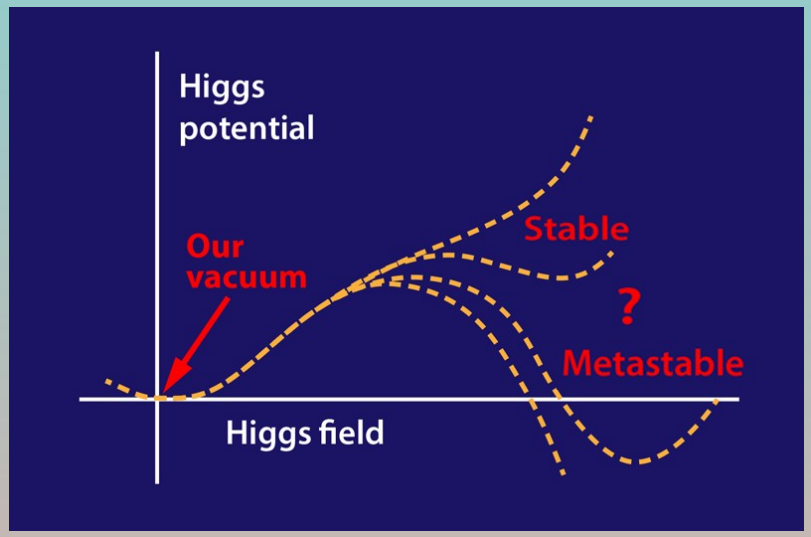
از ناپایداری خلاء
تا تلاش برای کشف ذرات دیرپا

مریم زینلی

دومین گردهمایی همکاری دانشگاه‌های ایران با آزمایش CMS در CERN

۲۳ شهریور ۱۴۰۰

مروری بر ناپایداری خلاء الکتروضعیف



✶ پایداری خلاء:

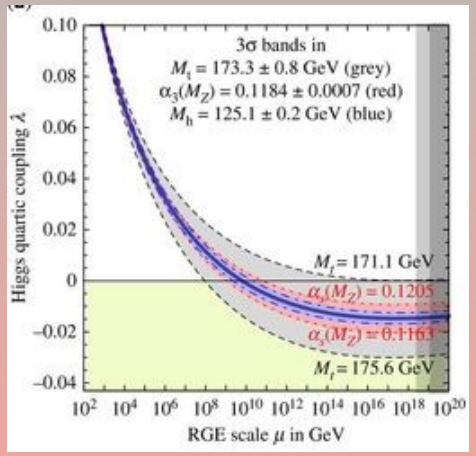
◊ اگر جهان در کمینه مطلق پتانسیل هیگز باشد

✶ پایداری نسبی خلاء:

◊ اگر کمینه موضعی باشد و کمینه ژرف‌تری موجود باشد

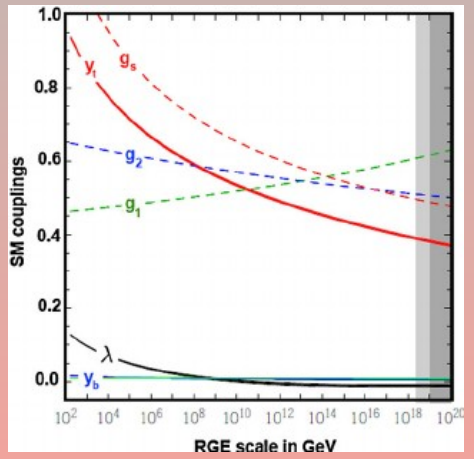
✶ علت بروز خلاءهای مختلف:

◊ تصحیحات کوانتومی به ضریب جفت‌شدگی هیگز

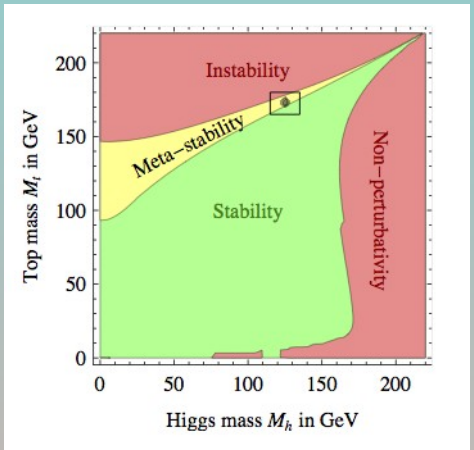


✶ وابستگی به پارامترهای مختلف

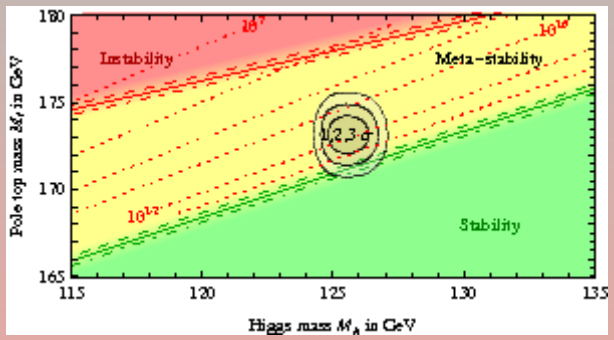
◊ بیشترین تأثیرپذیری از جرم کوارک تاپ به عنوان سنگین‌وزن‌ترین ذره مدل استاندارد



نقش جرم کوارک تاپ در ناپایداری خلاء

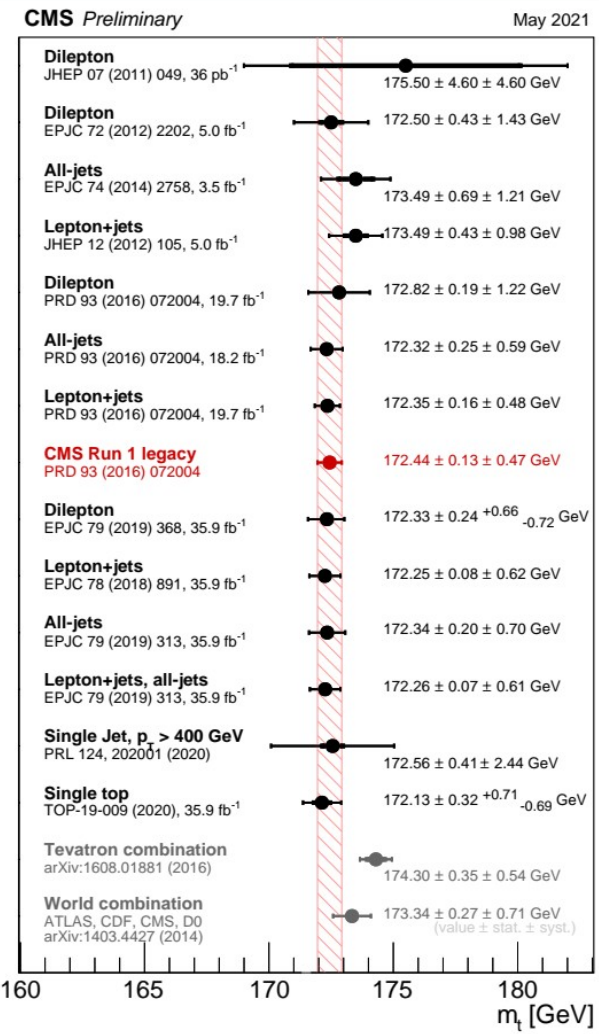


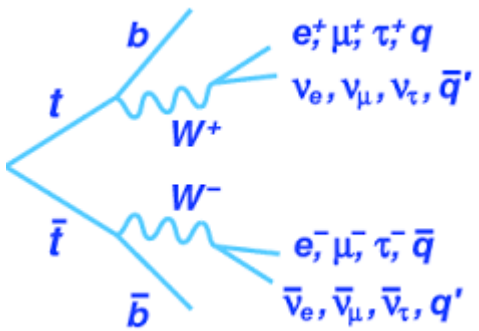
- مناطق پایداری مطلق/نسبی خلاء در فضای پارامتر m_t بر حسب m_H



- پتانسیل میدان هیگز کدام یک از منحنی‌هاست؟
  - جرم ذره کوارک تاپ را دقیق اندازه بگیریم.
- اندازه‌گیری‌ها بیشتر بر حالت خلاء اشتباه دلالت دارند !
  - دانستن جرم دقیق کوارک تاپ تعیین‌کننده است
  - سیگنال فیزیک جدید می‌تواند بر پتانسیل میدان هیگز تأثیر بگذارد

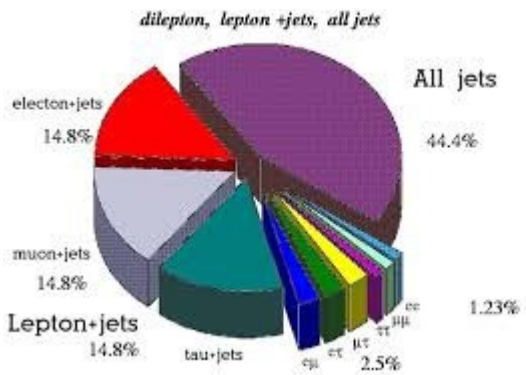
اندازه‌گیری دقیق جرم کوارک تاپ



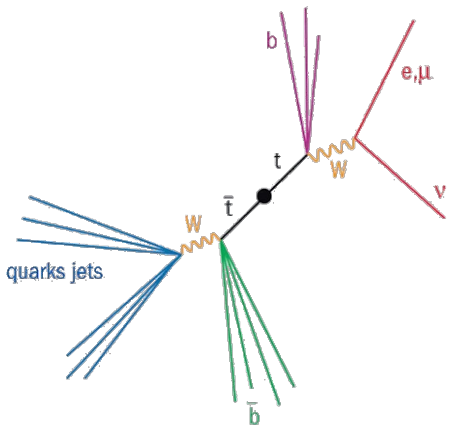


✶ همه حالت‌های واپاشی رویداد $t\bar{t}$:

- ◊ تمام هادرونی: بیشترین احتمال رخداد ، عدم‌قطعیت فراوان
- ◊ تمام لپتونی: کمترین احتمال رخداد ، آمار پایین



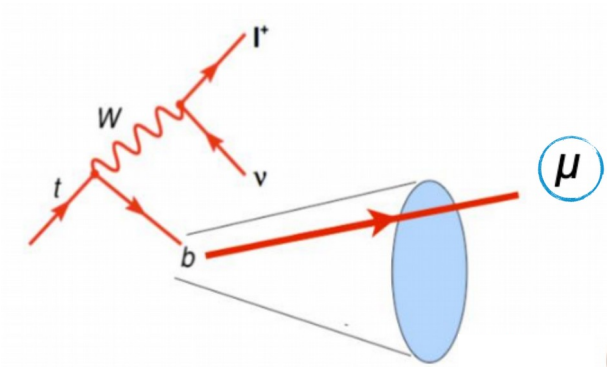
✶ کسر واپاشی به هر یک از حالت‌های نهایی



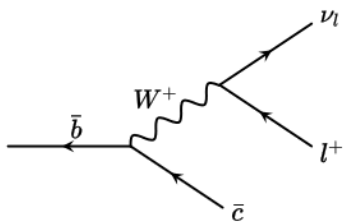
✶ کانال نیمه‌لپتونی:

- ◊ احتمال وقوع مناسب
- ◊ دارابودن لپتون در حالت خروجی

اندازه‌گیری جرم کوارک تاپ با استفاده از ۲ لپتون



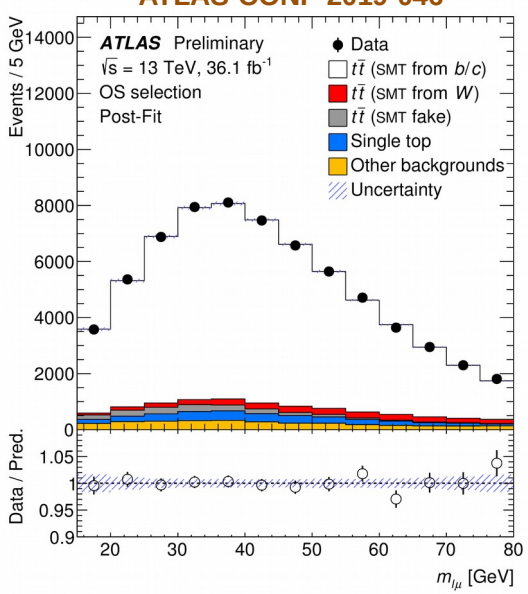
- بازسازی جرم ناوردای دو لپتون در رویدادهای نیمه‌لپتونی $t\bar{t}$
- درخواست وجود لپتون در واپاشی کوارک b
  - احتمال ۰/۲ واپاشی نیمه‌لپتونی کوارک b



- شرایط انتخاب:
  - یک لپتون منفرد
  - حداقل ۴ جت
    - یک جت نوع b
    - یک جت نوع SMT
  - بازسازی ناوردای جرم $m_{l\mu}$

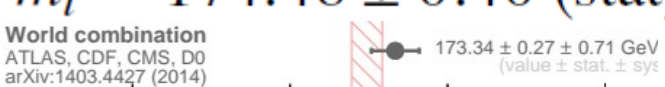
- انگیزه‌های انجام این پروژه:
  - تمام لپتونی، حساسیت کمتر به عدم‌قطعیت جت‌ها
  - کاهش خطای سیستماتیک روی مقدار اندازه‌گیری‌شده
  - تاکنون در آزمایش سی‌ام‌اس انجام نشده

ATLAS-CONF-2019-046



- مقدار اندازه‌گیری‌شده از این روش و مقایسه با مقدار جهانی:

$$m_t = 174.48 \pm 0.40\ (\text{stat}) \pm 0.67\ (\text{syst})\ \text{GeV}.$$



سیگنال فیزیک جدید

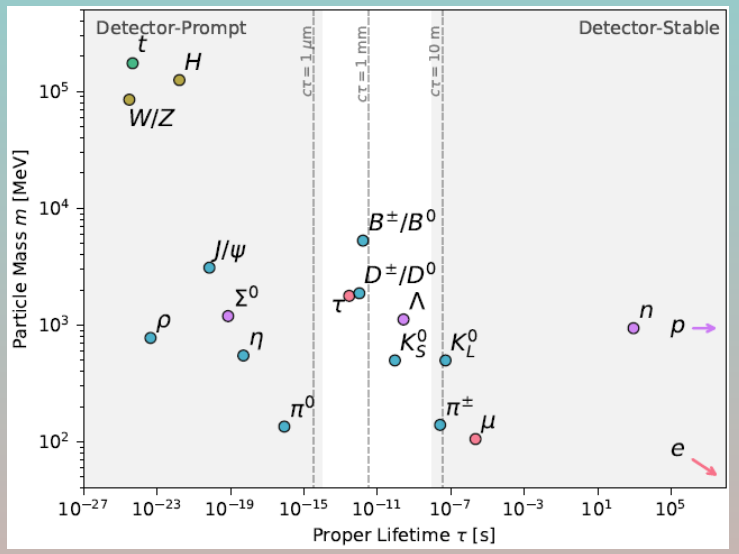
- **از اولویت‌های اساسی LHC: کشف ذرات جدید فرای مدل استاندارد**
  - قله‌های تشدیدی روی طیف جرم ناوردا
  - رویدادهای با فزونی انرژی عرضی گمشده

- **غیر از کشف بوزون هیگز، هیچ شاهدی بر وجود ذره دیگری نیست**

- **فرض گسترده جستجوی فیزیک جدید: واپاشی ذرات جدید خیلی سریع اتفاق می‌افتد**

- **شاید تا الان تولید شده ولی کشف نشده باشند**
  - اگر فرآیند بازسازی و تحلیل دیتا با ویژگی‌های ذره همخوان نباشد، مثلاً ذرات با طول عمر زیاد

ذرات دیرپا (LLPs) به عنوان نشانه‌ای از فیزیک جدید



✶ ذرات دیرپا در مدل استاندارد:

- الکترون، پروتون، نوترون و ...

✶ انواع واپاشی یک ذره:

- **فوری:** اگر فاصله بین تولید و واپاشی ذره از دقت مکانی دستگاه کوچکتر باشد
- **تغییرمکان‌یافته:** اگر فاصله بین تولید و واپاشی ذره به مقدار معناداری بزرگ باشد

✶ مقیاس دقت مکانی:

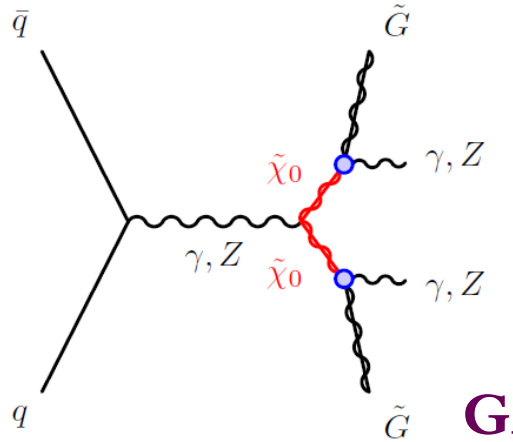
- **بسته به اجزاء آشکارساز:** از ده‌ها میکرومتر تا ده‌ها میلی‌متر
- **بسته به سایز دستگاه:** از ده‌ها سانتی‌متر تا ده‌ها متر

✶ احراز یکی از شرایط زیر برای معرفی یک ذره دیرپا:

- دامنه پراکندگی کوچک (احتمال پایین رخداد واپاشی)
- فضای فاز محدود برای واپاشی (تبهگنی طیف جرمی ذرات مدل)
- ذرات سنگین واسطه انجام واپاشی باشند

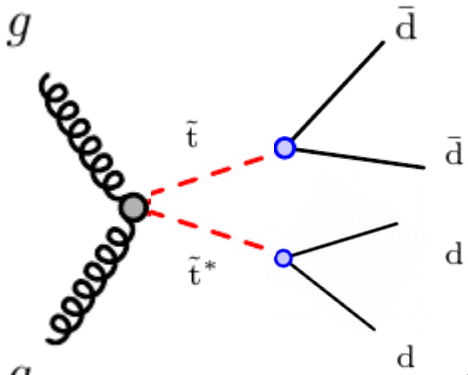
$$\tau^{-1} = \Gamma = \frac{1}{2m_X} \int d\Pi_f |\mathcal{M}(m_X \to \{p_f\})|^2$$

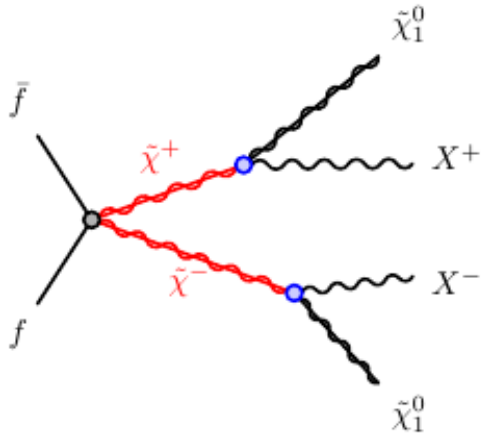
سیگنال‌های تولید ذرات دیرپا



GMSB ✶

- ◊ **سبک‌ترین ذره ابرتقارن:** گراویتینو
- ◊ **ذره دیرپا:** نوترالینو
- ◊ **علت:** جفت‌شدگی کوچک



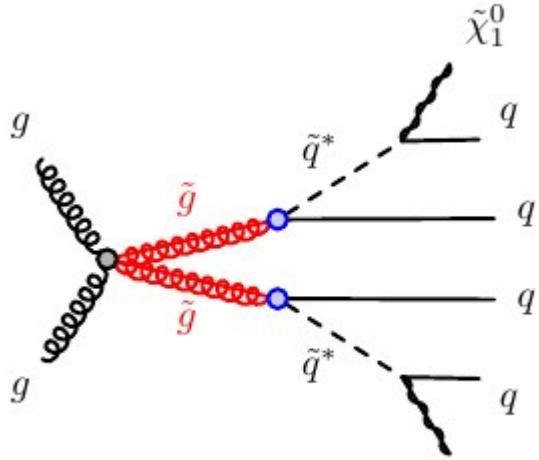


AMSB ✶

- ◊ **سبک‌ترین ذره ابرتقارن:** نوترالینو
- ◊ **ذره دیرپا:** چارجینو
- ◊ **علت:** تبهگنی جرم

RPV ✶

- ◊ **سبک‌ترین ذره ابرتقارن: اس‌تاپ**
- ◊ **ذره دیرپا: اس‌تاپ**



split-SUSY ✶

- ◊ **سبک‌ترین ذره ابرتقارن:** نوترالینو
- ◊ **ذره دیرپا:** گلوئینو
- ◊ علت: جرم اسکالرها خیلی بیشتر از جرم فرمیون‌هاست

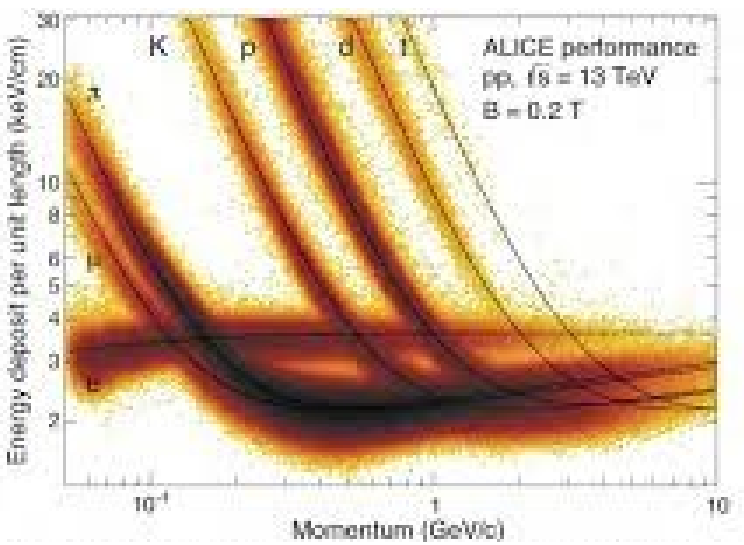
آشکارسازی از طریق یونش غیرمعمول

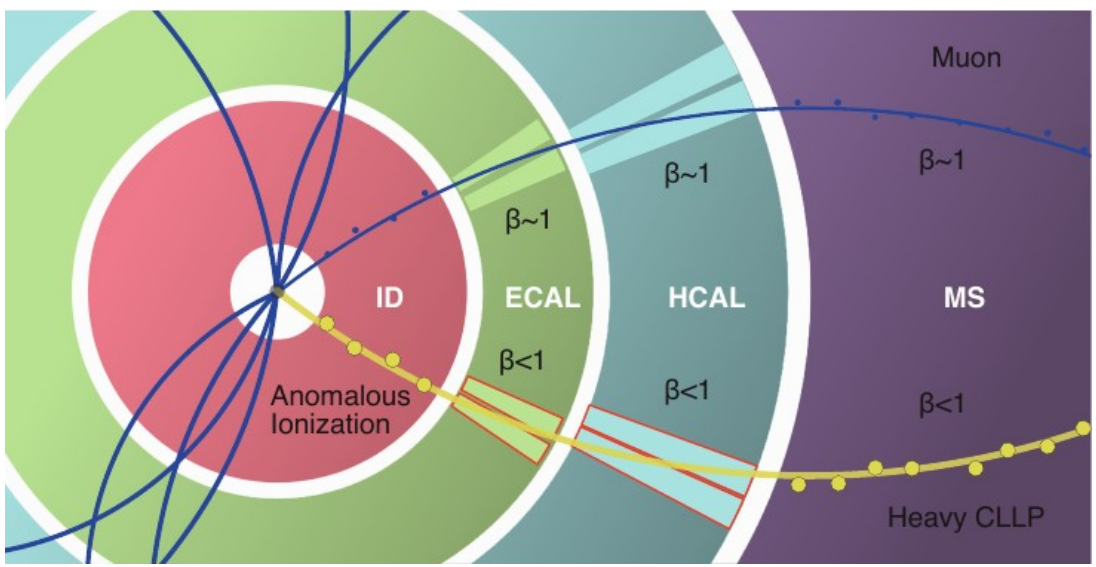
✶ انواع آشکارسازی ذرات دیرپا:

- ◊ **مستقیم:** برهم‌کنش مستقیم ذره دیرپا با آشکارساز
- ◊ **غیرمستقیم:** برهم‌کنش ذرات مدل استاندارد برآمده از واپاشی ذره دیرپا

✶ یونیزاسیون نابهنجار:

- ◊ تشخیص مستقیم از طریق ردیاب برای ذره دیرپای دارای بارالکتریکی
- ◊ جرم سنگین، سرعت پایین و هدررفت انرژی زیاد



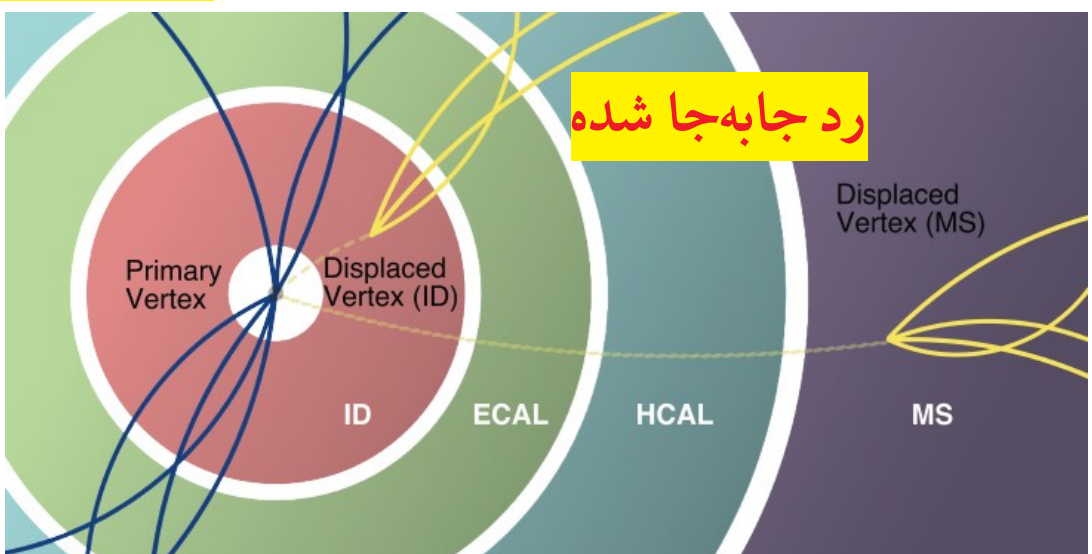


آشکارسازی از طریق بازسازی محصولات

✶ سیگنال‌های تاخیری:

- ◊ یک ذره دیرپای سنگین در مقایسه با یک ذره مدل استاندارد با تکانه یکسان، زمان بیشتری برای طی مسیر نیاز دارد
- ◊ وجه مشخصه ذره دیرپا: دیررسیدن به نواحی مختلف آشکارساز
- ◊ اندازه‌گیری زمان پرواز، اندازه‌گیری سرعت ذره و با دانستن تکانه منجر به یافتن جرم ذره می‌شود
- ◊ زمینه کم با توسعه یک روش غربالگری اختصاصی با بهره‌گیری از امکان رخداد سیگنال در فواصل خوشه‌های خالی پروتونی

ردی که از رأس اصلی می‌آید



✶رأس‌های جابه‌جا شده:

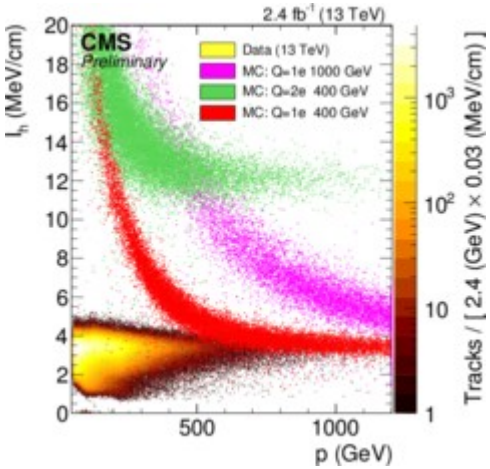
- ◊ ردهایی که از ذرات باردار در واپاشی ذره دیرپا می‌آیند غالباً از رأس برهم‌کنش نمی‌آیند
- ◊ مقیاس سازگاری با رأس اصلی: پارامتر برخورد

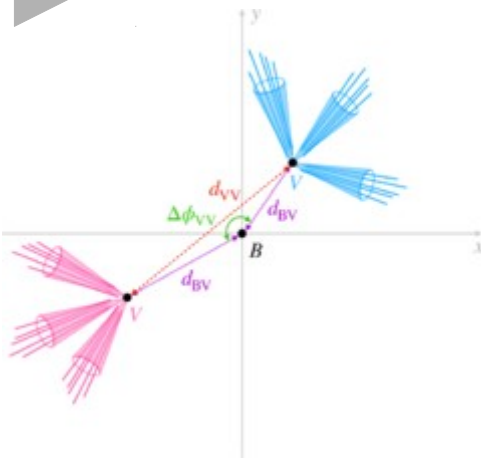
نمونه‌هایی از آنالیزهای انجام‌شده

CMS-EXO-19-012

✶ جستجوی دو جت با رأس‌های جابه‌جا شده:

- ◊ مرکز مختصات بر نقطه برهم‌کنش منطبق است
- ◊ رویداد حاوی دو رأس جابه‌جاشده باشد
- ◊ **مشاهده‌پذیر:** فاصله دو رأس در صفحه عمود بر جهت برخورد
- ◊ سیگنال‌های شبیه‌سازی‌شده دارای ذرات با نیمه‌عمرهای متفاوت با دیتا مقایسه می‌شوند





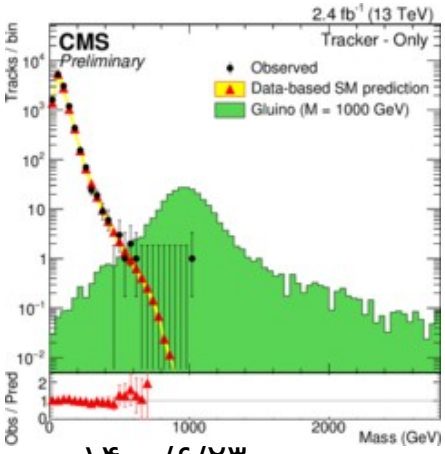
CMS-EXO-15-010

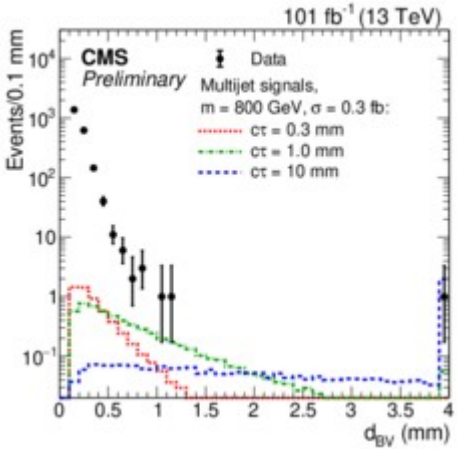
✶ جستجوی ذره باردار سنگین:

- ◊ ذره سنگین‌تر -> سرعت پایین‌تر

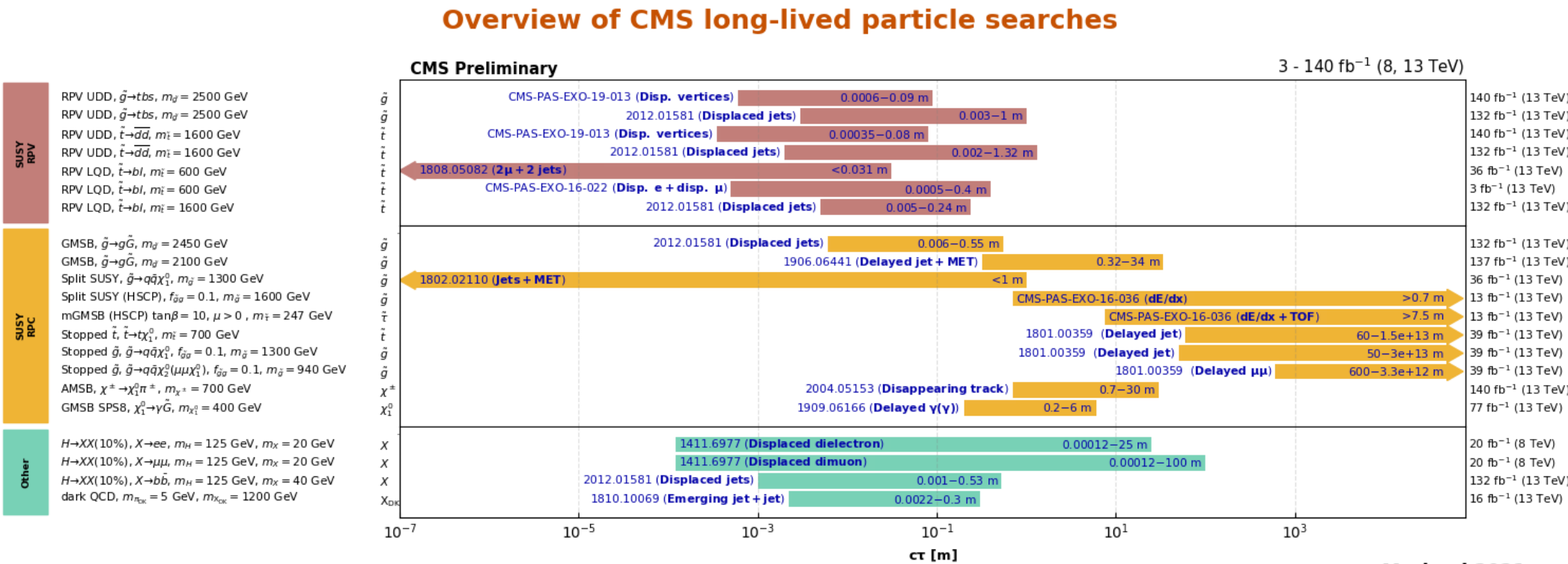
$$\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \sim -\frac{z^2}{\beta^2} \cdot \left[\ln\left(\frac{\beta^2}{(1-\beta^2)} \right) - \beta^2 + C \right]$$

- ◊ **مشاهده‌پذیر:** اتلاف انرژی ناشی از یونیزاسیون





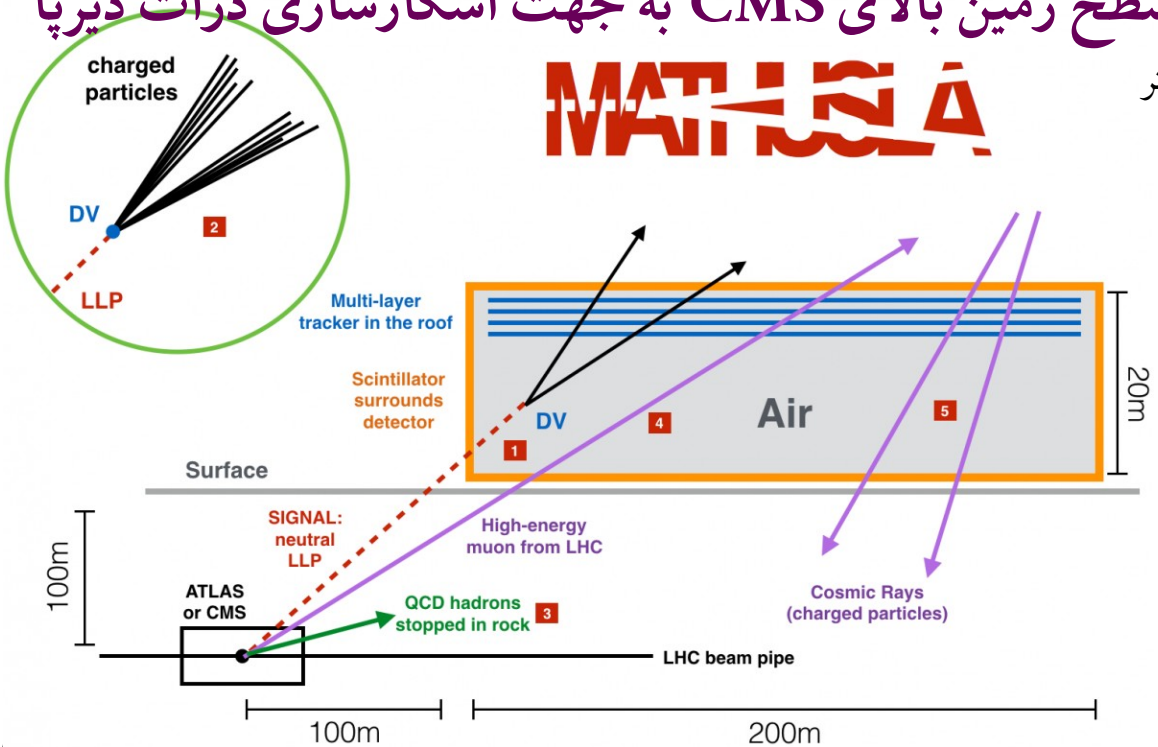
خلاصه نتایج CMS در اندازه‌گیری ذره دیرپا



Selection of observed exclusion limits at 95% C.L. (theory uncertainties are not included). The y-axis tick labels indicate the studied long-lived particle.

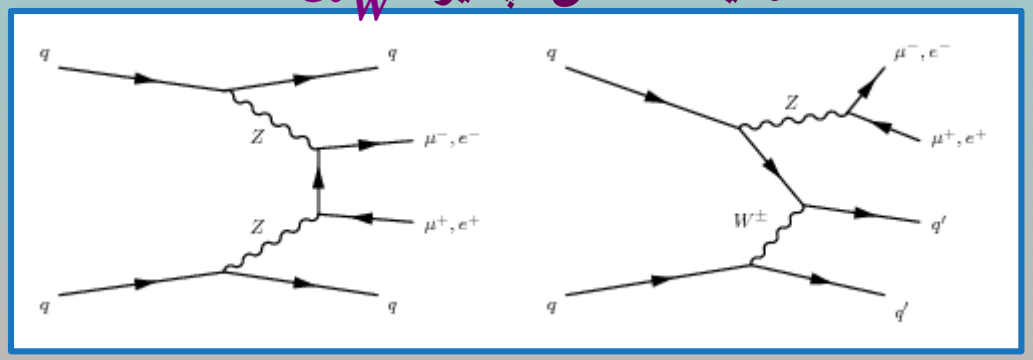
آشکارساز MATHUSLA

- آشکارساز MATHUSLA (MAssive Timing Hodoscope for Ultra-Stable neutraL pArticles) آزمایش پیشنهادی LHC است
- یک ابزار در ابعاد بزرگ روی سطح زمین بالای CMS به جهت آشکارسازی ذرات دیرپا
  - ابعاد آشکارساز: ۲۰ × ۲۰۰ × ۲۰۰ متر
- ذرات دیرپای خنثی بدون هیچ برهم‌کنشی مسیر ۱۰۰ متری را می‌پیمایند
- کنترل خوب روی زمینه‌های ناشی از هادرون‌ها
  - ۱۰۰ متر سنگ و صخره در امتداد مسیر
- زمان بهره‌برداری : ۲۰۲۵
  - همزمان با فاز HL-LHC

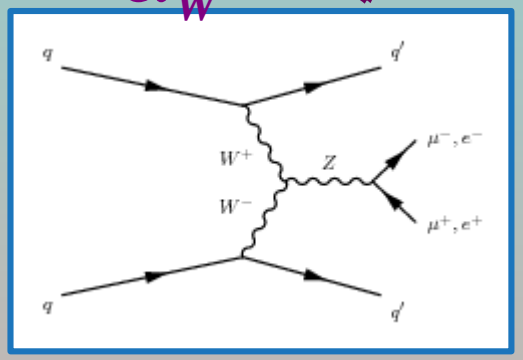


تولید Z+2jets از طریق همجوشی بوزون‌های برداری VBF

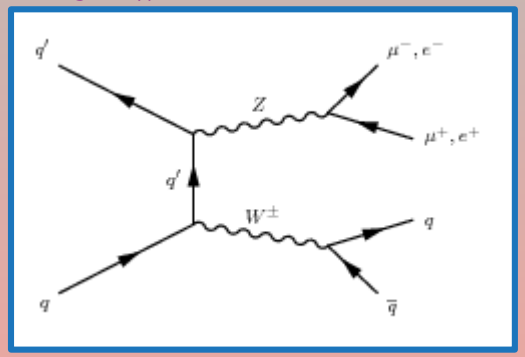
زمینه کاهش‌ناپذیر (α_W^4)



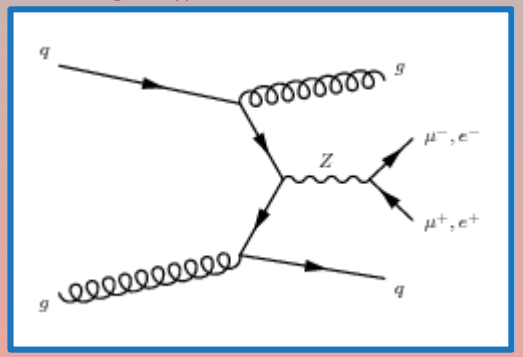
سیگنال (α_W^4)



زمینه دوبوزونی ($\alpha_s^2\alpha_W^2$)



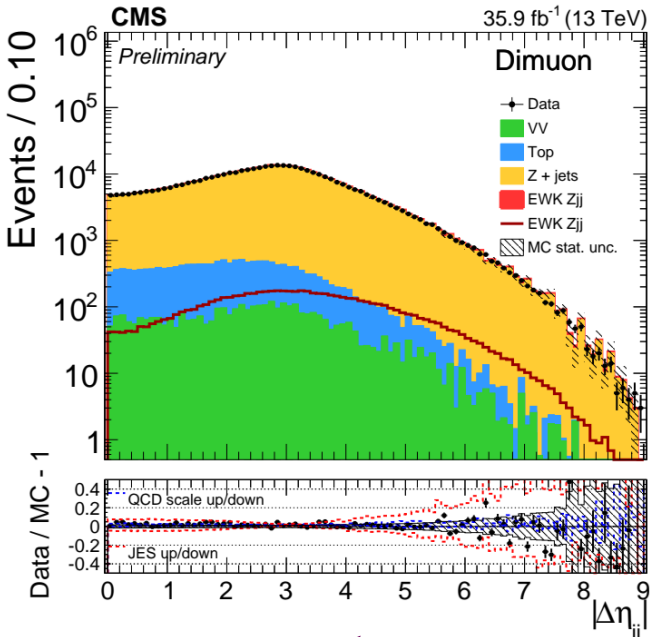
زمینه غالب ($\alpha_s^2\alpha_W^2$)



- حساسیت فرآیند به جفت‌شدگی سه‌تایه بوزون‌ها و وابستگی رتبه ۴ به α_W
- این آنالیز برای کل دیتای ران۲ انجام نشده
- سطح‌مقطع کم، نشانه‌های مشخص
  - حضور ۲ جت پرانرژی نزدیک پرتوهای ورودی
  - بازسازی بوزون Z با استفاده از ۲ لپتون تمیز

اندازه‌گیری VBF Z در آزمایش CMS

CMS-SMP-16-018

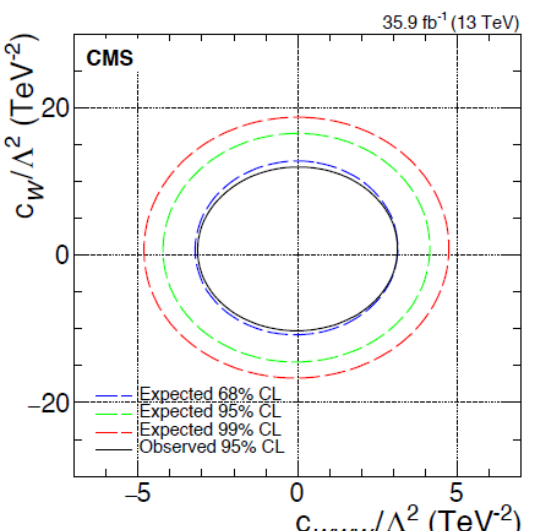


- دو میون تمیز (تکانه عرضی ۲۰GeV و ۳۰) در محدوده ردیاب
- دو جت (تکانه عرضی ۳۰GeV و ۵۰) با ناوردای جرم بیشتر از ۲۰۰
- جداسازی سیگنال از زمینه با استفاده از آنالیز چندمتغیره
- سطح‌مقطع اندازه‌گیری‌شده:

$$\sigma(\mathrm{EW}\ \ell\ell\mathrm{jj}) = 534 \pm 20\,(\mathrm{stat}) \pm 57\,(\mathrm{syst})\ \mathrm{fb} = 534 \pm 60\,(\mathrm{total})\ \mathrm{fb}$$

- در مقایسه با سطح‌مقطع نظری:

$$\sigma_{\mathrm{LO}}(\mathrm{EW}\ \ell\ell\mathrm{jj}) = 543 \pm 24\ \mathrm{fb}$$



- توافق مدل با داده تجربی -> اعمال قید روی پارامترهای جفت‌شدگی سه‌تایه بوزونی
- امکان بررسی درستی مدل استاندارد با اندازه‌گیری VBF Z
- لاگرانژی مؤثر با وجود عملگرهای مرتبه ۶ :

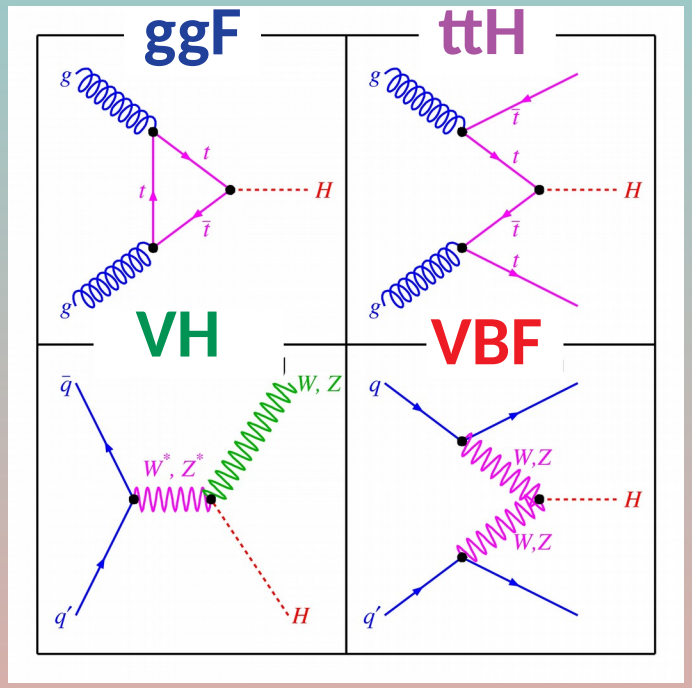
$$\mathcal{L} = \mathcal{L}^{SM} + \sum_i \frac{c_i}{\Lambda^2}\mathcal{O}_i$$

- بررسی رأس سه تایه بوزونی با استفاده از :

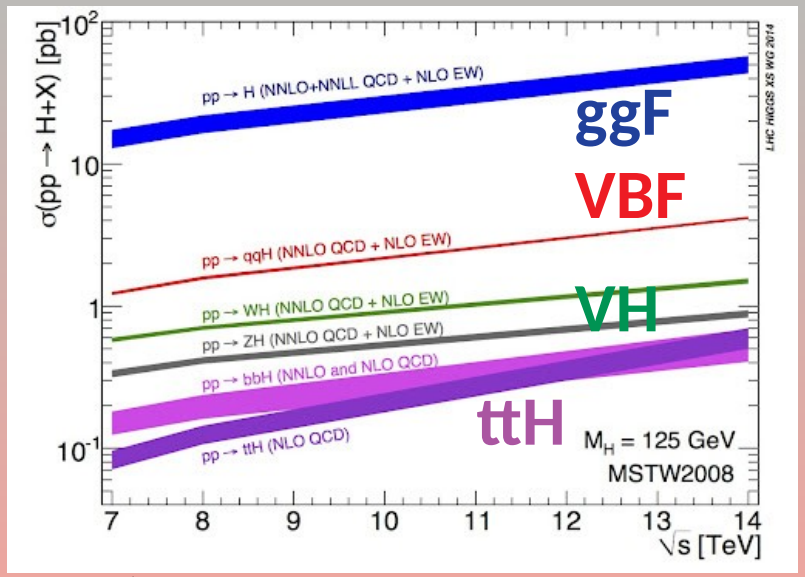
$$\mathcal{O}_{WWW} = \frac{c_{WWW}}{\Lambda^2} W_{\mu\nu} W^{\nu\rho} W^{\mu}_{\rho},$$

$$\mathcal{O}_W = \frac{c_W}{\Lambda^2} (D^\mu \Phi)^\dagger W_{\mu\nu} (D^\nu \Phi)$$

اهمیت مضاعف اندازه‌گیری سطح‌مقطع VBF Z+2jets

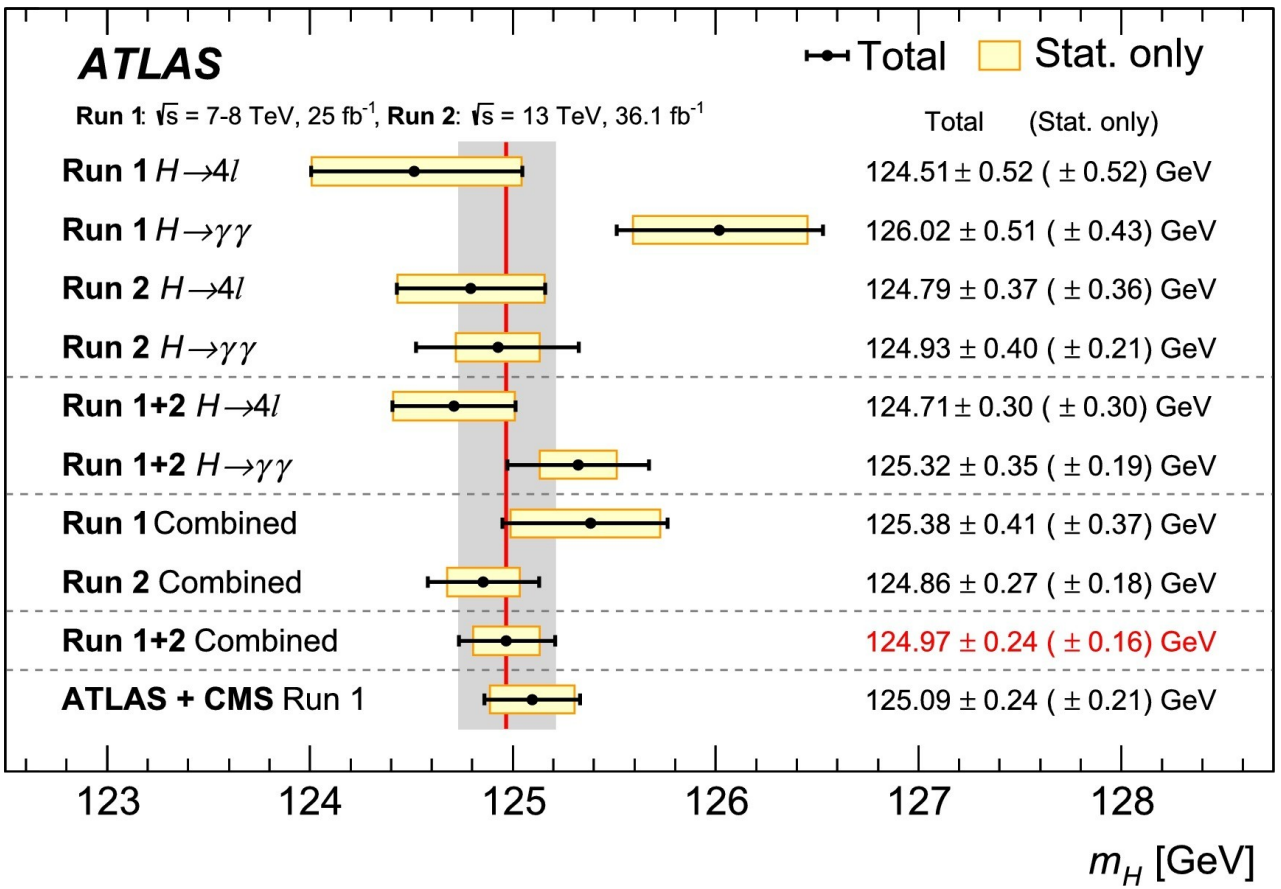


- **دومین کانال تولید هیگز: VBF**
  - اولین سطح‌مقطع در حد نمودارهای درختی
  - وابستگی مستقیم به رأس HVV
- **VBF Z زمینه غالب برای VBF Higgs**
  - شناخت بهترش باعث اندازه‌گیری دقیق‌تر سطح‌مقطع هیگز می‌شود



اسلایدهای پشتیبان

جرم بوزون هیگز



اندازه‌گیری جرم کوارک تاپ با استفاده از J/Ψ

CMS-TOP-15-014