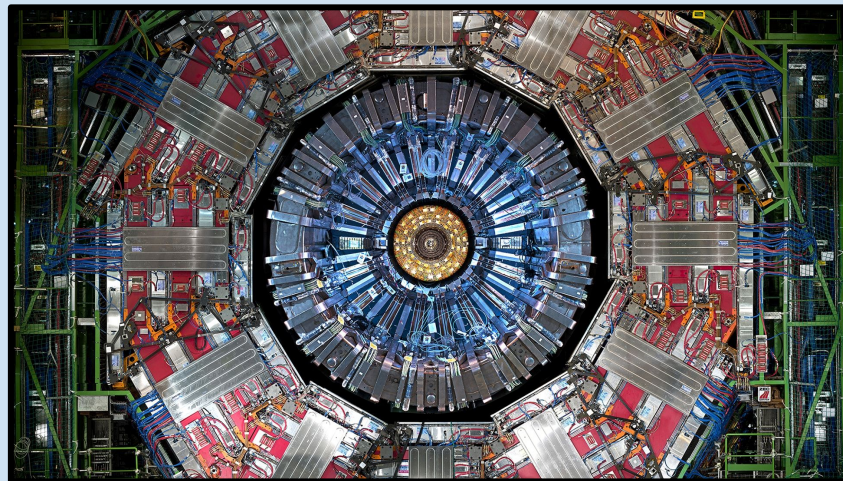


La nueva era: CMS en HL-LHC

Alberto Escalante del Valle (CIEMAT)

*CMS en el LHC: veinte años de física
en la frontera de la energía*

17 de septiembre de 2026,
CIEMAT



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA, INNOVACIÓN
Y UNIVERSIDADES

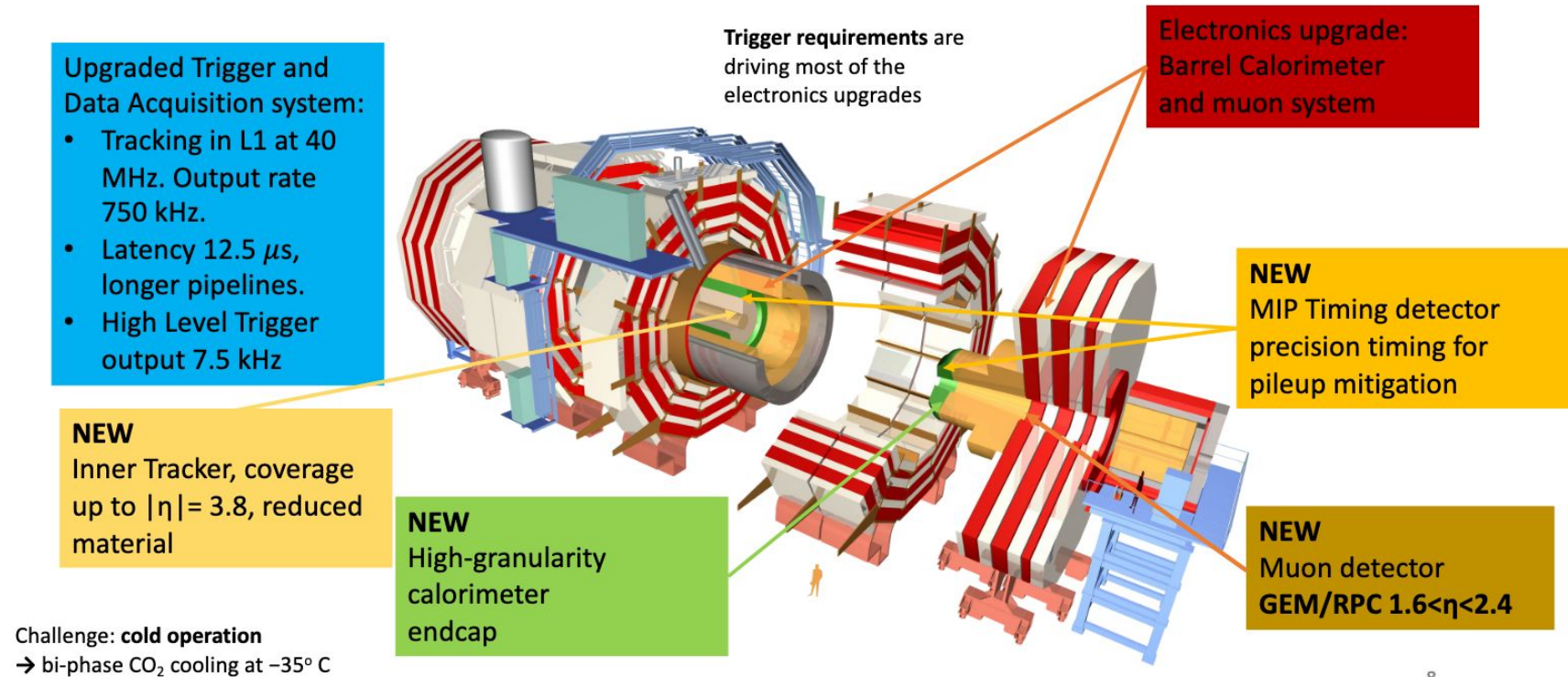
Ciemat
Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas



AGENCIA
ESTATAL DE
INVESTIGACIÓN

Grant CNS2024-154769 and PID2023-147706NB-I00, funded by MICIU/AEI/10.13039/501100011033

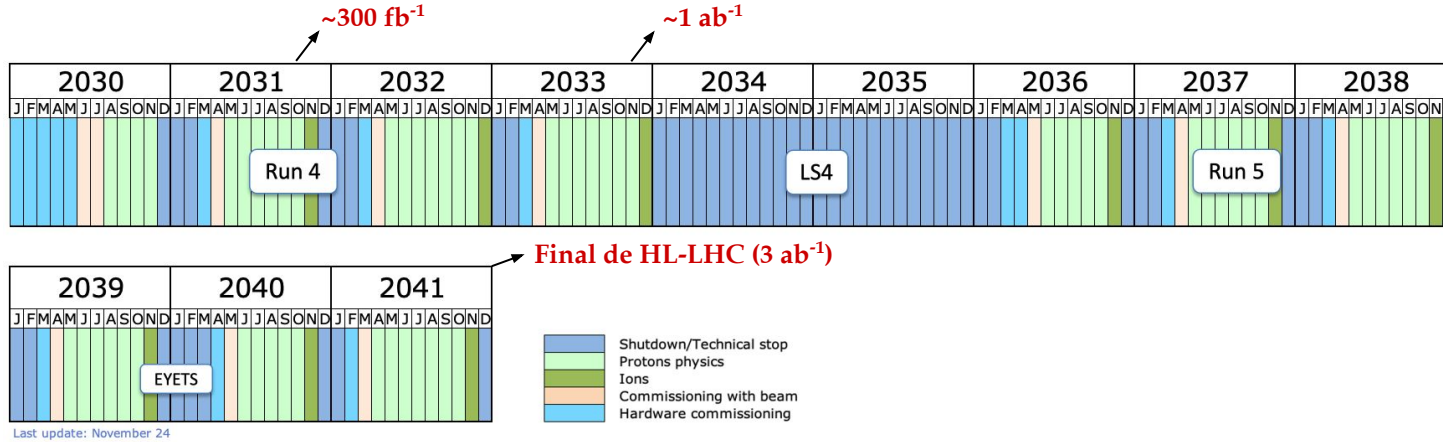
CMS en el LHC de Alta Luminosidad (“HL-LHC”)



8

CMS en HL-LHC: Un upgrade que consolida una filosofía exitosa (CMS), “CMS 2.0”

La toma de datos en HL-LHC: aumento $\sim x10$ en el flujo de datos



HL-LHC permite explorar nuevos escenarios **BSM relativamente rápido**

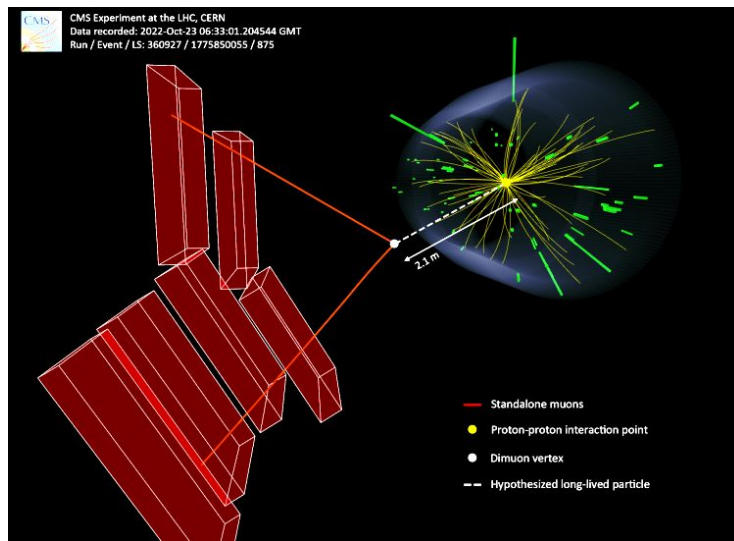
- $\approx 300 \text{ fb}^{-1}$ (2031): Búsquedas directas con 'R&D', así como confirmar un [posible exceso del LHC](#)
- $\approx 1 \text{ ab}^{-1}$ (2033): Cualquier tipo de BSM (incluidas resonancias de alta masa, e.g W' , Z' o SUSY)

Con un nuevo detector "CMS 2.0", y un flujo de datos sin precedentes, este **será el periodo más bonito en R&D en análisis de datos** (exceptuando el inicio del experimento)

El CIEMAT es un instituto de naturaleza “muónica”

Por ser breve, voy a ilustrar ejemplos de búsquedas BSM que se beneficien de R&D en el sistema de muones

- En particular, casos donde uno necesite “pocos datos”, $<< 1 \text{ ab}^{-1}$, **para cubrir escenarios BSM en HL-LHC**



e.g Partículas BSM con tiempos de vida macroscópicos han sido difíciles de *triggerear* en el LHC

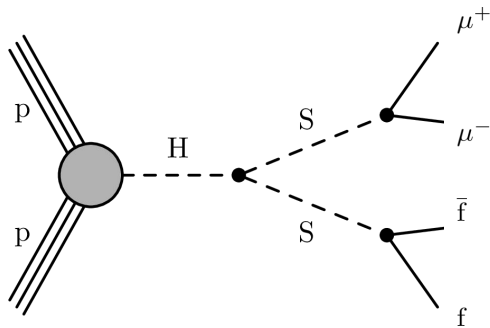
Estos ejemplos BSM son solo un **pincelada de lo que se puede hacer en HL-LHC**

- Como se ha visto a lo largo del día, **en el CIEMAT cubrimos todos las áreas de física (SM, Higgs, ...)**

2030-2033, $\sim 1\text{ab}^{-1}$: Oportunidades de física con el sistema de muones (I)

Vértices secundarios $\mu\mu$ (“desplazados”)

- **Partícula neutra** (e.g Z_D o S) que viaja una distancia macroscópica y se desintegra en $\mu\mu$ dentro de CMS
- **Reto: Trigger para muones de bajo p_T que no apuntan a la colisión.** En **HL-LHC** tendremos:
 - Mejor resolución en la cámaras de muones
 - Tracker disponible en L1 trigger (que se puede usar como veto de background)



Dark sector: Higgs se acopla a un nuevo mediador asociado a un sector oscuro donde vive DM

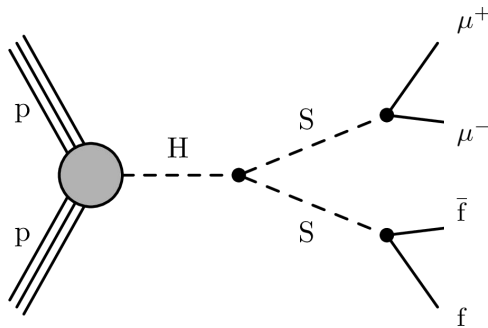
- spin 1 (vector): Z_D (dark photon)
- spin 0 (scalar): S (dark higgs)

Límites actuales son cercanos a $B(H \rightarrow SS) \sim 1$ a 0.5% , dependiendo de la masa y acoplo (θ)

2030-2033, $\sim 1\text{ab}^{-1}$: Oportunidades de física con el sistema de muones (I)

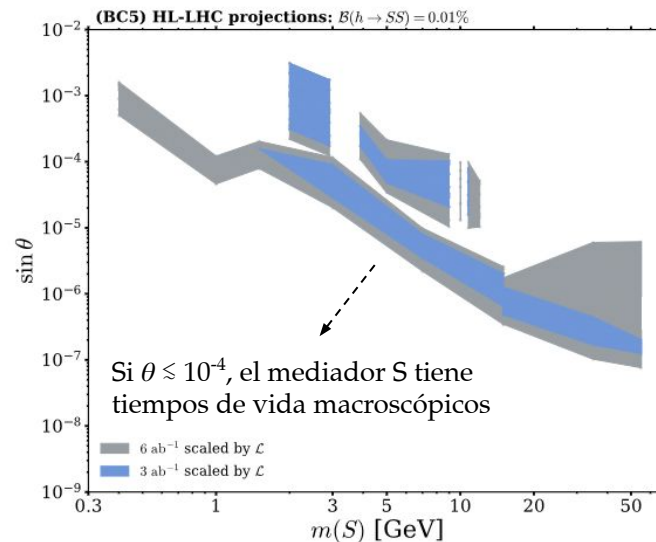
Vértices secundarios $\mu\mu$ ("desplazados")

- **Partícula neutra** (e.g Z_D o S) que viaja una distancia macroscópica y se desintegra en $\mu\mu$ dentro de CMS
- **Reto: Trigger para muones de bajo p_T que no apuntan a la colisión.** En **HL-LHC** tendremos:
 - Mejor resolución en la cámaras de muones
 - Tracker disponible en L1 trigger (que se puede usar como veto de background)



Dark sector: Higgs se acopla a un nuevo mediador asociado a un sector oscuro donde vive DM

- spin 1 (vector): Z_D (dark photon)
- spin 0 (scalar): S (dark higgs)

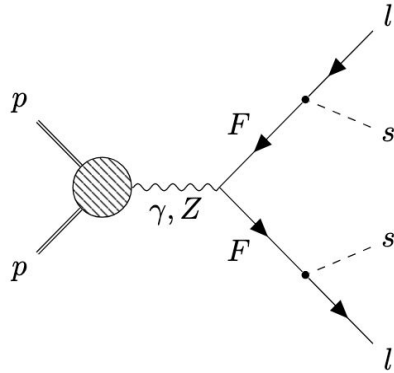


En HL-LHC se puede llegar a $B(H \rightarrow SS) \sim 0.01\%$

2030-2033, $\sim 1\text{ab}^{-1}$: Oportunidades de física con el sistema de muones (II)

Muones desplazados (**¡no forman vértice secundario!**)

- **Partícula cargada** (F) viaja una distancia macroscópica y se desintegra antes de llegar al sistema de muones
- **Retos:** Presencia de una **traza cargada** (F) delante del muón desplazado
 - Mayores fondos al no haber vértice secundario

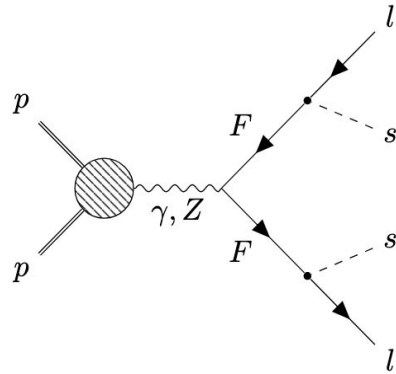


Freeze-in: Abundancia de DM (s) a partir de la desintegración de un mediador (F) débilmente acoplado al SM (nunca alcanza equilibrio térmico)

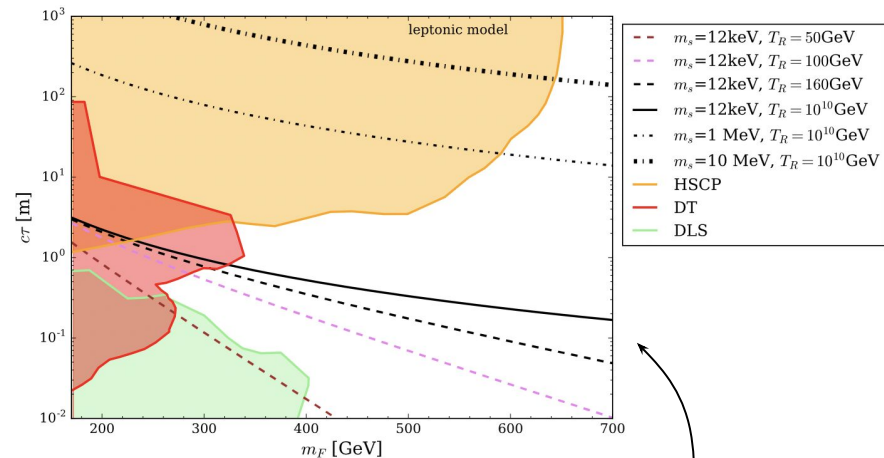
2030-2033, $\sim 1\text{ab}^{-1}$: Oportunidades de física con el sistema de muones (II)

Muones desplazados (**¡no forman vértice secundario!**)

- **Partícula cargada** (F) viaja una distancia macroscópica y se desintegra antes de llegar al sistema de muones
- **Retos:** Presencia de una traza cargada (F) delante del muón desplazado
 - Mayores fondos al no haber vértice secundario



Freeze-in: Abundancia de DM (s) a partir de la desintegración de un mediador (F) débilmente acoplado al SM (nunca alcanza equilibrio térmico)



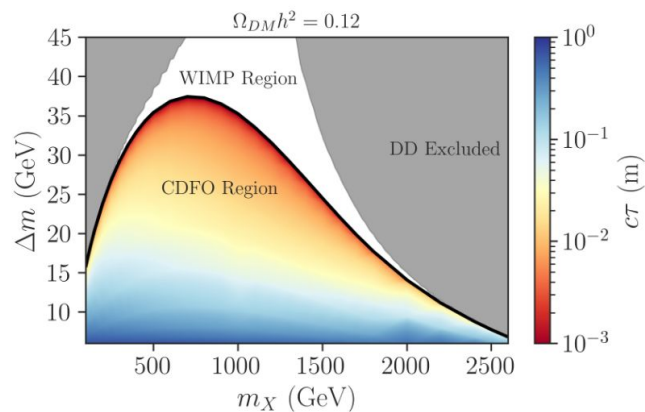
Soluciones con $c\tau(F)$ próximos a $O(m)$ son complicadas de explorar. Oportunidades para HL-LHC:

- Reconstruir la traza interna 'delante del muón' (en HL-LHC se podría buscar en el propio trigger)
- Reconstruir muones aislados, que no apunten al vértice, y que además originen más allá del píxel ($R \geq 16$ cm)

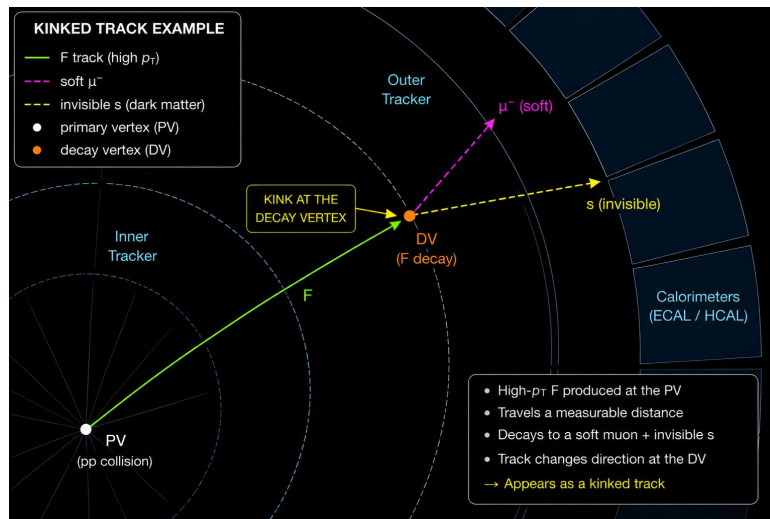
2030-2033, $\sim 1\text{ab}^{-1}$: Oportunidades de física con el sistema de muones (III)

Muones desplazados (en un “escenario *compressed*”)

- El espectro de masas BSM podría estar degenerado en masas (como el neutrón y el protón, $\Delta m = 1.33\text{ MeV}$)
- Retos: El muón desplazado tiene bajo p_T (se confunde con el background)... pero es CLAVE para el trigger
 - El muón guía la búsqueda de un *kink* (una traza interna de alto p_T que apunte al muón)



Conversion-Driven Freeze-Out (CDFO): Abundancia de DM determinada por una pequeña diferencia de masas entre mediador y DM (e.g $\Delta m < 30\text{ GeV}$)



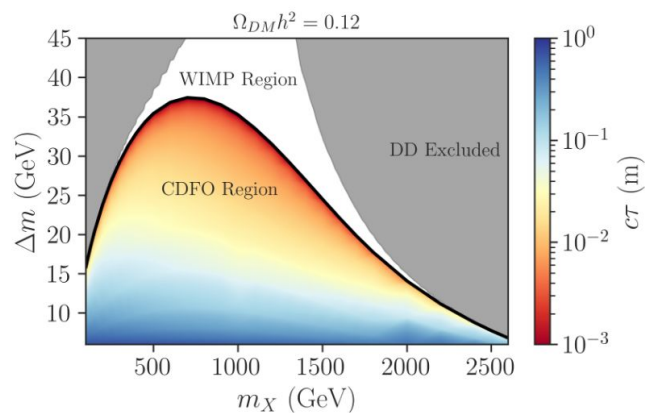
Source: ChatGPT

A día de hoy, este escenario BSM no se ha explorado para $m(\text{DM}) \gtrsim 100\text{ GeV}$ (cuando el mediador es metaestable)

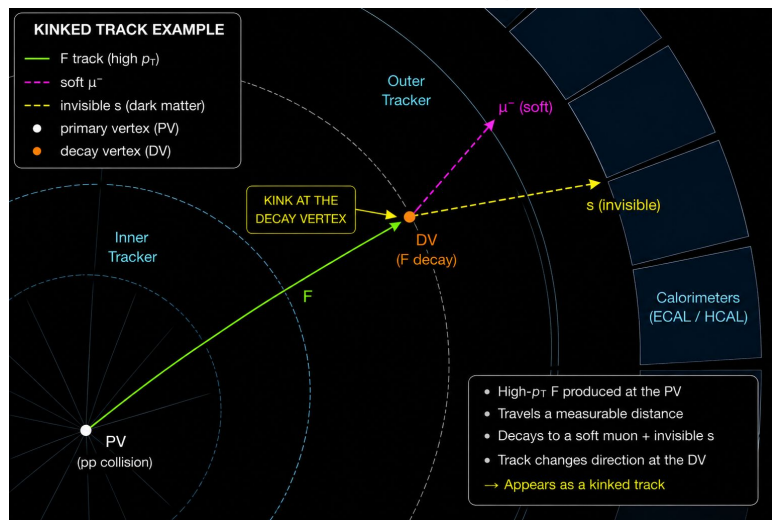
2030-2033, $\sim 1\text{ab}^{-1}$: Oportunidades de física con el sistema de muones (III)

Muones desplazados (en un “escenario *compressed*”)

- El espectro de masas BSM podría estar degenerado en masas (como el neutrón y el protón, $\Delta m = 1.33\text{ MeV}$)
- Retos: El muón desplazado tiene bajo p_T (se confunde con el background)... pero es CLAVE para el trigger
 - El muón guía la búsqueda de un *kink* (una traza interna de alto p_T que apunte al muón)



Conversion-Driven Freeze-Out (CDFO): Abundancia de DM determinada por una pequeña diferencia de masas entre mediador y DM (e.g $\Delta m < 30\text{ GeV}$)



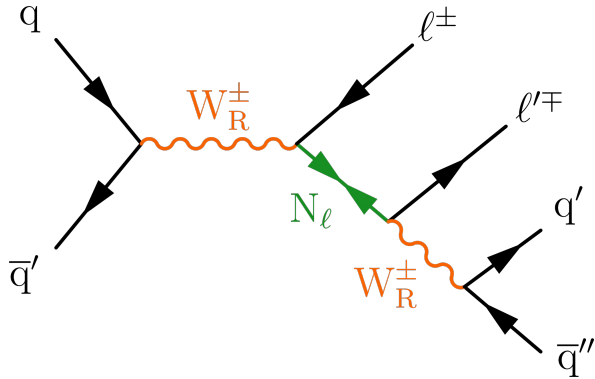
Source: ChatGPT

Estos son 3 ejemplos de física BSM que involucran muones desplazados, accesibles al inicio de HL-LHC, y que se benefician de los años de trabajo del CIEMAT-UAM en el trigger de muones y en búsquedas de partículas de vida larga

2030-2033, $\sim 1\text{ab}^{-1}$: Oportunidades de física con el sistema de muones (IV)

“Shower hadrónico” en las cámaras de muones

- Partícula neutra (**Nl**) viaja una distancia macroscópica y se **desintegra en hadrones dentro del sistema de muones** dando lugar a una **alta multiplicidad de hits** (>100 hits), algo muy atípico para un muón
- **Retos:** diseñar triggers eficientes en señales y de bajo *background rate*

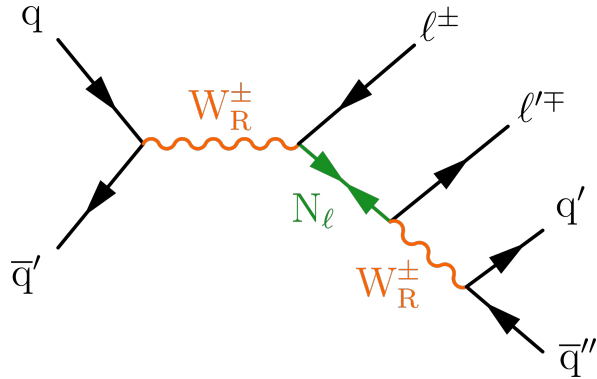


HNL: Neutrino pesado que se mezcla con los neutrinos del SM.
Puede adquirir masa a partir de un mecanismo de See-saw

2030-2033, $\sim 1\text{ab}^{-1}$: Oportunidades de física con el sistema de muones (IV)

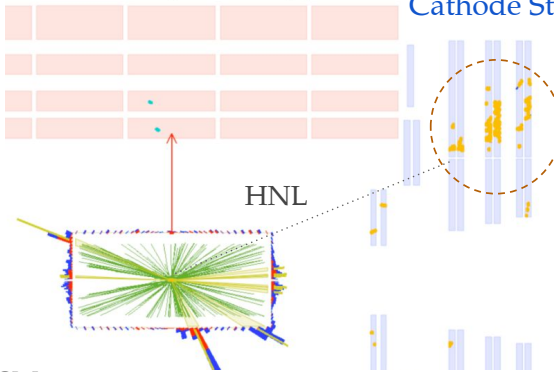
“Shower hadrónico” en las cámaras de muones

- Partícula neutra (Nl) viaja una distancia macroscópica y se **desintegra en hadrones dentro del sistema de muones** dando lugar a una **alta multiplicidad de hits** (>100 hits), algo muy atípico para un muón
- **Retos:** diseñar triggers eficientes en señales y de bajo *background rate*



Drift Tube (DT)

Cathode Strip Chamber (CSC)



HNL: Neutrino pesado que se mezcla con los neutrinos del SM.
Puede adquirir masa a partir de un mecanismo de See-saw

Un tipo de señal para la cual dispondremos de triggers en las DTs en HL-LHC, que se están desarrollando en una colaboración del CIEMAT-UAM con la Universidad de Oviedo

¡La paciencia es la madre de la ciencia!

Y aunque os he contado algunos ejemplos para buscar BSM al inicio de HL-LHC, los **tests más fuertes de BSM van a llegar en forma de medidas**

- con datos que ya hemos tomado, e.g observación de *toponium* (otros test son *work in progress*)
- con $>1 \text{ ab}^{-1}$ (a partir de 2033)



Higgs en HL-LHC con 3 ab^{-1}

Las proyecciones de física del Higgs para HL-LHC se han hecho lideradas por miembros del CIEMAT

El HL-LHC es una “Higgs factory” (~380 Millones de Higgses con 6 ab^{-1} contando ATLAS+CMS)

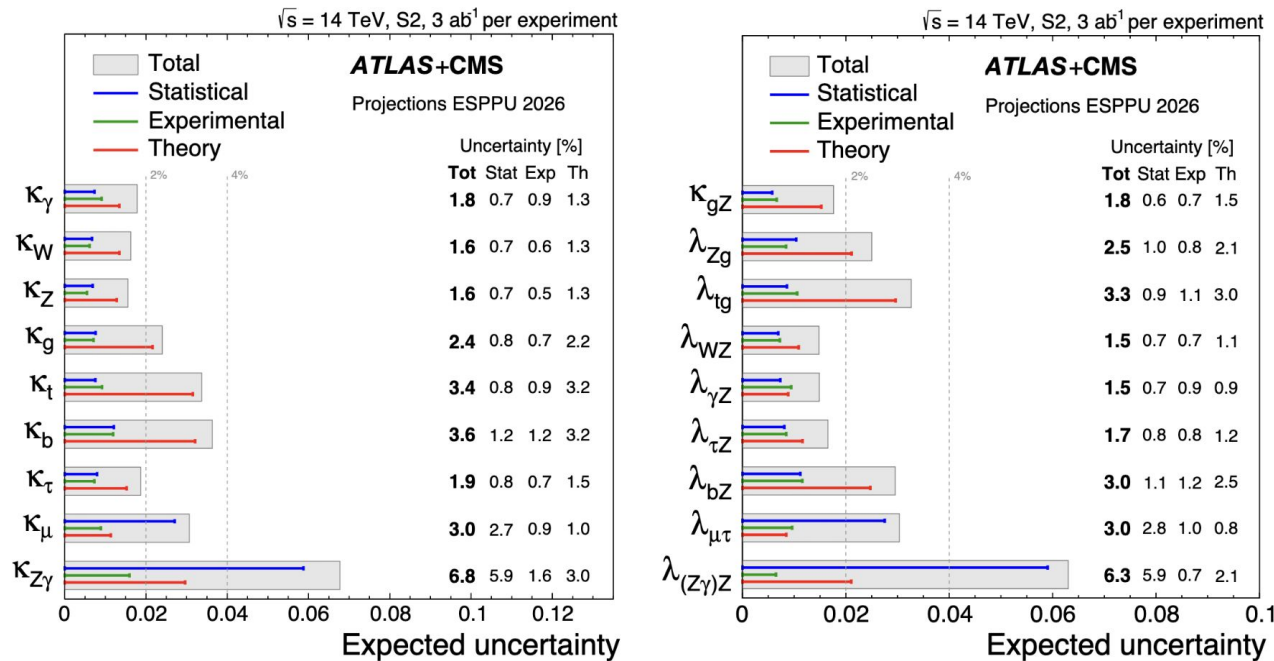
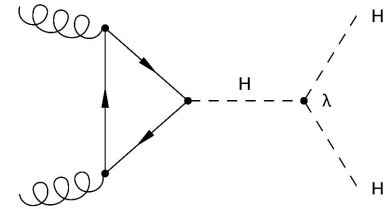
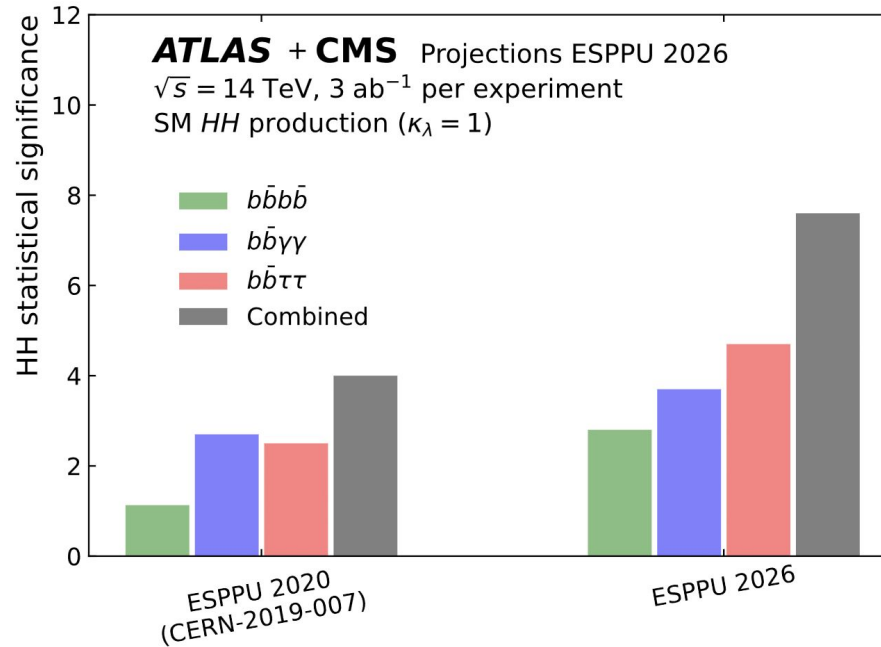


Figure 1: The projected uncertainty in the combined coupling signal strength modifiers (left) and their ratios (right) with 3 ab^{-1} of pp collisions under the S2 systematic uncertainty scenario, assuming that the Higgs boson decays only to final states predicted by the SM.

Higgs en HL-LHC con 3 ab^{-1}

El CIEMAT tiene como objetivo científico prioritario la observación de HH

El HL-LHC permitirá estudiar el potencial de Higgs con muy buena precisión



ATLAS + CMS uncertainty: $-26\% / +29\%$ (ESPPU 2026)

- Avances en técnicas de análisis muestran que las proyecciones iniciales de HL-LHC eran super conservadoras

Lista (incompleta) de algunos de los resultados esperables con 3 ab^{-1}

- **Observación de $H \rightarrow \mu\mu$ y $H \rightarrow Z\gamma$** , con precisiones en sus acoplos de aproximadamente **3% y 7%**, respectivamente.
- **Medida de los principales acoplos del Higgs** a fermiones y bosones vectoriales, incluidos los acoplos efectivos a fotones y gluones, con precisiones entre **1.6% y 3.6%**
- **Sensibilidad al Yukawa del charm** hasta aproximadamente **1.5 veces el valor del SM** al 95% CL
- **Observación de la producción di-Higgs del SM** con una significancia superior a 7σ
- **Medida del autoacoplo trilineal λ_3** con una precisión mejor que **30%**
- **Sensibilidad a nueva física** capaz de generar una transición de fase electrodébil fuertemente de primer orden en el Universo temprano
- **Observación del scattering longitudinal de bosones vectoriales $W_L W_L$** y medida de su sección eficaz con una precisión mejor que **20%**
- **Medida de procesos extremadamente raros**, como la producción de 4 tops, con una precisión de alrededor del **6%**
- **Restricciones sobre interacciones anómalas tZ** , sensibles a nueva física hasta escalas de aproximadamente **2 TeV**

[Fuente](#)

El CIEMAT tiene *expertise* para participar en cualquiera de estos objetivos científicos en HL-LHC

Razones para ser optimista

Partimos a **hombros de gigantes, CMS**

La filosofía del upgrade es la **más ambiciosa de todos los experimentos del LHC**

- Además, no hace falta esperar mucho, **el primer ab^{-1} llega prontito**

Avances en computing y análisis de datos permiten, a día de hoy, hacer física con $\approx 0.5 \text{ ab}^{-1}$ en tiempos razonables

- *Prototipar nunca ha sido tan fácil* como en la era de la IA

Muchos de los resultados de HL-LHC serán *state-of-the-art* en el PDG durante muchos, muchos años

... y se van a encontrar cientos de anomalías (solo por estadística) que necesitarán escrutinio

Razones para ser optimista

A título personal, lo más bonito (y lo que creo que pasará) es que **el highlight de física del HL-LHC será algo inesperado, un resultado que no he mencionado esta charla...**



La piedra de la luna (Coyolxauhqui) se encontró por casualidad el 21 de febrero de 1978 en Ciudad de México, México



Tenochtitlan, sobre la cual hoy está construido Ciudad de México