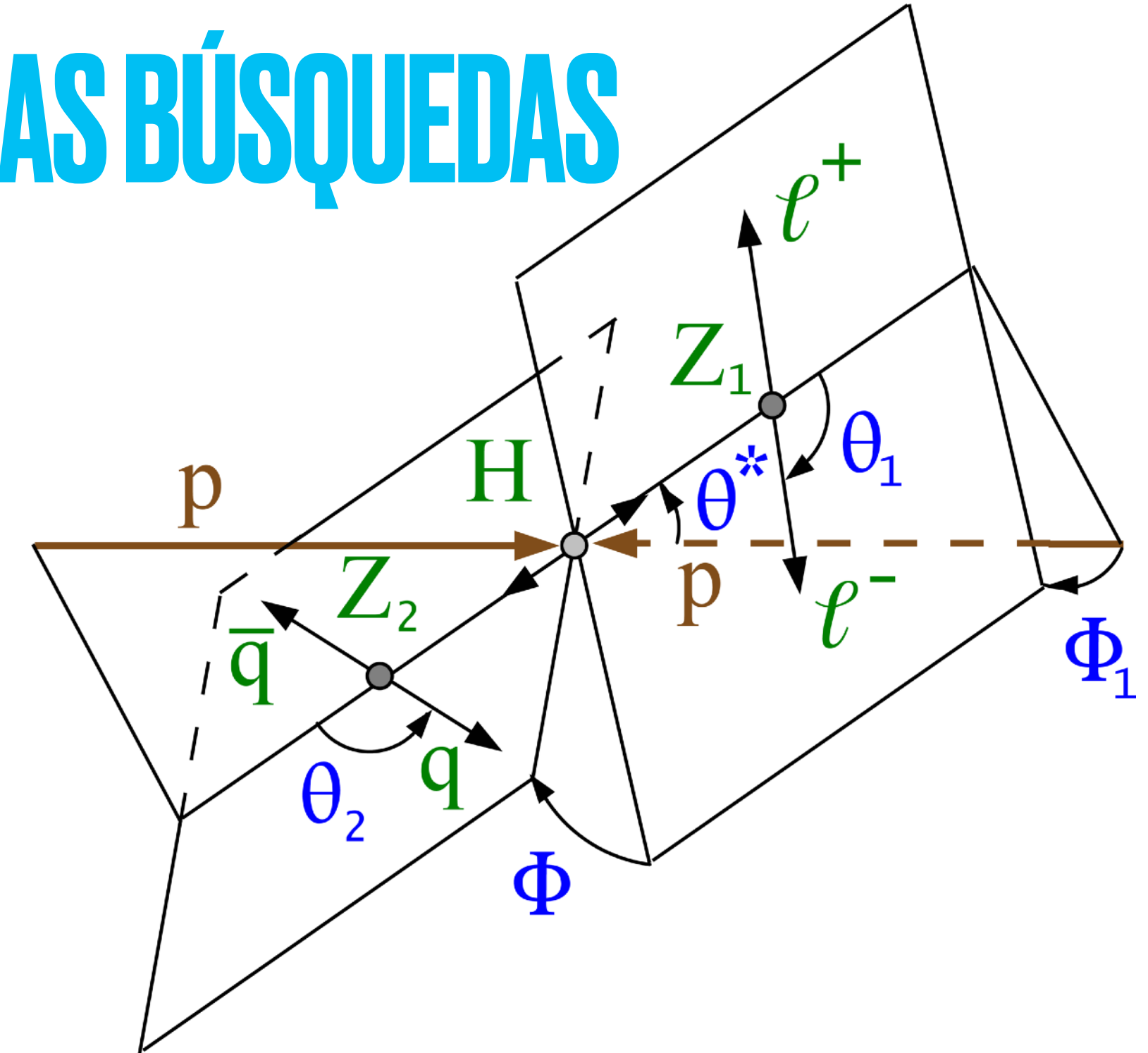
MÁS ALLÁ DE CUATRO LEPTONES

- ZZ → ℓℓqq sacrifica la limpieza de 4ℓ con una mucho mayor razón de desintegración, combinando la precisión en dos leptones con el estudio de modos hadrónicos. Canal dominante a masas altas.
- Ya en el Run-1 se acompañaron los estudios del bosón 125 GeV con búsquedas de nuevos escalares en el sector. Está solo el H125?
- Dos PhD:
 - **Daniel Domínguez Vázquez (2014)**, dirigido por O. González, MC Fouz
 - **Eduardo Navarro de Martino (2015)**, dirigido por P. García, JM Hernández

JHEP 04 (2012) 036 (7 TeV)

EPJC 73 (2013) 2469 (WW+ZZ, 8 TeV)

JHEP 10 (2015) 144 (WW+ZZ, 8 TeV)



Daniel Domínguez Vázquez , Eduardo Navarro De Martino , Óscar González López, Pablo García, José María Hernández, Dermot Moran, Jorge Fernández de Troconiz

H → WW: UNO DE LOS GRANDES MOTORES DE LA FÍSICA DEL HIGGS

ALTA RAZÓN DE DESINTEGRACIÓN, COMPLICADO ESTADO FINAL, ENORME ALCANCE FÍSICO

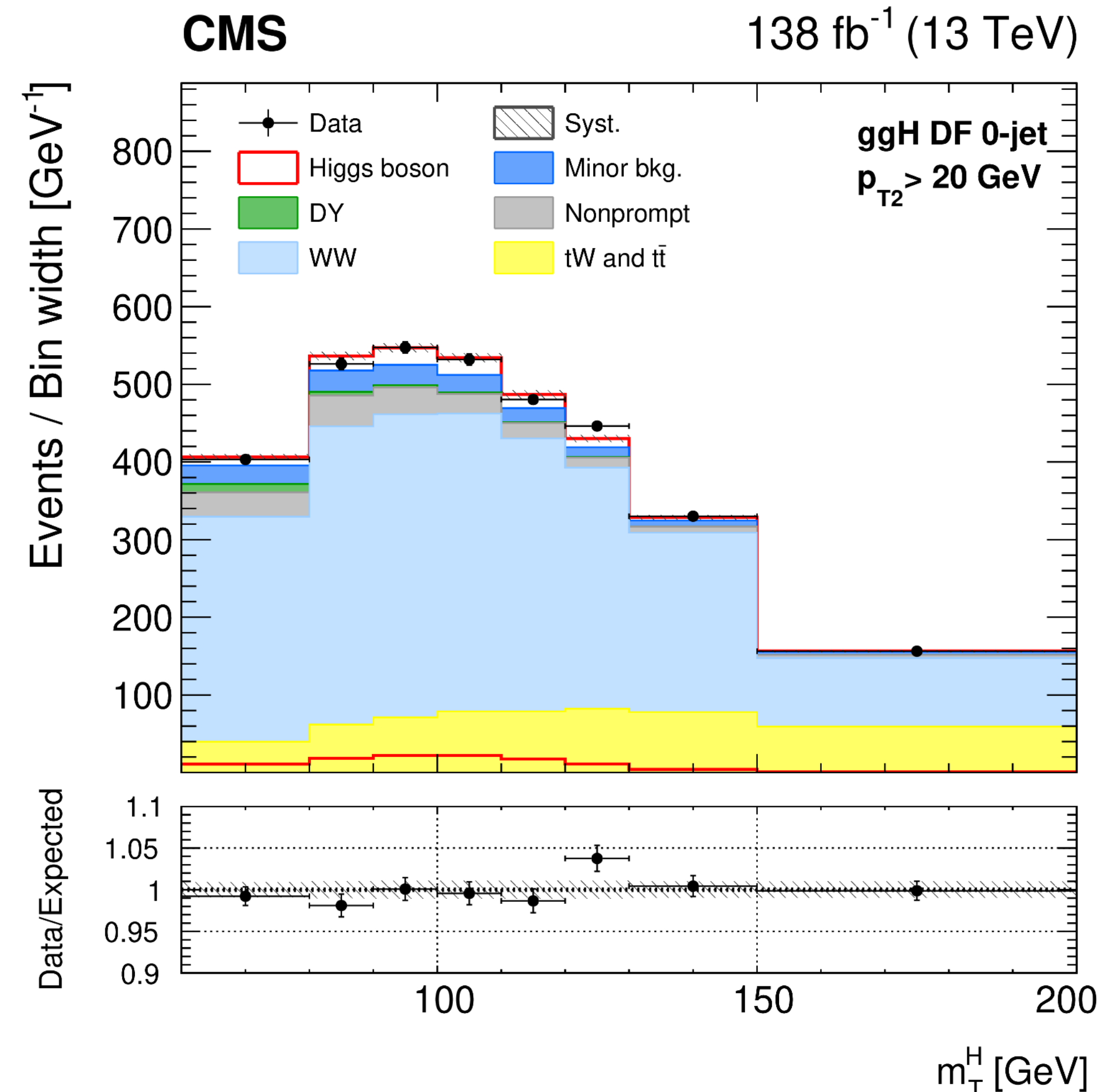
- La presencia de neutrinos en el estado final complica la reconstrucción de HWW. Las medidas requieren control de la reconstrucción de leptones y de los fondos, apoyados lo más posible en métodos basados en los datos.
- Evolución desde un canal de descubrimiento hasta un laboratorio de precision, capaz de estudiar estados finales con precision (eg VBF), medir acopios y secciones eficaces (inclusivas y diferenciales).
- También muy importante para búsquedas de nuevos estados en los ‘Extended Higgs Sectors’
- PhD thesis: **Adrián Álvarez Fernández (2021):** Estudios de Muones + Secciones eficaces (inclusivas y diferenciales), dirigida by I. Josa

EPJC 83 (2023) 667 (Full Run2, STXS and couplings)

JHEP 03 (2021) 003 (Differential XS)

PLB 791 (2019) 96 (2016 data)

JHEP 03 (2020) 034 (High Mass Search)



Adrián Álvarez Fernández, Isabel Josa,
Dermot Moran, Lourdes Urda

Dirección del grupo HWW por Dermot

H → WW: UNO DE LOS GRANDES MOTORES DE LA FÍSICA DEL HIGGS

ALTA RAZÓN DE DESINTEGRACIÓN, COMPLICADO ESTADO FINAL, ENORME ALCANCE FÍSICO

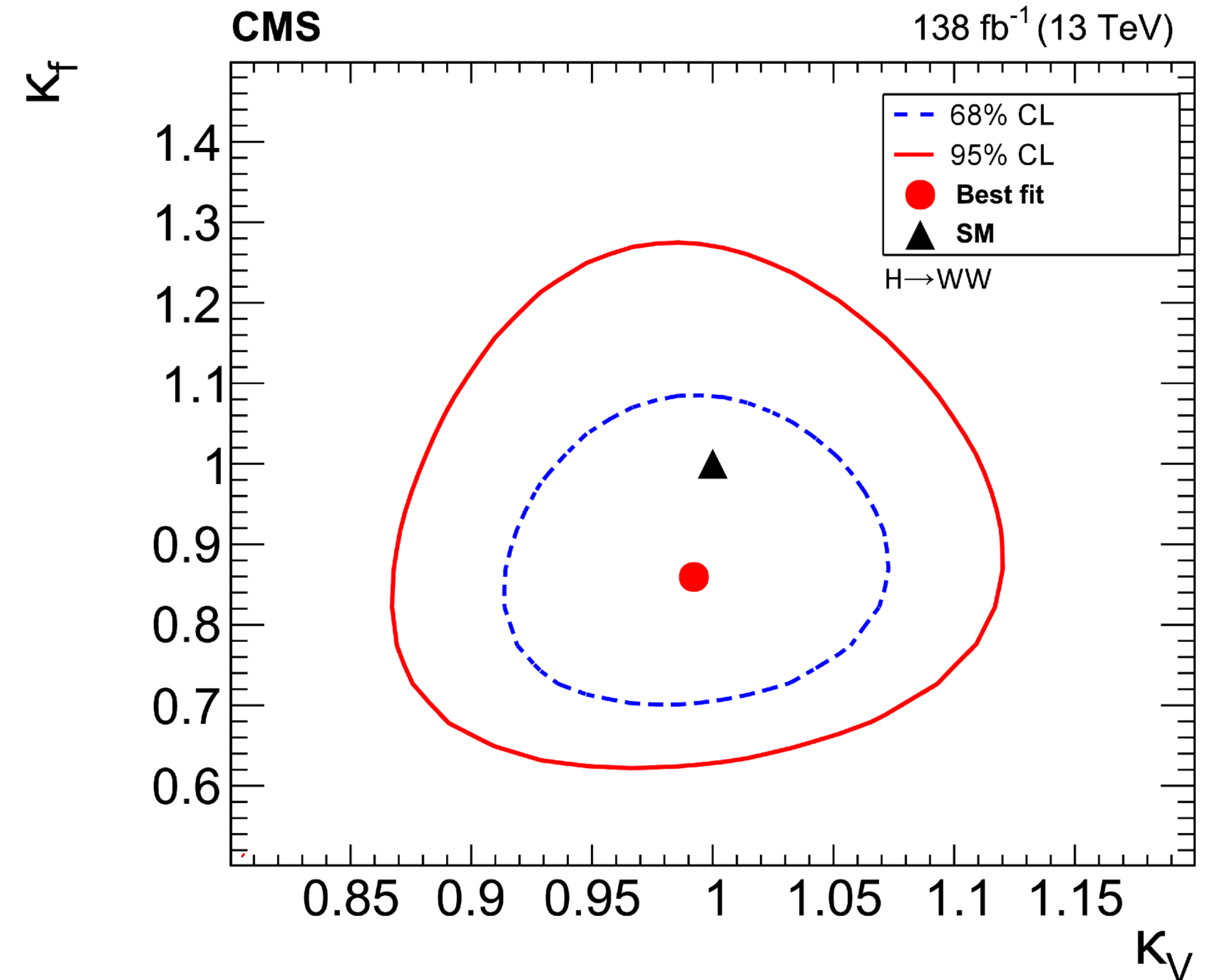
- La presencia de neutrinos en el estado final complica la reconstrucción de HWW. Las medidas requieren control de la reconstrucción de leptones y de los fondos, apoyados lo más posible en métodos basados en los datos.
- Evolución desde un canal de descubrimiento hasta un laboratorio de precision, capaz de estudiar estados finales con precision (eg VBF), medir acopios y secciones eficaces (inclusivas y diferenciales).
- También muy importante para búsquedas de nuevos estados en los ‘Extended Higgs Sectors’
- PhD thesis: **Adrián Álvarez Fernández (2021):** Estudios de Muones + Secciones eficaces (inclusivas y diferenciales), dirigida by I. Josa

EPJC 83 (2023) 667 (Full Run2, STXS and couplings)

JHEP 03 (2021) 003 (Differential XS)

PLB 791 (2019) 96 (2016 data)

JHEP 03 (2020) 034 (High Mass Search)



Adrián Álvarez Fernández, Isabel Josa,
Dermot Moran, Lourdes Urda

Dirección del grupo HWW por Dermot

H → WW: UNO DE LOS GRANDES MOTORES DE LA FÍSICA DEL HIGGS

ALTA RAZÓN DE DESINTEGRACIÓN, COMPLICADO ESTADO FINAL, ENORME ALCANCE FÍSICO

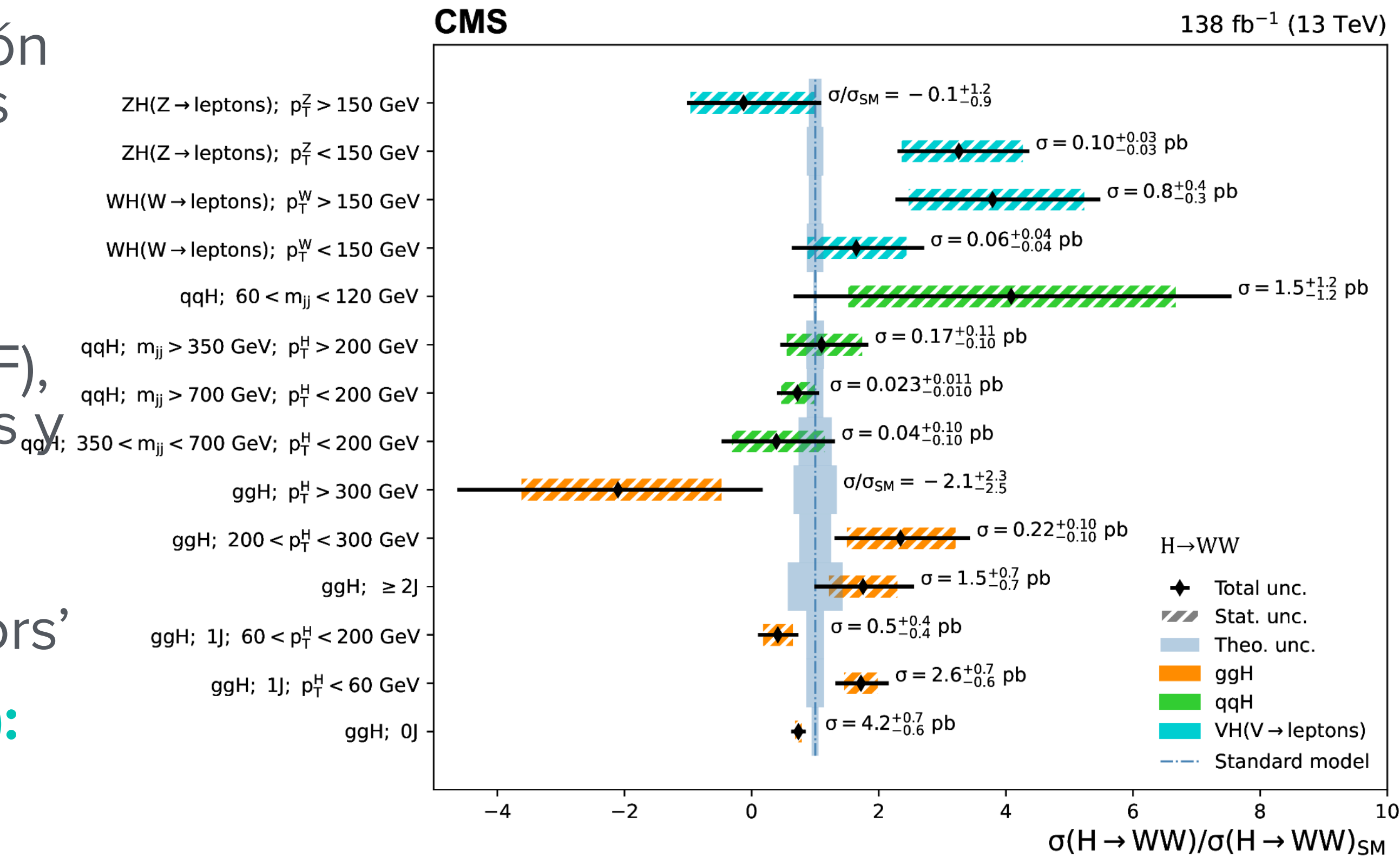
- La presencia de neutrinos en el estado final complica la reconstrucción de HWW. Las medidas requieren control de la reconstrucción de leptones y de los fondos, apoyados lo más posible en métodos basados en los datos.
- Evolución desde un canal de descubrimiento hasta un laboratorio de precision, capaz de estudiar estados finales con precision (eg VBF), medir acopios y secciones eficaces (inclusivas y diferenciales).
- También muy importante para búsquedas de nuevos estados en los ‘Extended Higgs Sectors’
- PhD thesis: **Adrián Álvarez Fernández (2021):** Estudios de Muones + Secciones eficaces (inclusivas y diferenciales), dirigida by I. Josa

EPJC 83 (2023) 667 (Full Run2, STXS and couplings)

JHEP 03 (2021) 003 (Differential XS)

PLB 791 (2019) 96 (2016 data)

JHEP 03 (2020) 034 (High Mass Search)



Adrián Álvarez Fernández, Isabel Josa,
Dermot Moran, Lourdes Urda

Dirección del grupo HWW por Dermot

H → WW: UNO DE LOS GRANDES MOTORES DE LA FÍSICA DEL HIGGS

ALTA RAZÓN DE DESINTEGRACIÓN, COMPLICADO ESTADO FINAL, ENORME ALCANCE FÍSICO

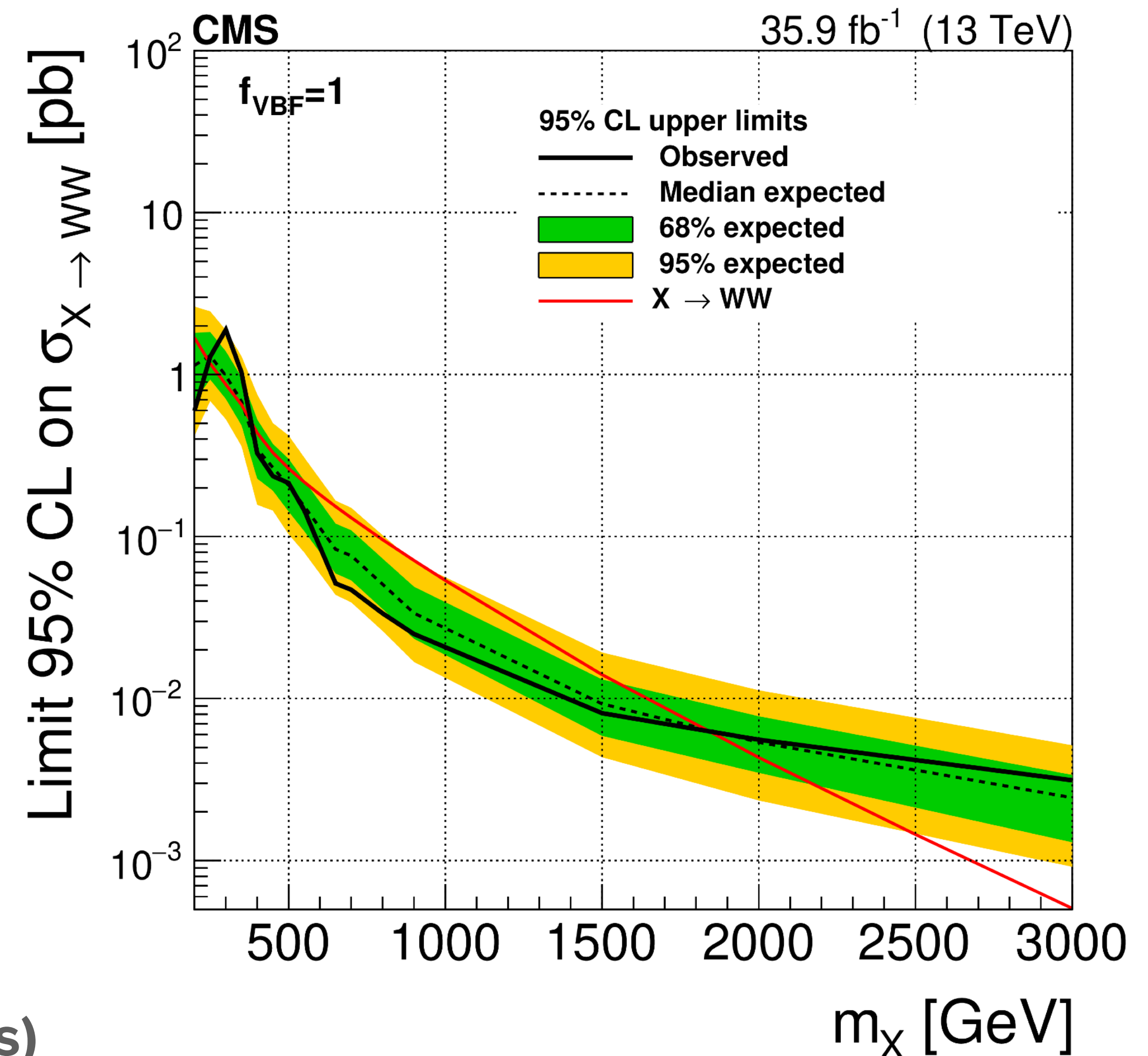
- La presencia de neutrinos en el estado final complica la reconstrucción de HWW. Las medidas requieren control de la reconstrucción de leptones y de los fondos, apoyados lo más posible en métodos basados en los datos.
- Evolución desde un canal de descubrimiento hasta un laboratorio de precision, capaz de estudiar estados finales con precision (eg VBF), medir acopios y secciones eficaces (inclusivas y diferenciales).
- También muy importante para búsquedas de nuevos estados en los ‘Extended Higgs Sectors’
- PhD thesis: **Adrián Álvarez Fernández (2021):** Estudios de Muones + Secciones eficaces (inclusivas y diferenciales), dirigida by I. Josa

EPJC 83 (2023) 667 (Full Run2, STXS and couplings)

JHEP 03 (2021) 003 (Differential XS)

PLB 791 (2019) 96 (2016 data)

JHEP 03 (2020) 034 (High Mass Search)



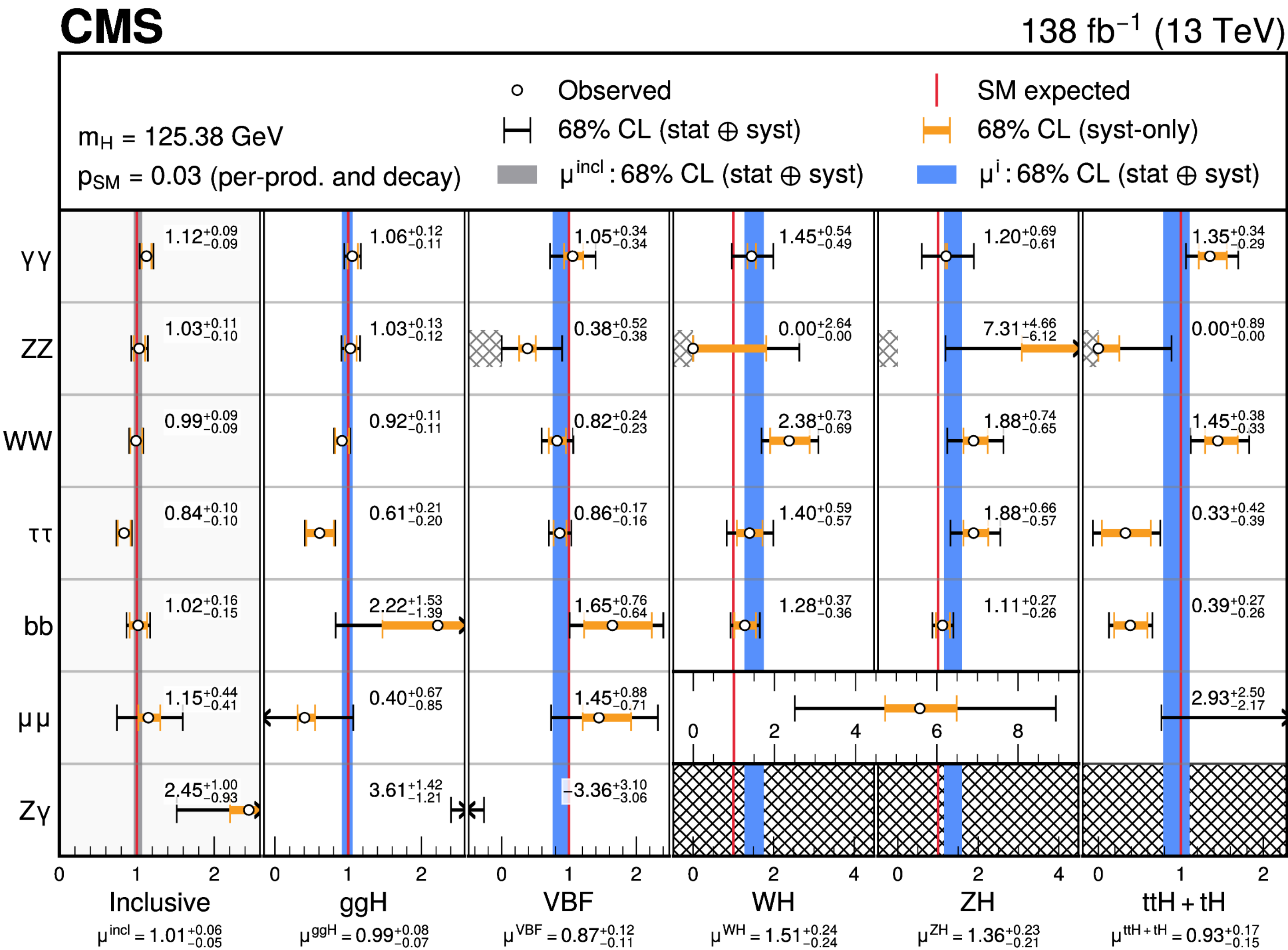
Adrián Álvarez Fernández, Isabel Josa,
Dermot Moran, Lourdes Urda

Dirección del grupo HWW por Dermot

RUN1 → RUN3: DESDE EL DESCUBRIMIENTO HASTA UN GRAN PROGRAMA DE MEDIDAS

ESTUDIANDO CON PRECISIÓN LA PRODUCCIÓN Y LA DESINTEGRACIÓN DEL HIGGS

- Rápidamente se estableció la identidad básica de la nueva particular (masa, spin-paridad) y se produjeron las primeras medidas de producción y acoplamientos.
- Con más datos, incluidos los del Run 2, establecimos el acoplamiento a la tercera generación de fermiones de forma independiente.
- Con los grandes datasets actuales, podemos explorar modos de producción y desintegración cada vez más difíciles



TODO MUY MODELO ESTÁNDAR... DE MOMENTO

Lo que sabemos:

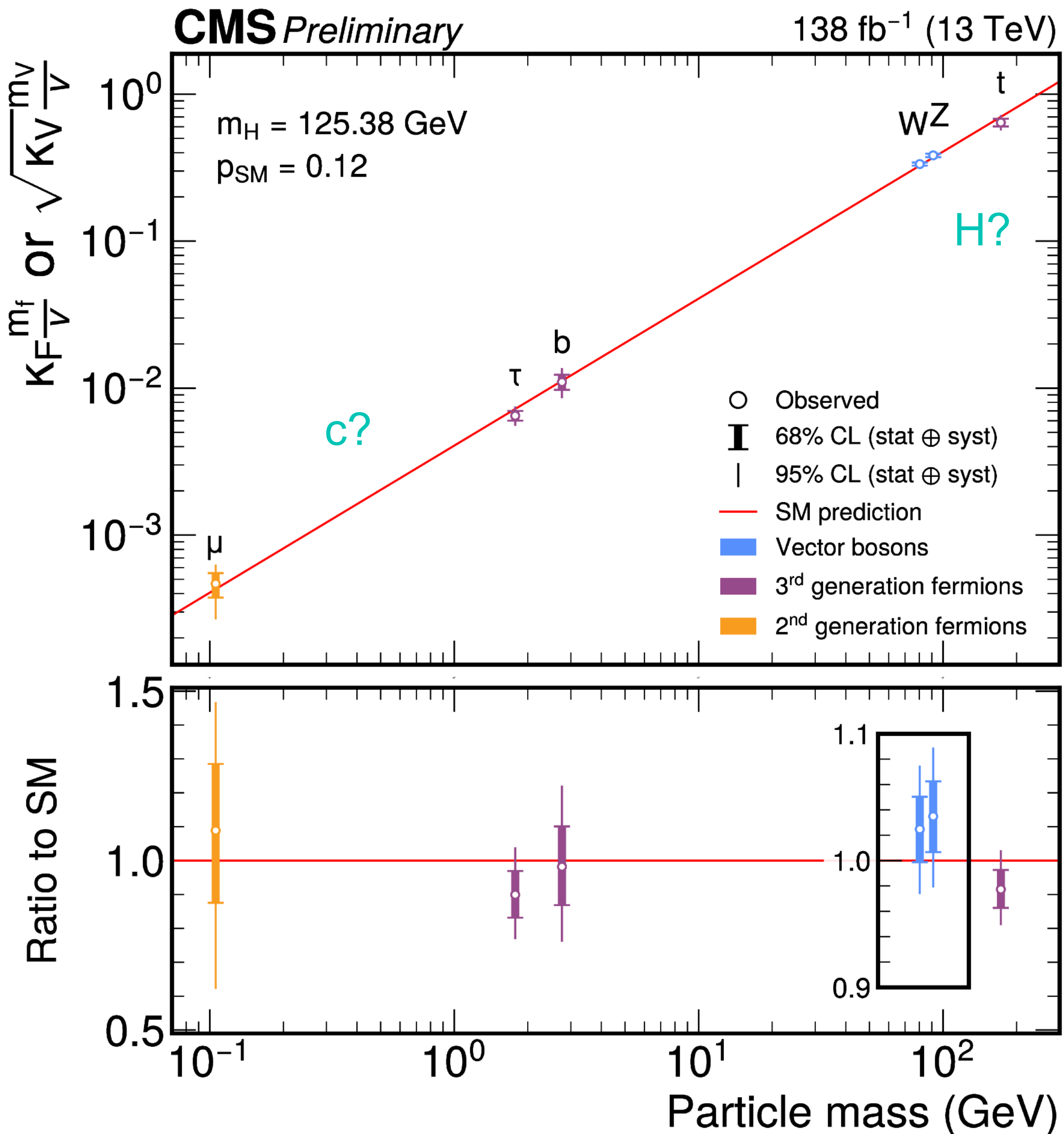
Hasta ahora, los acoplamientos y propiedades del Higgs que hemos medido son sorprendentemente compatibles con el Modelo Estándar.

Lo que no sabemos:

¡Muchísimo! Segunda generación, autoacoplamiento, modos de producción raros, desintegraciones exóticas, un mapa preciso de sus propiedades e interacciones...

Y ahora, ¿hacia dónde vamos?

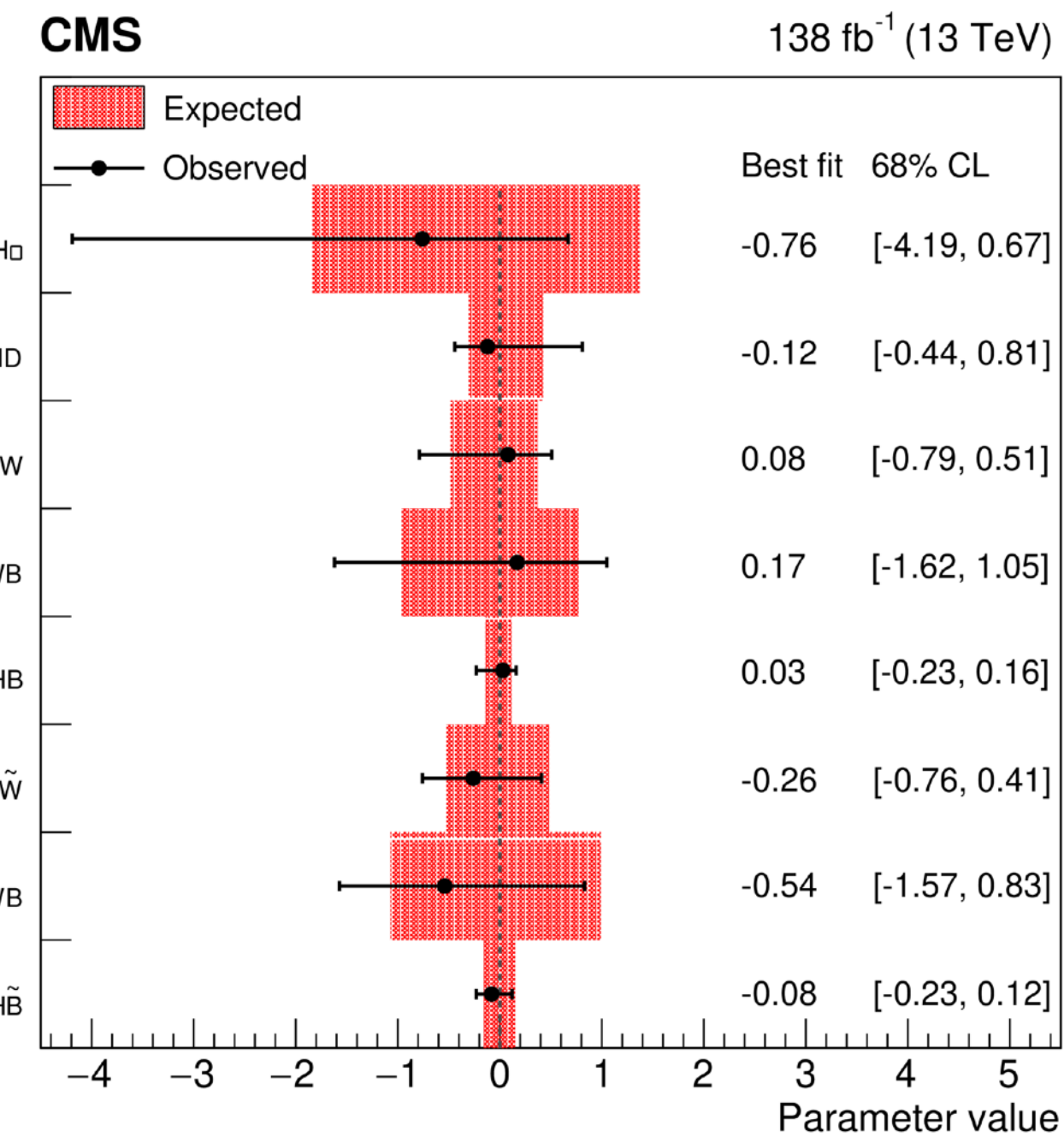
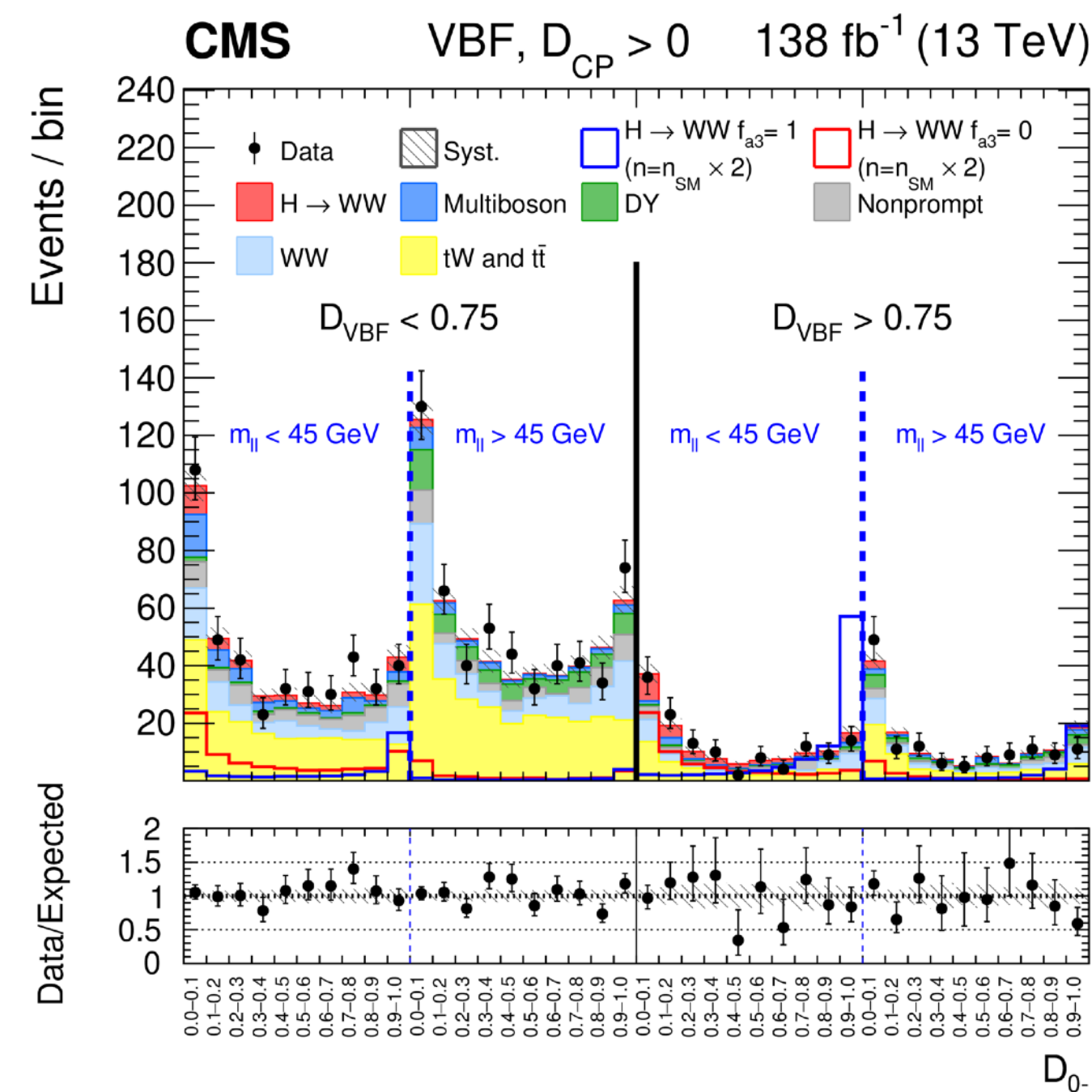
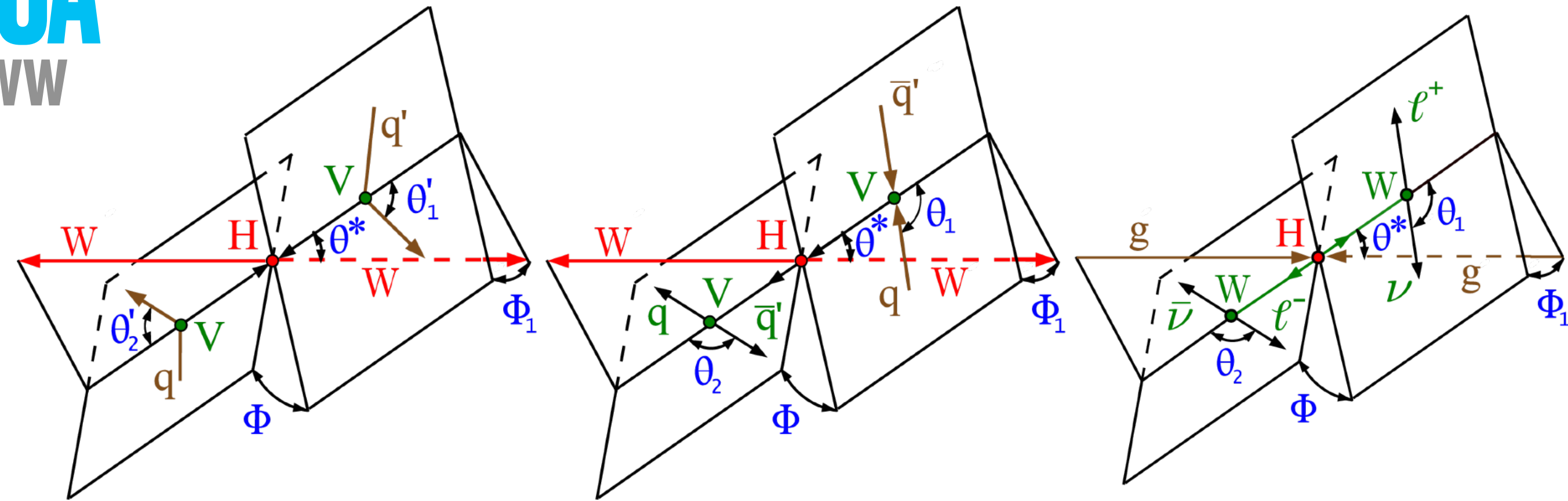
Aprovechar la mayor estadística: precisión + señales raras + nuevas regiones del espacio de fases.



DE LA PRECISIÓN A LA NUEVA FÍSICA

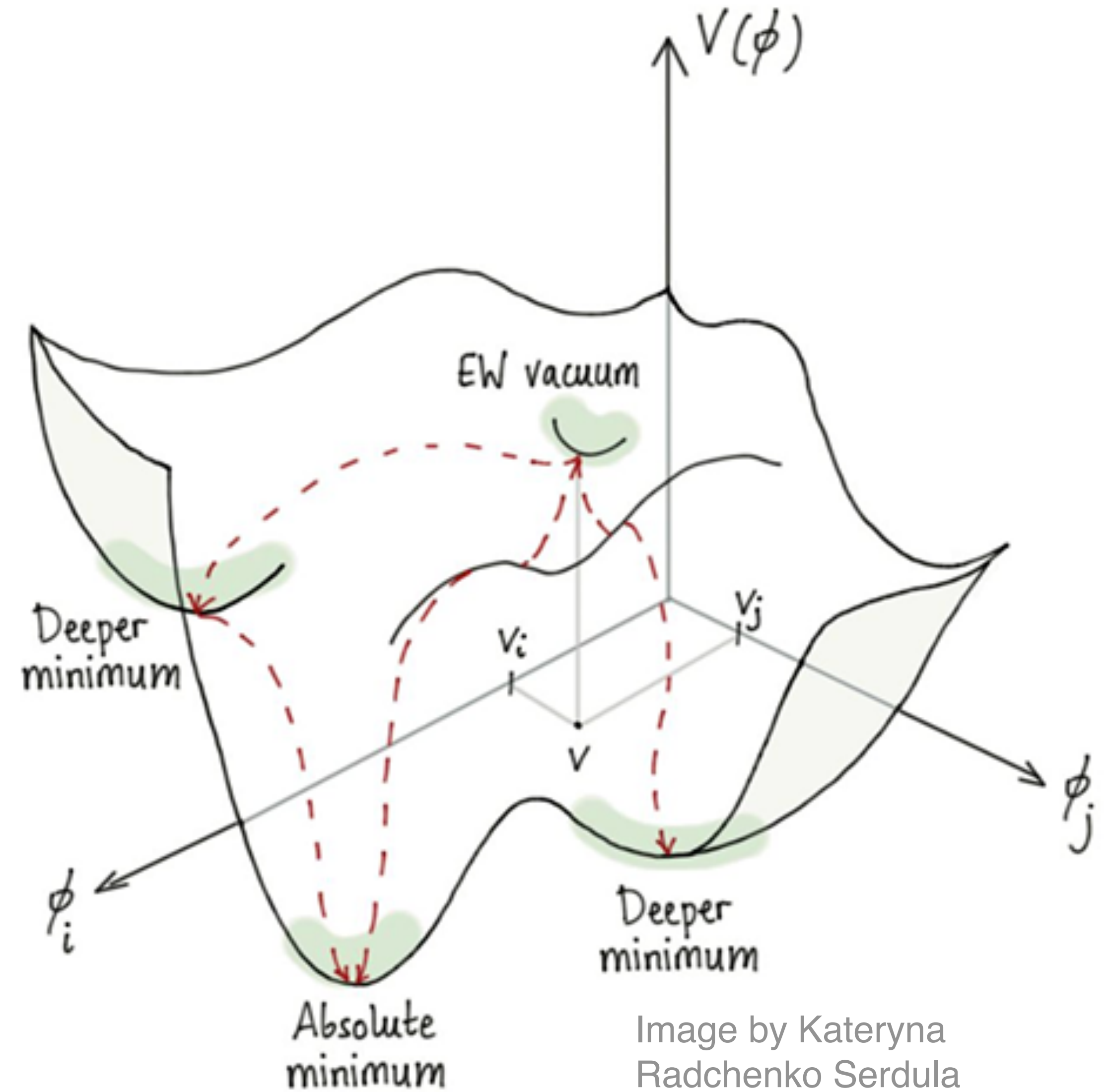
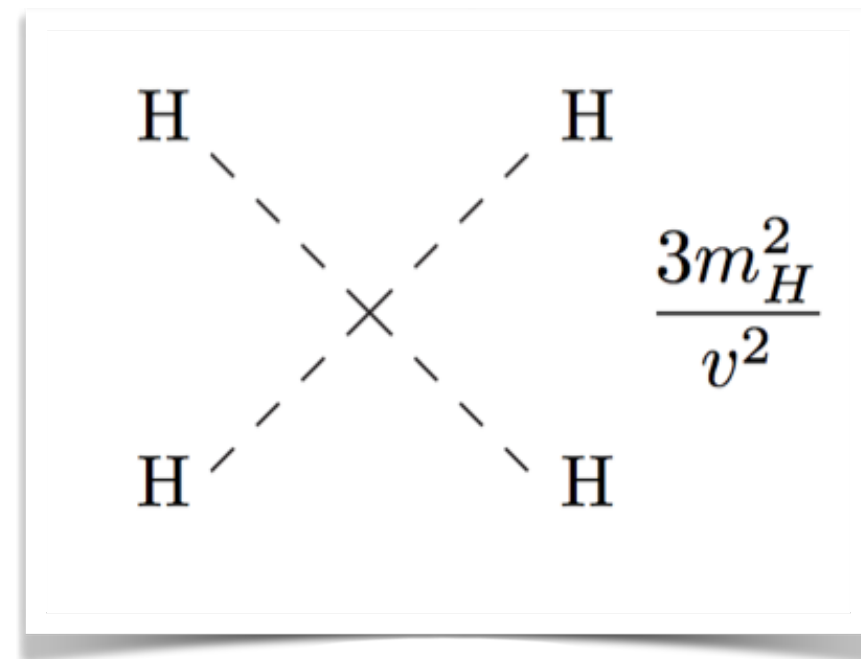
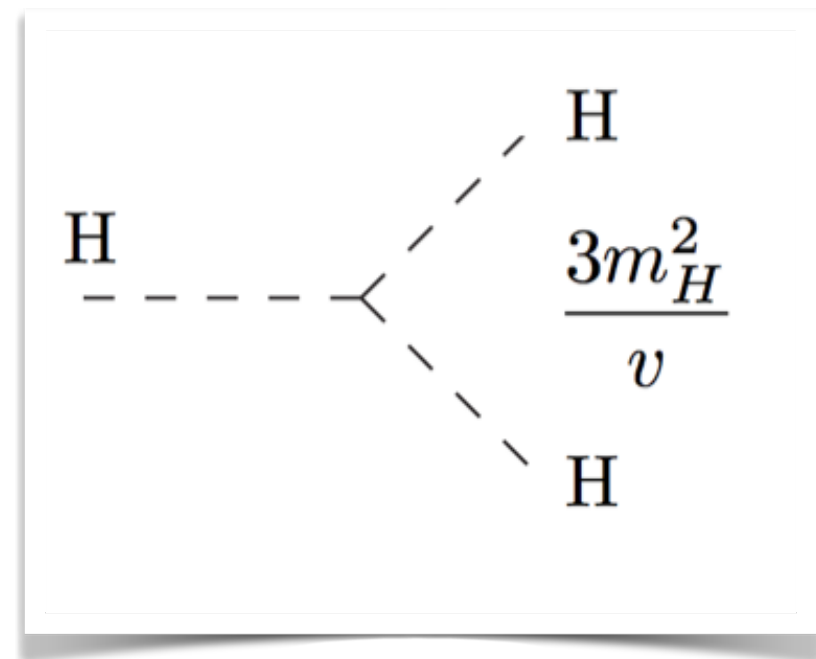
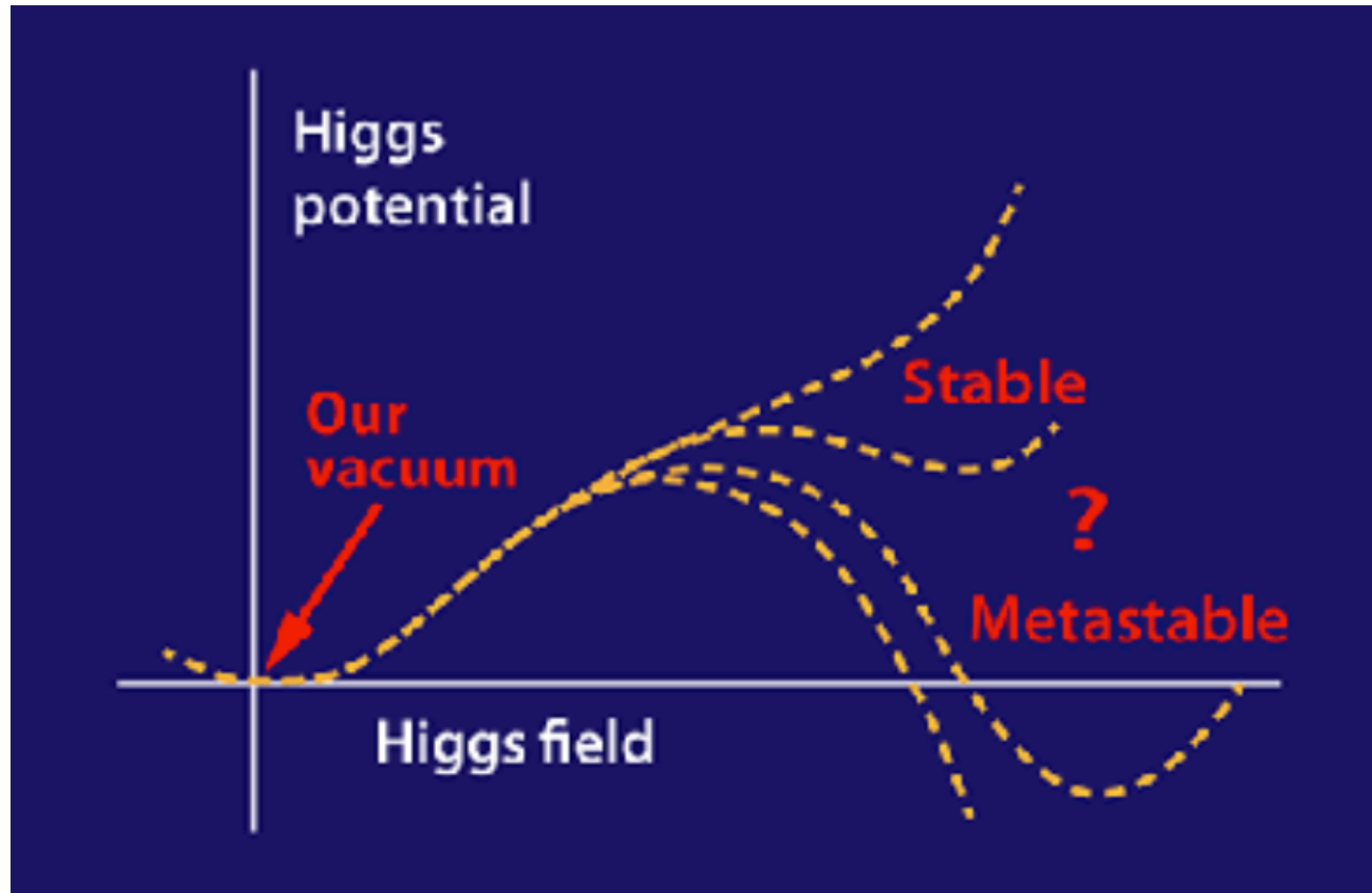
TEORÍAS EFECTIVAS Y ACOPLAMIENTOS ANÓMALOS EN HWW

- La nueva física no tiene por qué aparecer como una nueva partícula: puede manifestarse primero como una **desviación en las interacciones del Higgs**.
- $H \rightarrow WW$ permite explorar la estructura tensorial de los vértices Hgg y HVV , buscando efectos anómalos - incluyendo violación de CP-, utilizando la información cinemática tanto de la producción como de la desintegración.
- La frontera entre “medida de precisión” y “búsqueda de nueva física” es cada vez más difusa.
- PhD thesis:
 - Lourdes M^a Urda Gómez (2023)**, Run2, dirigida por Dermot Moran, María Cepeda
 - Carlos García Sánchez** (Run3, en proceso), dirigida by Dermot Moran



Carlos García Sánchez, Dermot Moran, Lourdes M^a Urda Gómez

DESCIFRANDO EL POTENCIAL DE HIGGS



Cartografiar el potencial del Higgs es una de las piezas clave que aún nos faltan por medir, una que además conecta la física de partículas con la escala cosmológica.

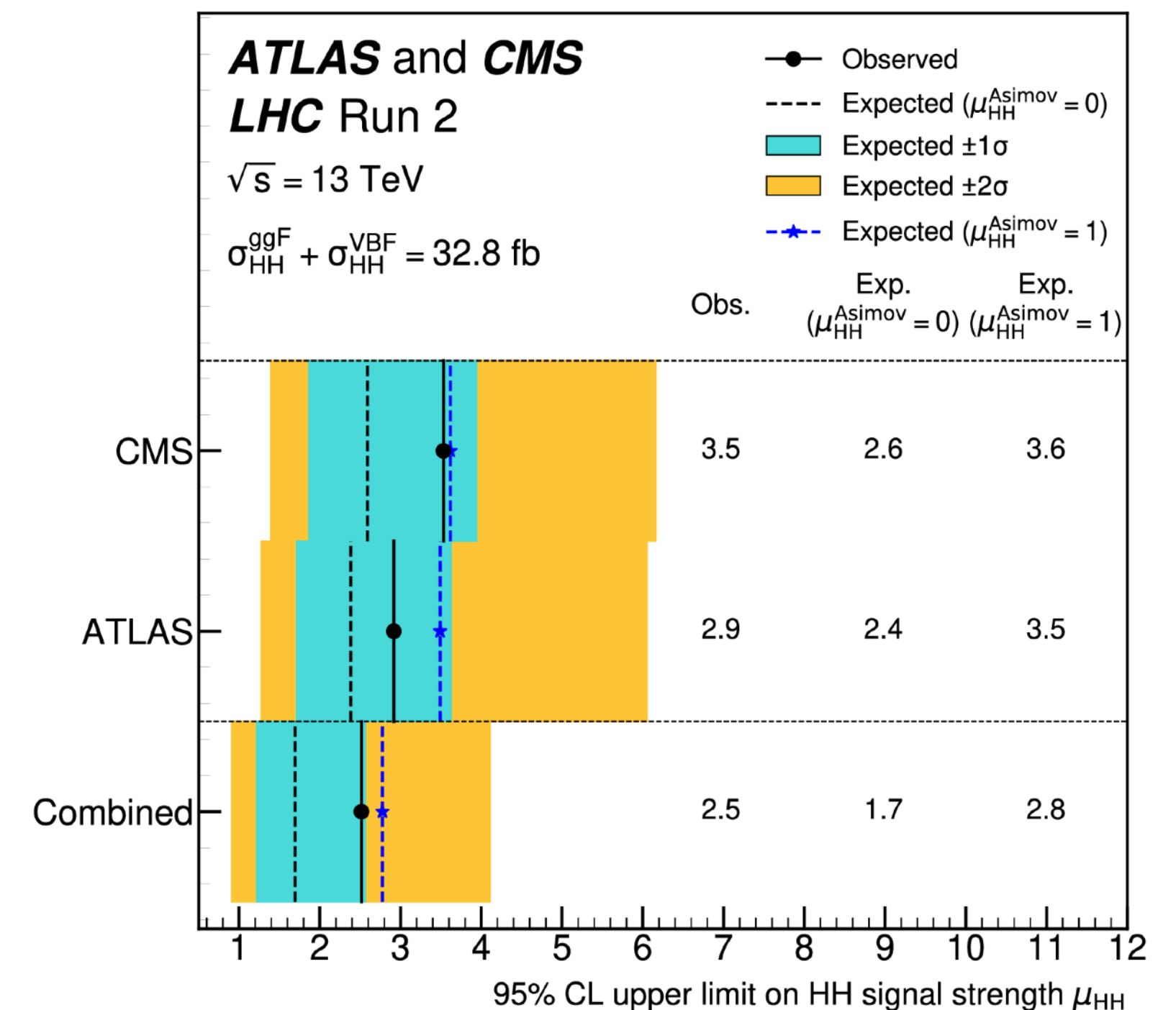
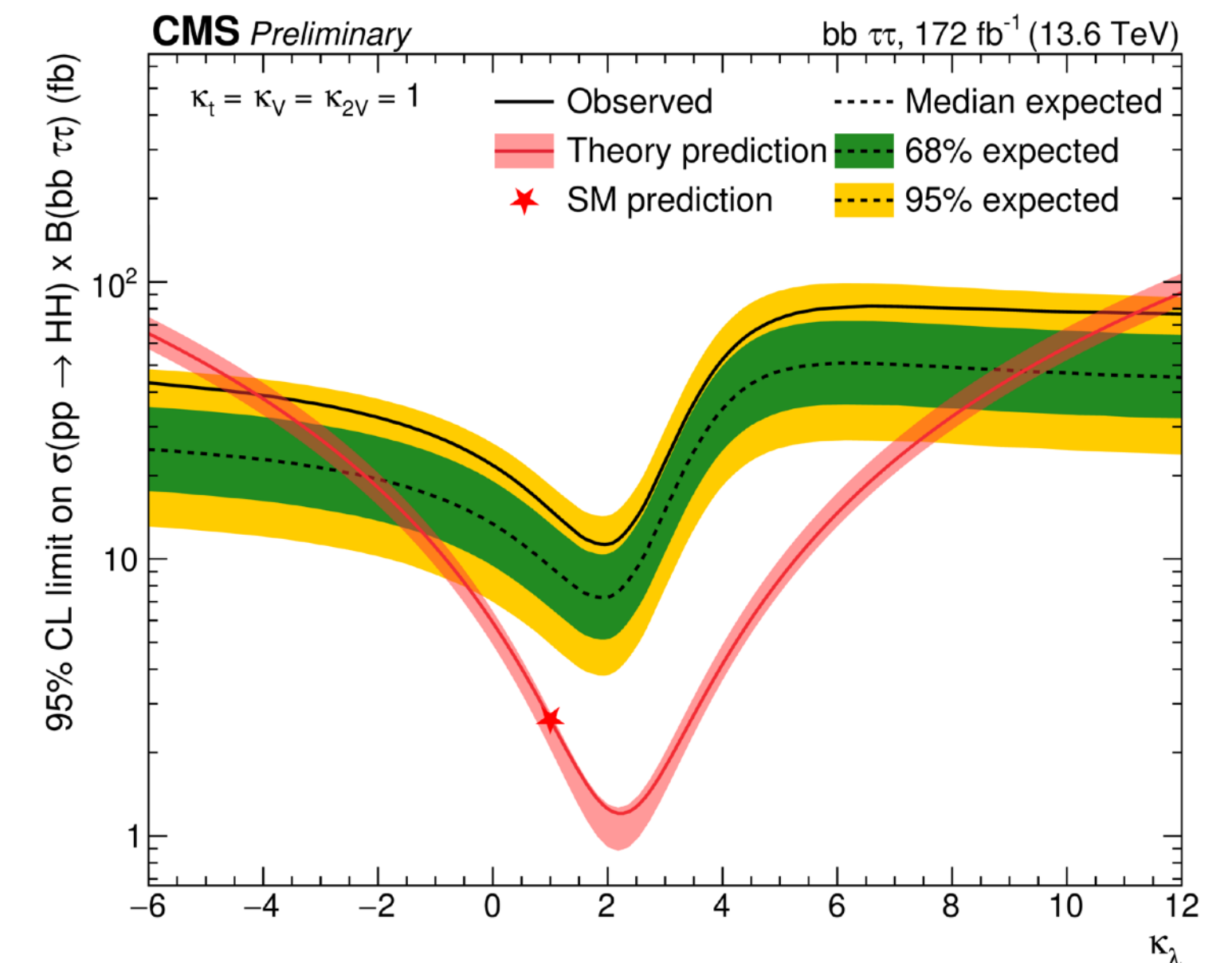
BUSCANDO PARES DE HIGGSSES

INTERACTÚA EL HIGGS CONSIGO MISMO?

- La producción de pares de Higgs, HH, es la vía más directa para medir el autoacoplamiento en el LHC. Pero que sea la más directa no significa que sea fácil: la sección eficaz del SM es diminuta.
 - Esa dificultad es también una oportunidad: pequeñas variaciones en λ_{HHH} o en otros acoplamientos pueden producir cambios importantes en la producción de HH. Conexión con BSM.
- **bb $\tau\tau$** es uno de los canales clave, equilibrio entre branching fraction y dificultad experimental. Posición clave de cara al futuro.
 - Acompañado de estudios de reconstrucción de taus! (Tau POG)
- PhD thesis:
 - Run 2, foco en VBF: **Jaime León Holgado (2021)**, Silvia Goy.
 - Primer estudio de Run 3, ampliando a HEFT : **Elvira Martín Viscasillas** (en proceso de escritura!), S. Goy+M. Cepeda.
 - Legado Run 2 + Run 3: **David Blanco Díez**, en proceso!

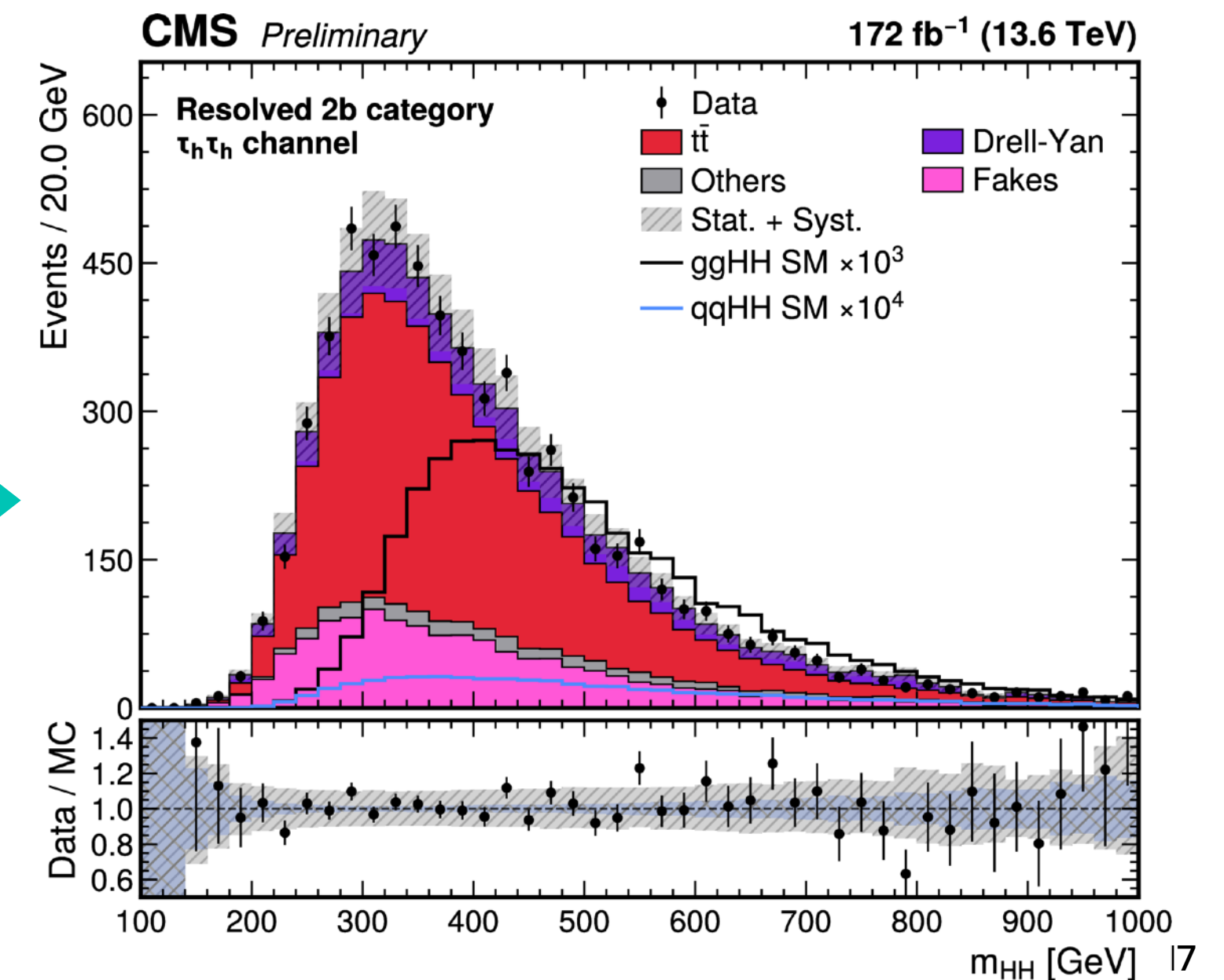
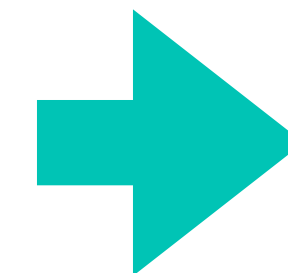
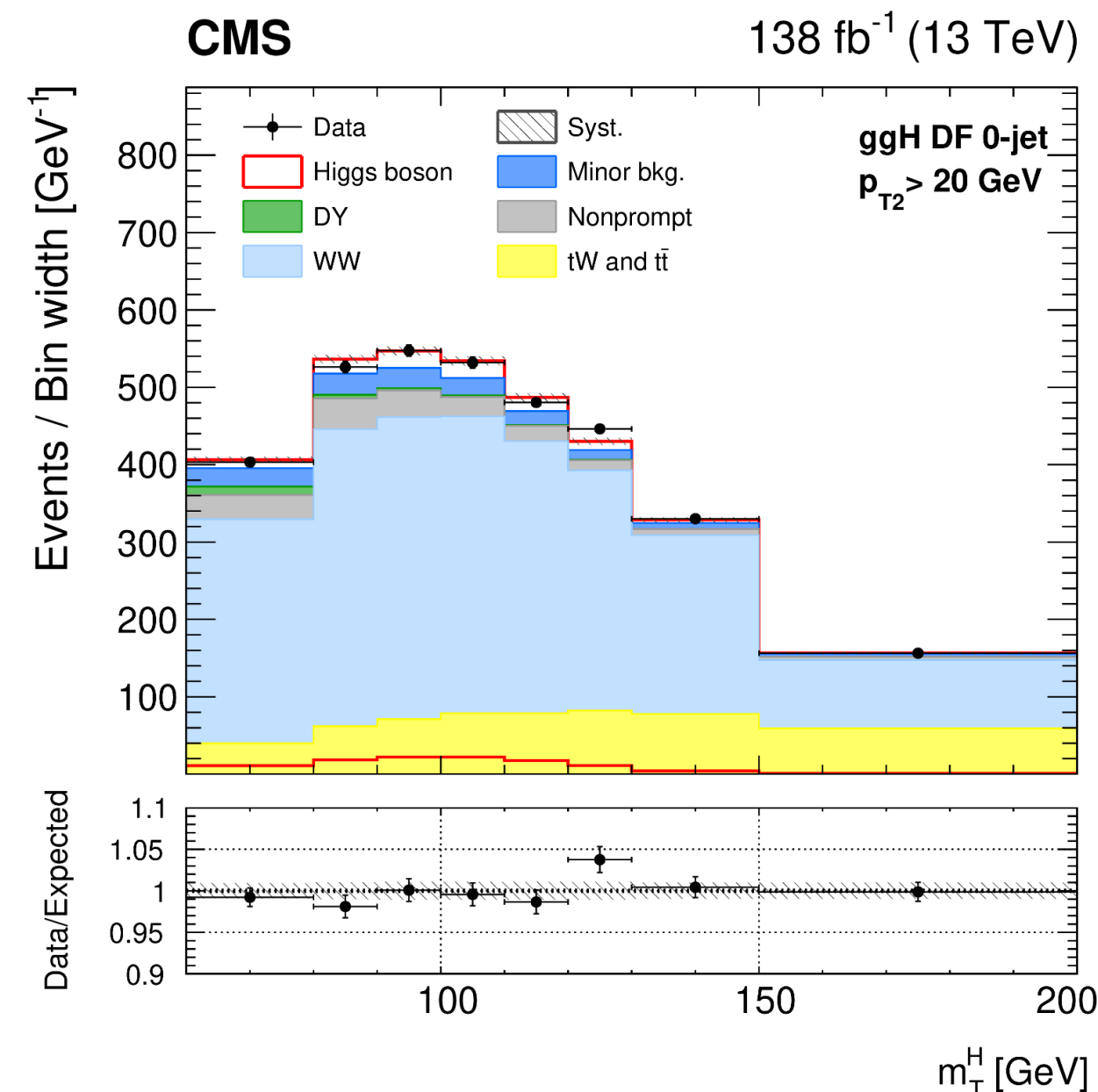
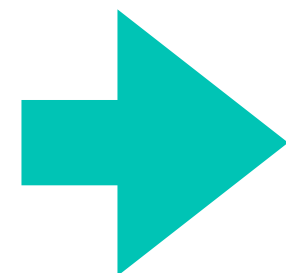
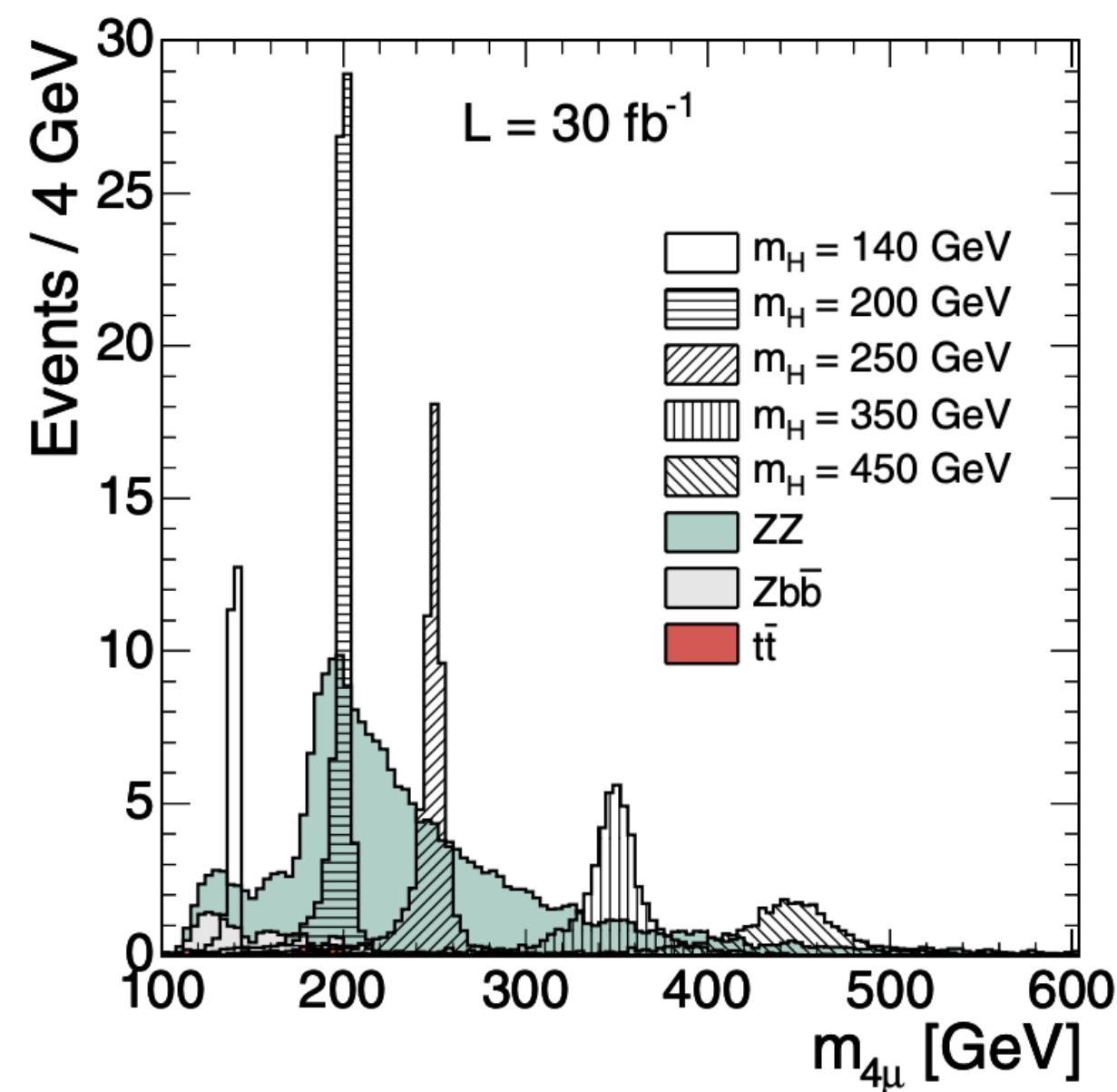
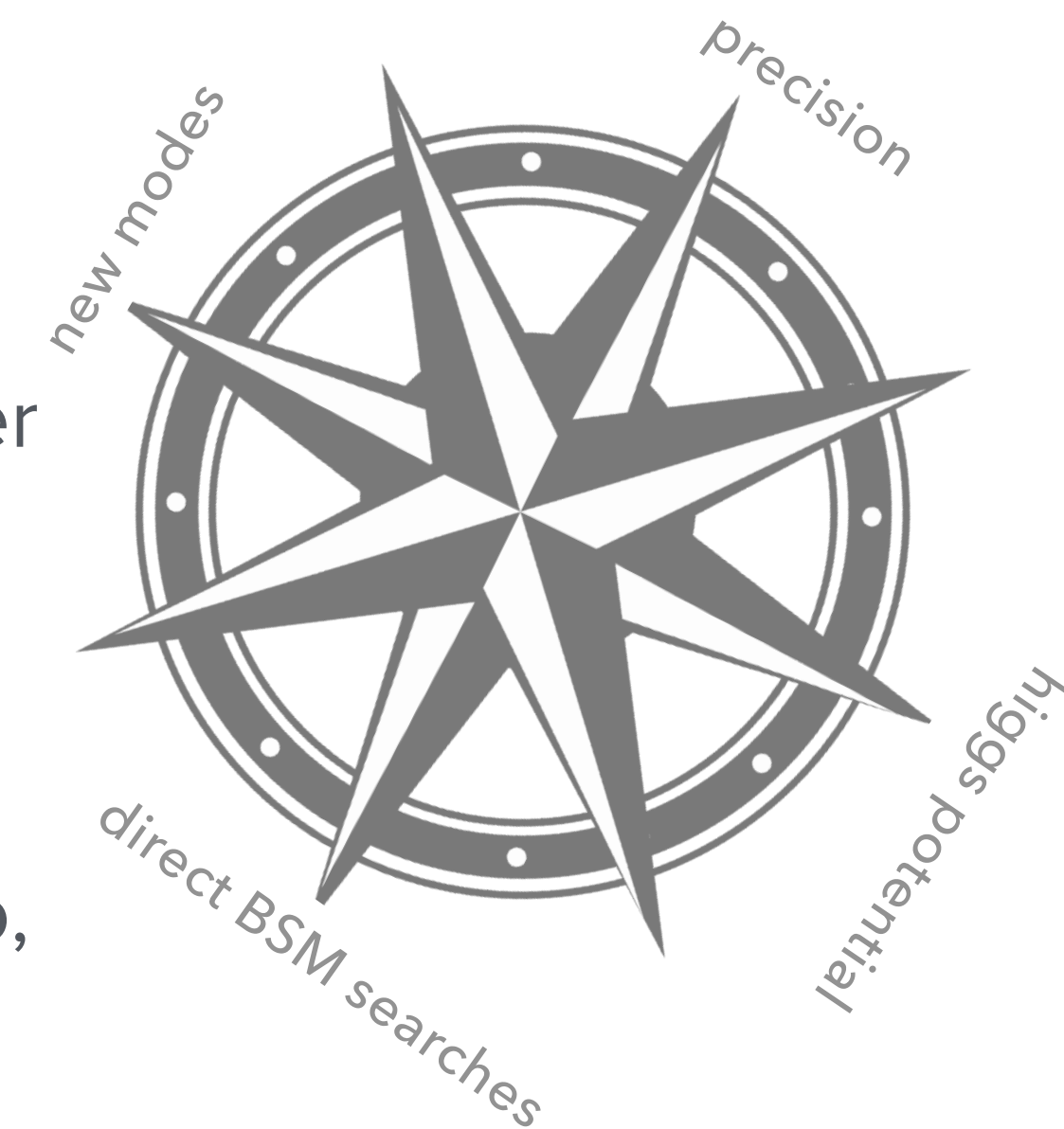
PLB 842 (2023) 137531.
CMS-PAS-HIG-25-008
JPG 53 (2026) 095001
CMS+ATLAS HIG-25-014

David Blanco, María Cepeda, Silvia Goy,
Cristina Martín, Jaime León, Alvaro
López, Elvira Martín, Eva Sanchez



LA HIGGSTORIA CONTINUA

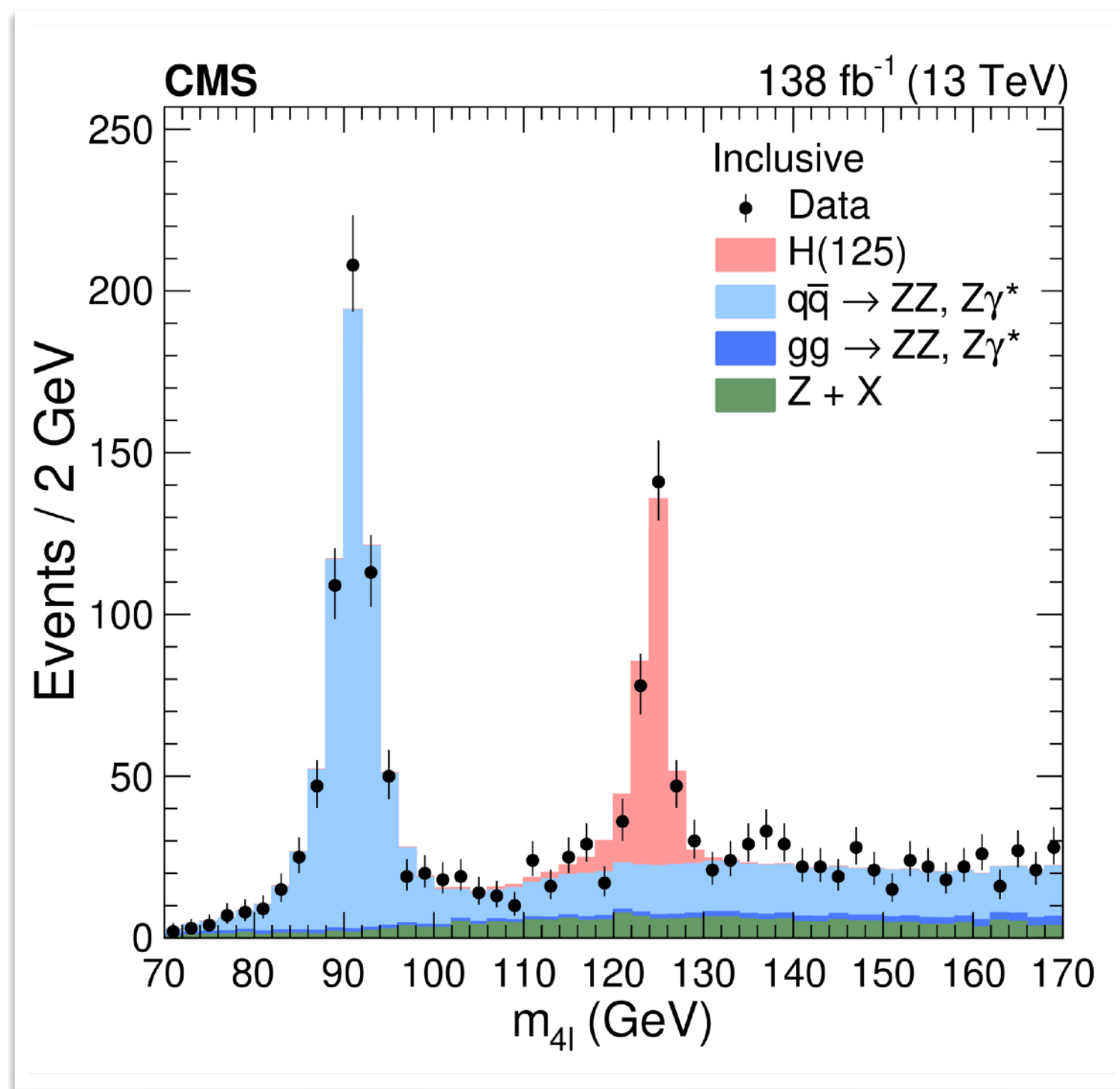
- Del descubrimiento a la precisión... y de la precisión a la nueva física.
- El Higgs es hoy una de nuestras herramientas más potentes para explorar lo que puede haber más allá del Modelo Estándar.
 - CMS ha demostrado ser una máquina extraordinaria, superando muchas de las expectativas sobre hasta dónde podríamos llegar en la medida del Higgs y desafiando continuamente la frontera de lo que parecía “imposible”.
- CIEMAT ha formado parte de esta historia desde el principio: desde antes del descubrimiento, pasando por las primeras medidas y la física de precisión, hasta búsquedas de nueva física con y a través del Higgs.
- Y queda mucho por delante: las preguntas más interesantes siguen abiertas, y continuaremos explorando esta frontera con los datos de Run 3 y de las futuras etapas del LHC.



WHAT KIND OF PARTICLE IS THE HIGGS?

Mass

Free in the SM, now known to 0.1%
 $(H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l \text{ and } H \rightarrow \gamma\gamma)$

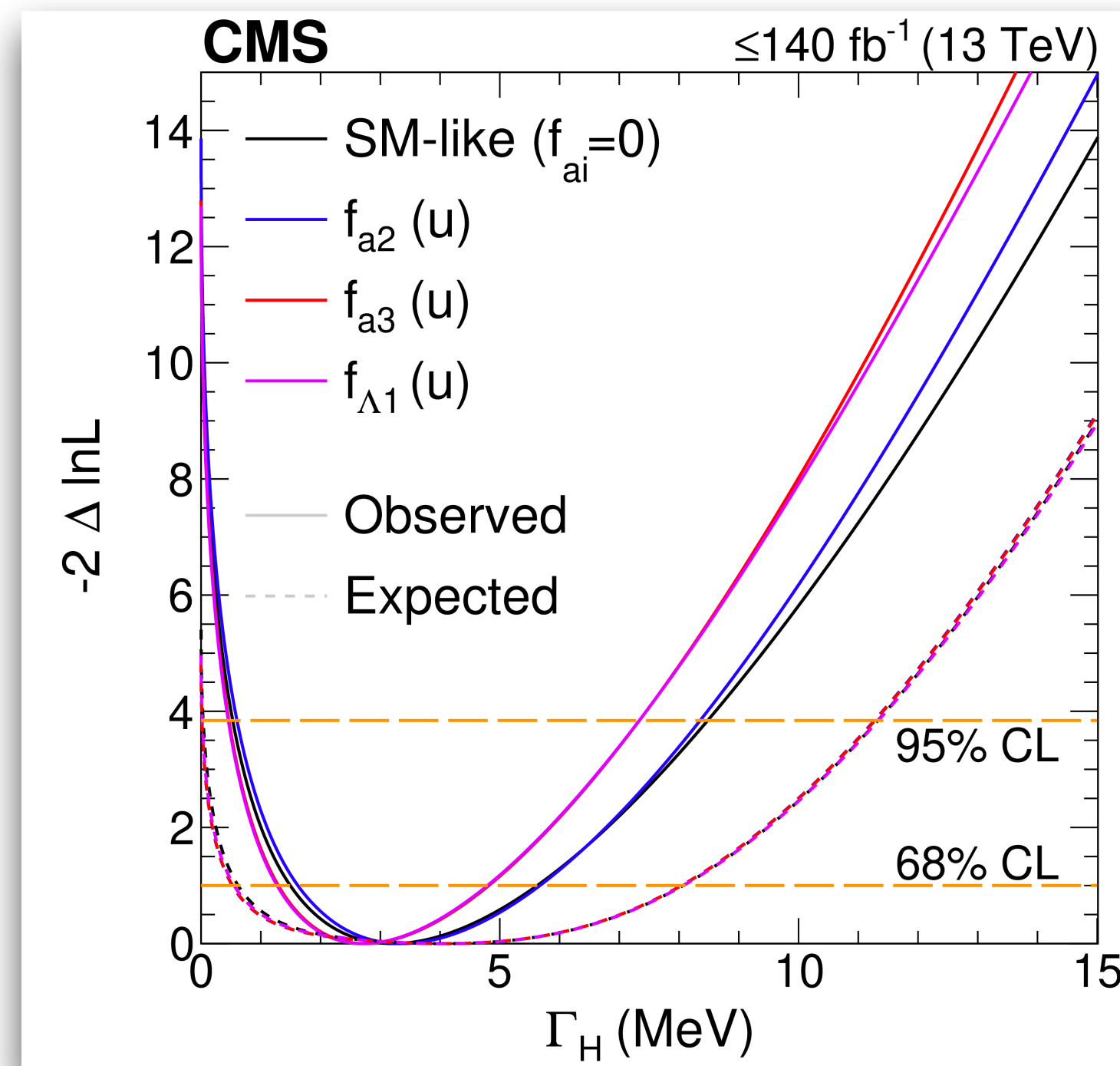


$$m(4l) = 125.08 \pm 0.12 \text{ GeV}$$

$$m(\gamma\gamma) = 125.06 \pm 0.14 \text{ GeV}$$

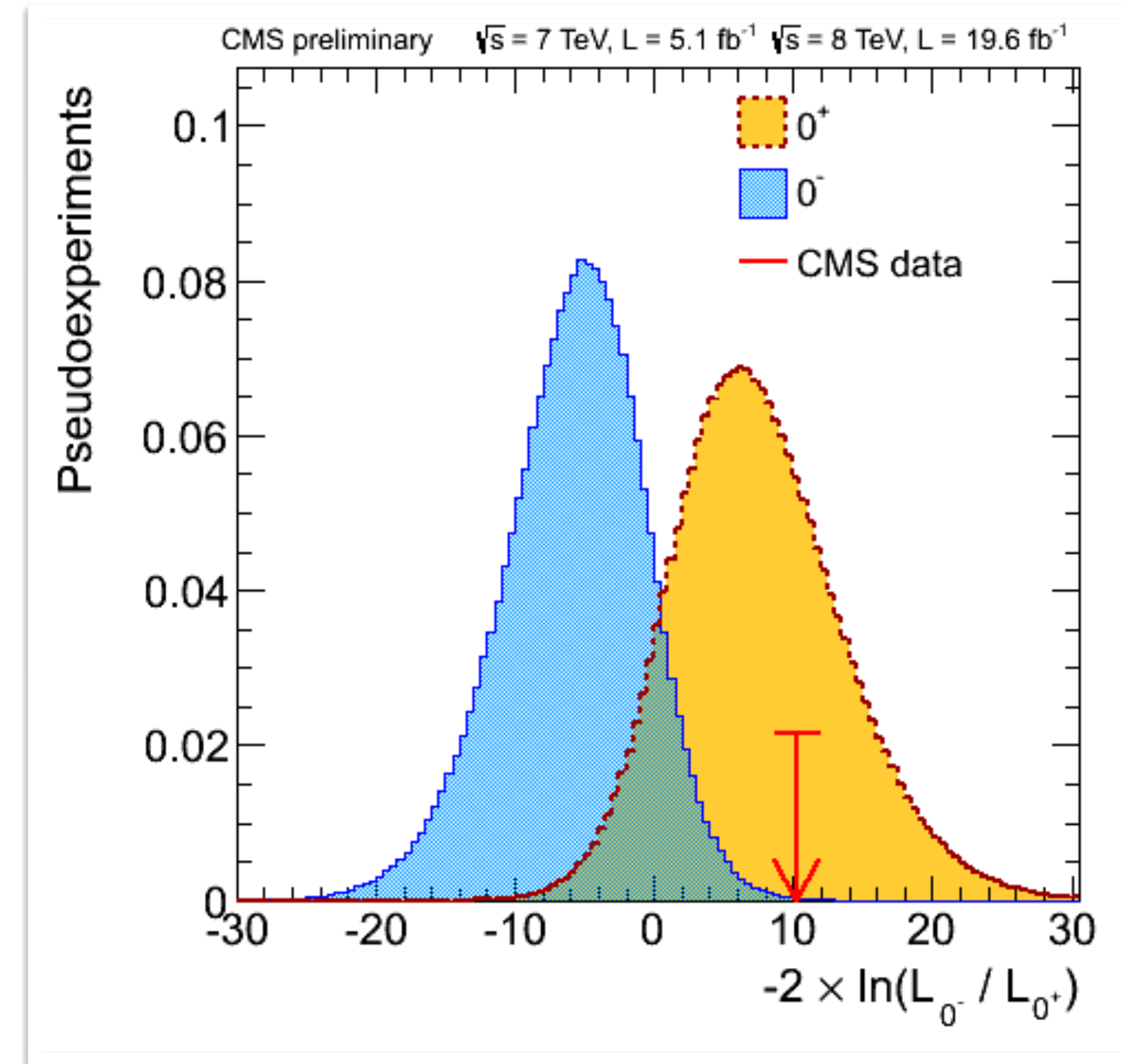
Total Width

Very small in SM! (4 MeV)
 Direct measurement: $<1.1 \text{ GeV}$ (95%CL)
 Offshell/onshell $H \rightarrow ZZ$



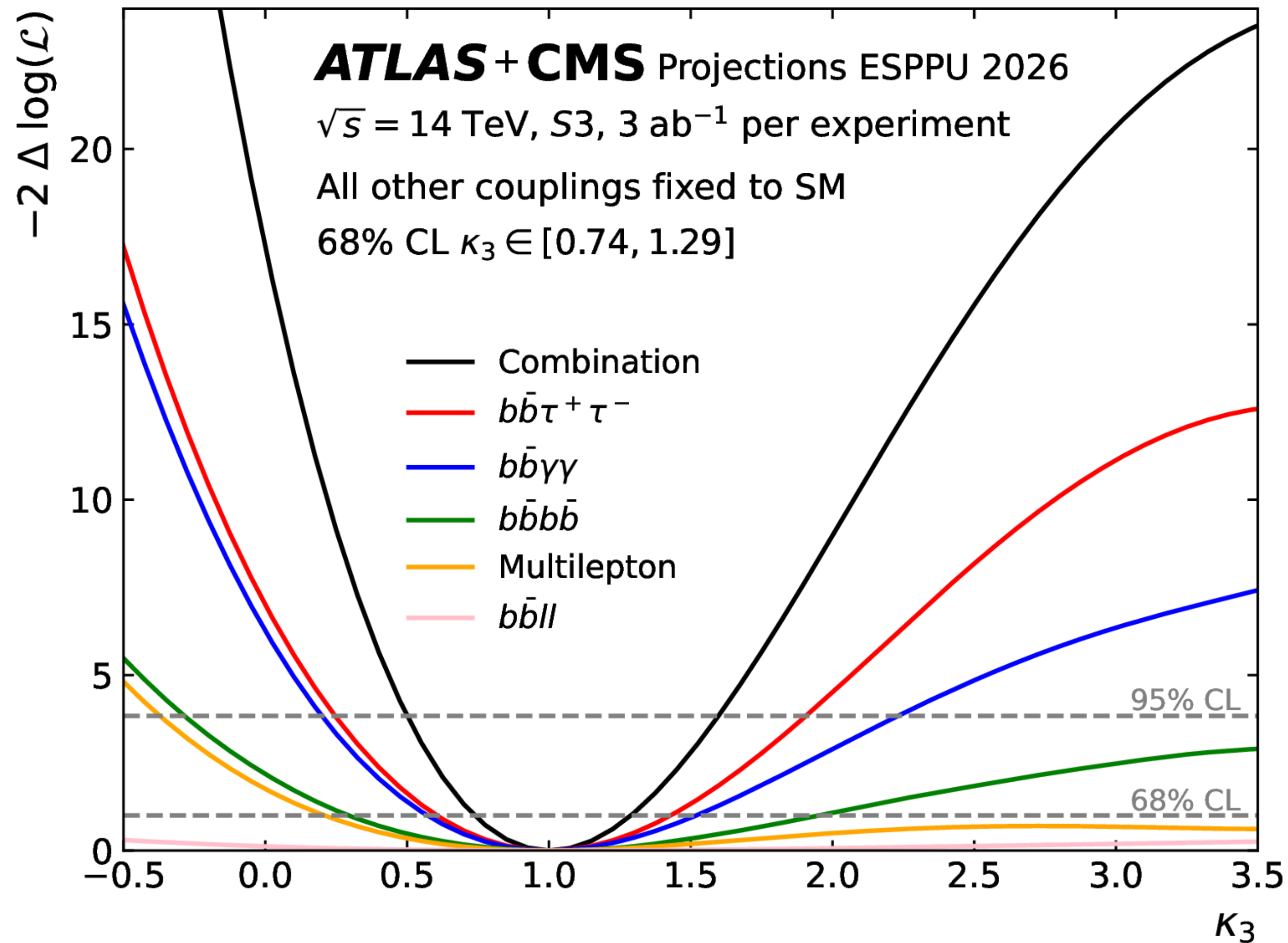
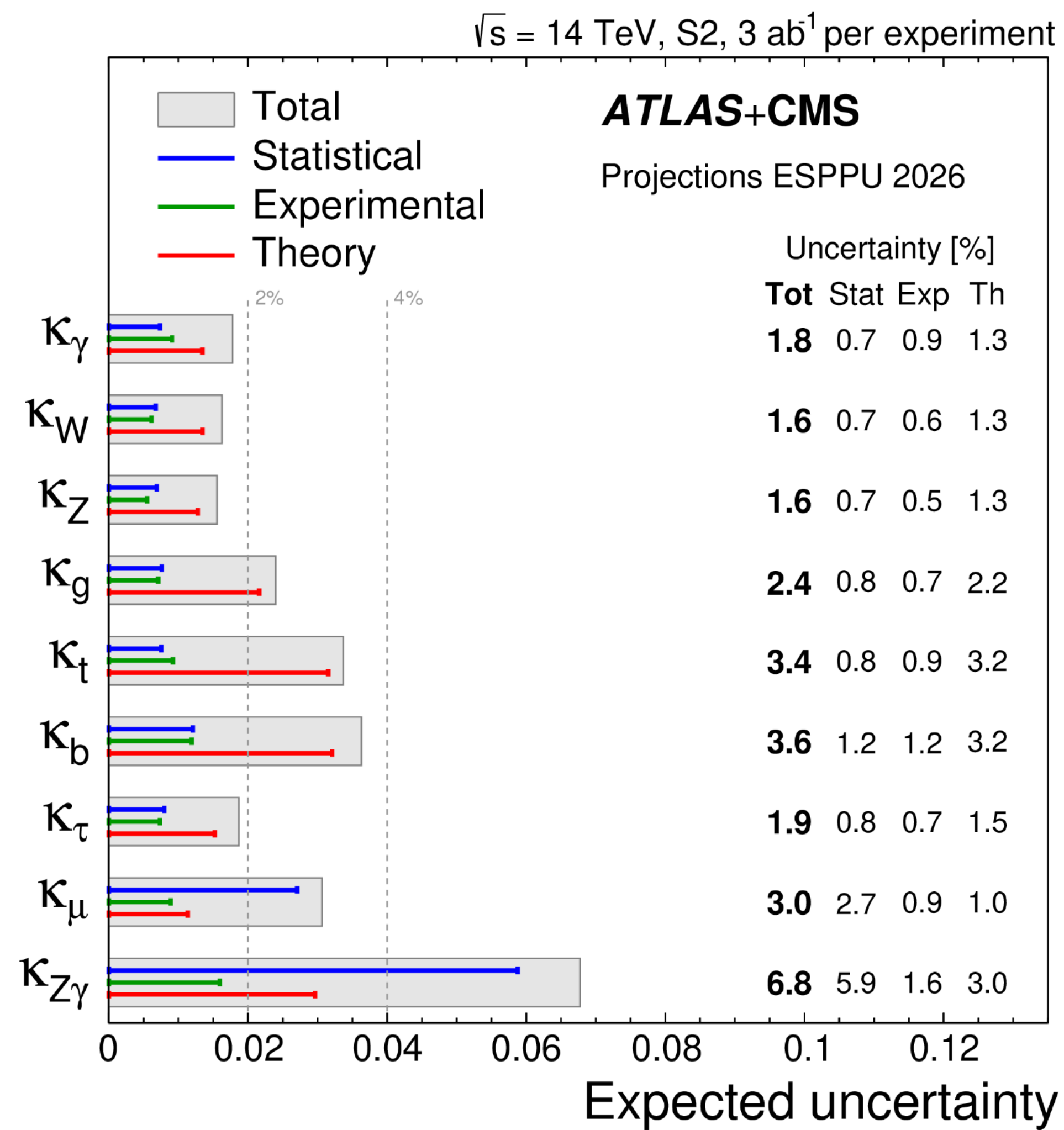
$$\Gamma_H = 3.0^{+2.0}_{-1.5} \text{ MeV}$$

Spin: 0^+ (SM-like)



Still open questions: Does the Higgs sector have a new source of Charge-Parity violation?

AT THE END OF THE LHC ROAD...



CAN THE HIGGS CHANGE LEPTON FLAVOUR?

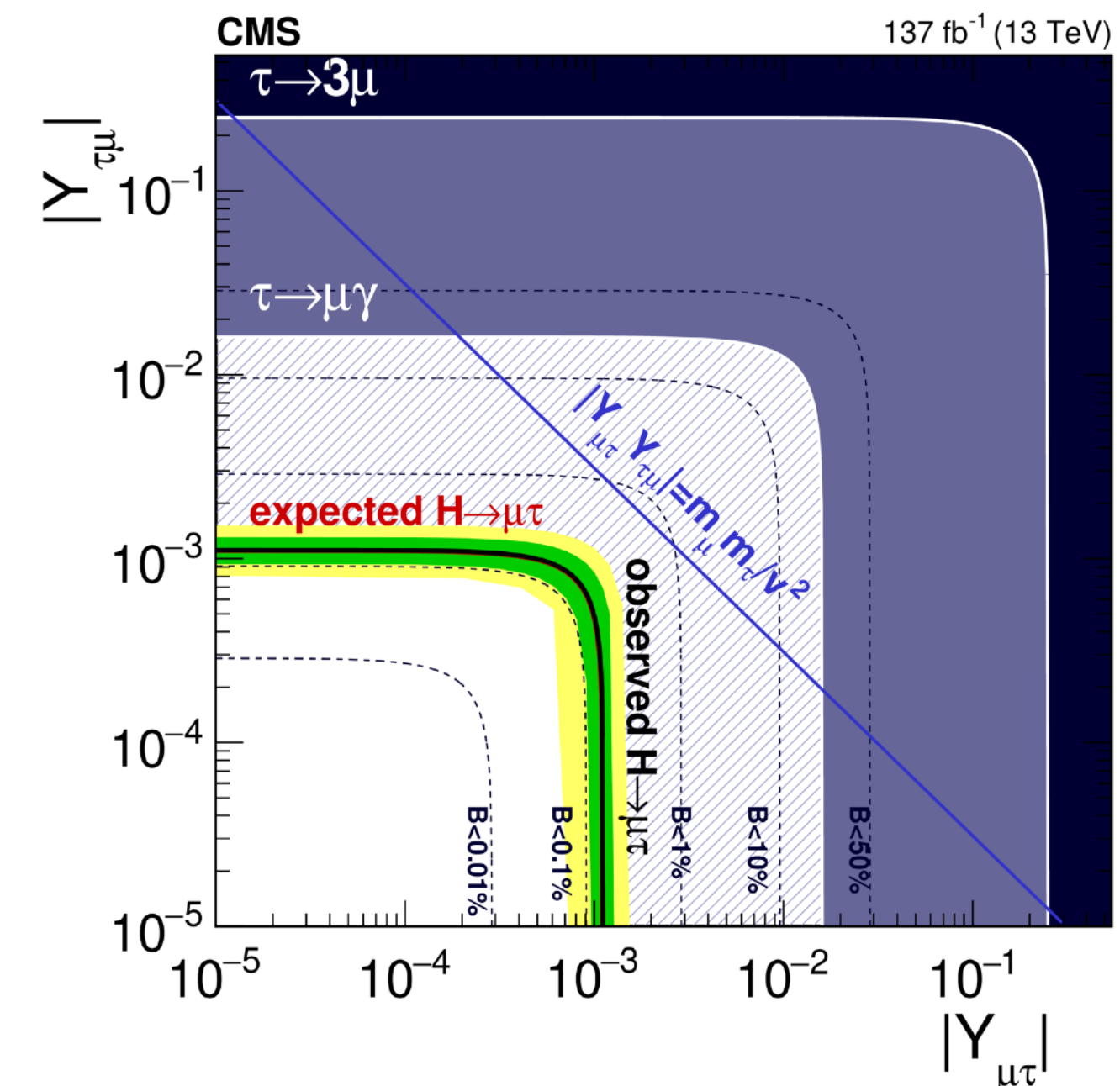
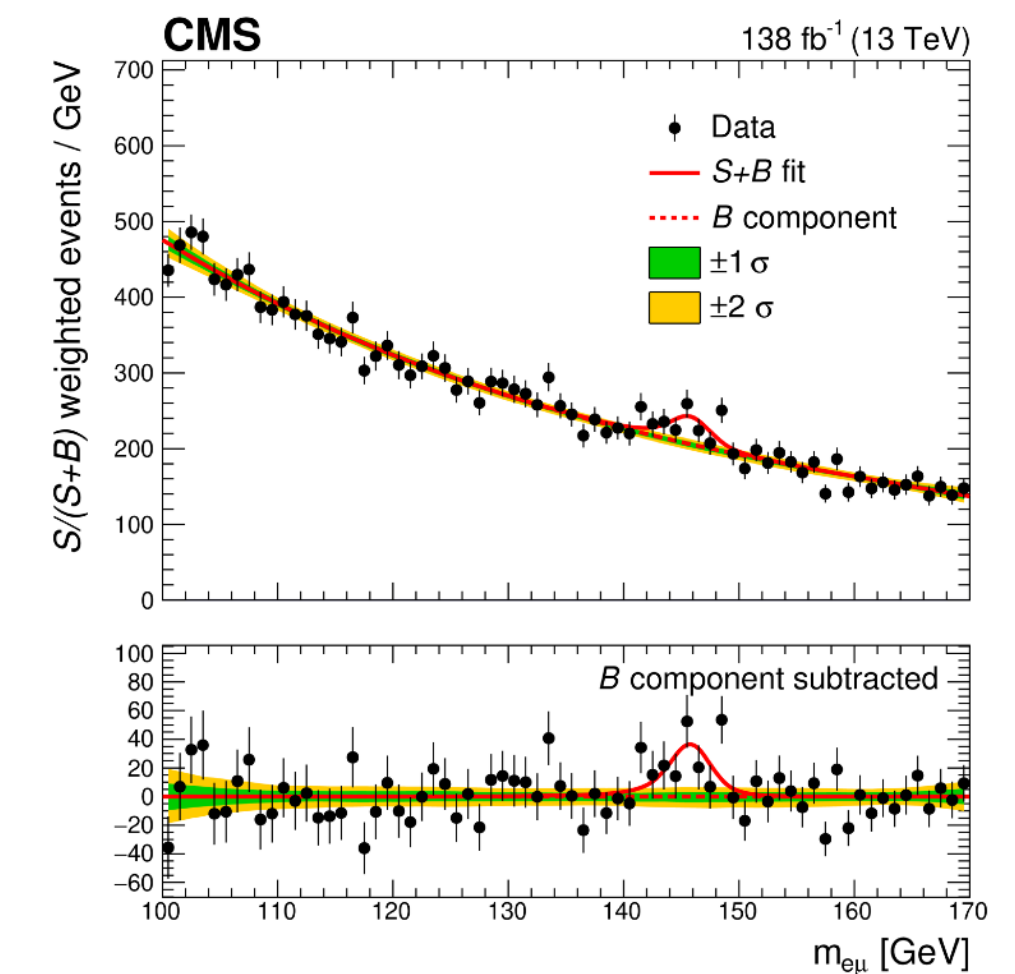
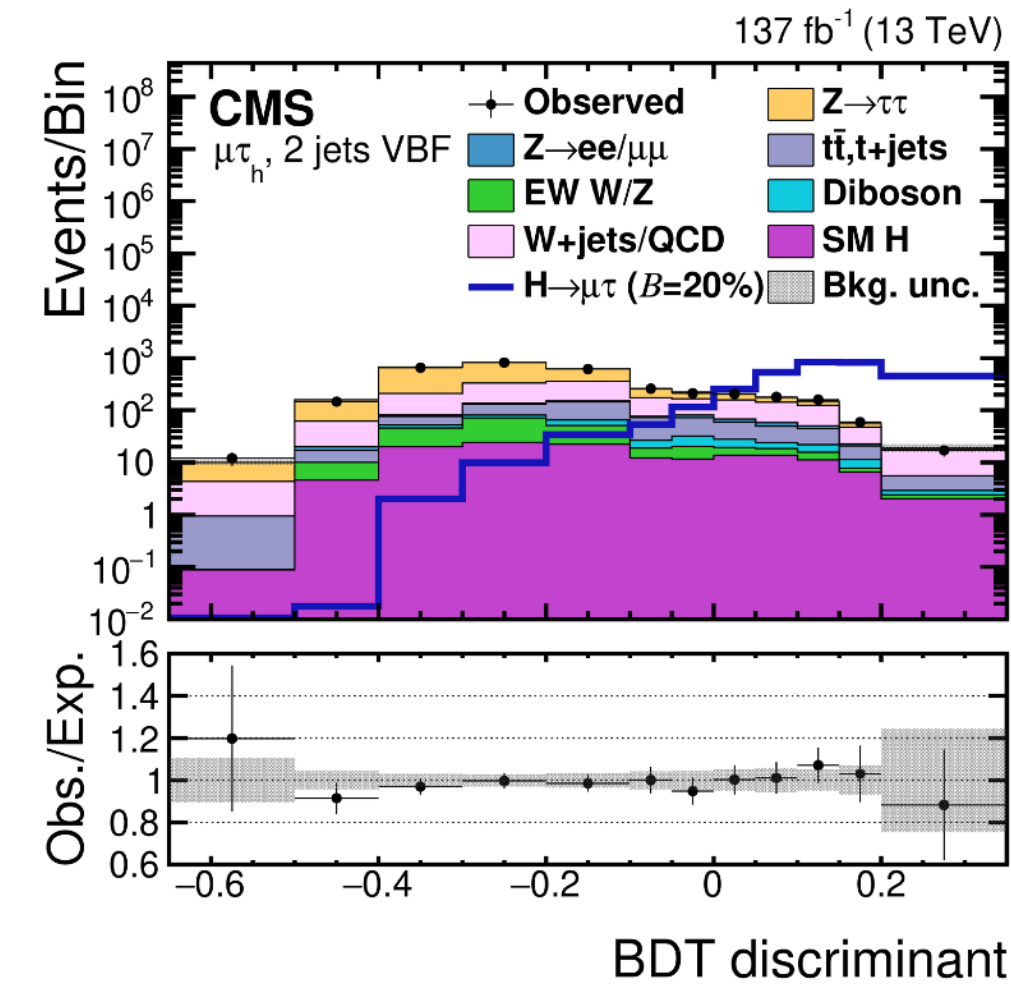
YUKAWA INTERACTIONS AND LEPTON FLAVOUR VIOLATING DECAYS

- Do Higgs decays follow the rules?
- In the SM, $H \rightarrow \mu\tau$, $e\tau$, $e\mu$ do not happen. Measuring them would be a clear sign of new physics.
- Connection between two central puzzles: the Higgs sector and the origin of flavour
- PhD Thesis:
 - Lourdes M^a Urda Gómez (2023)**, Run2, Directed by María Cepeda, Dermot Moran
 - Eva Sánchez Berenguer** (Run3, in progress), directed by Cristina Martín

Phys. Rev. D 108 (2023) 072004 (EMu, Run2)

Phys. Rev. D 104 (2021) 032013 (MuTau, ETau, Run2)

JHEP 03 (2020) 103 (High Mass)



María Cepeda, Cristina Martín,
Eva Sanchez, Lourdes Urda