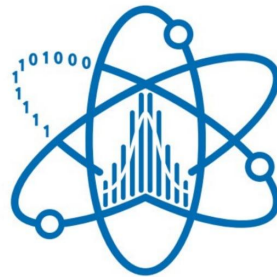


Введение в физику частиц и анализ экспериментальных данных

2 лекция



Введение

Физика частиц исследует фундаментальные кирпичики материи и взаимодействия между ними.

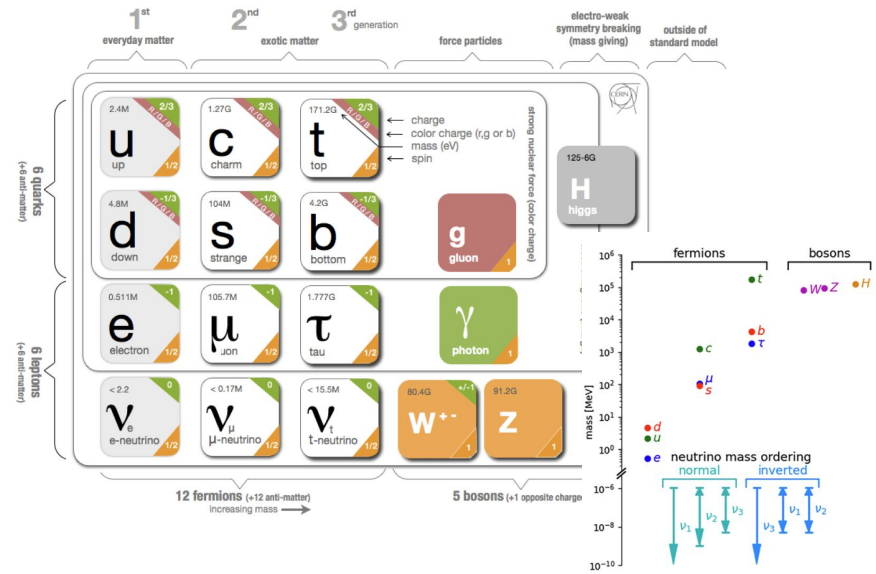
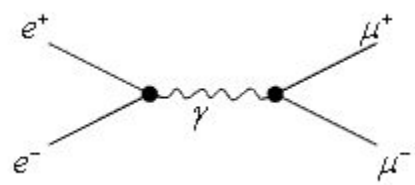
Высокие энергии необходимы для детектирования новых частиц, поскольку они соответствуют масштабу их масс.

Стандартная модель

- Содержит фермионы (кварки и лептоны) и бозоны (переносчики взаимодействий).
- Частицы организованы в три поколения, каждое из которых тяжелее предыдущего.
- **Нерешённые вопросы:** не объясняет гравитацию и тёмную материю, асимметрии вещества и антивещества ...

Фейнмановские диаграммы

Позволяют представлять взаимодействия в виде графических схем.



Бозон Хиггса и его роль

- Отвечает за механизм приобретения масс фундаментальными частицами.
- Открыт в 2012 году в экспериментах ATLAS и CMS на LHC.

Релятивистская кинематика в физике частиц

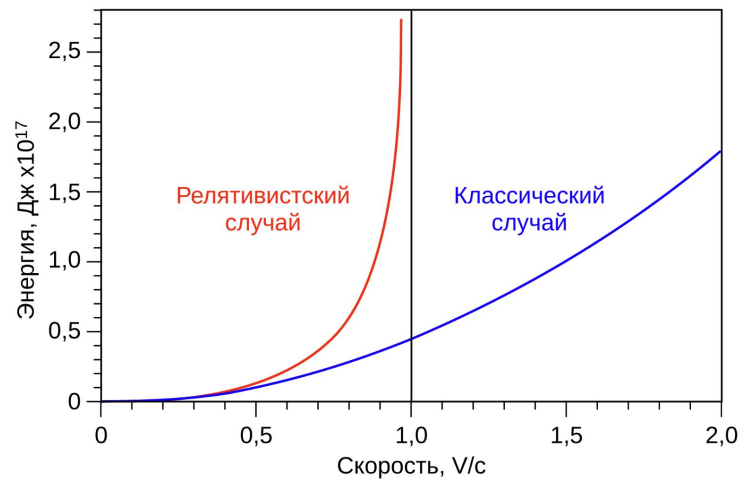
Вопрос: когда классическая механика неприменима?

Кинетическая энергия частиц в экспериментах обычно **O(100 GeV)**, что намного выше их энергии покоя.

Основные релятивистские эффекты

- $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$
- Лоренц-фактор (γ): $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$
- Замедление времени: $\Delta t' = \gamma \Delta t$

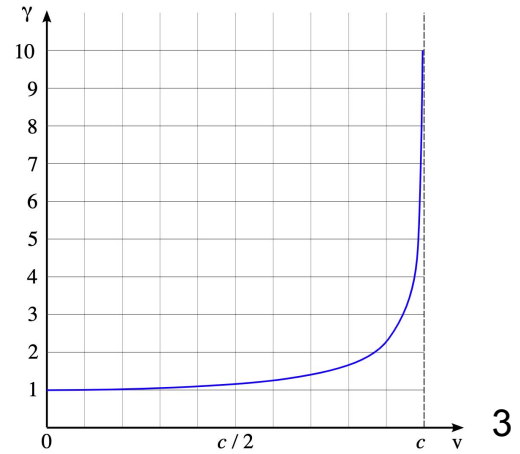
При малых скоростях релятивистская энергия совпадает с классической, но при $v \rightarrow c$ она резко возрастает



Примеры релятивистских частиц

- ♦ Протоны в LHC: 6.5 ТэВ – почти скорость света!
- ♦ Электроны в ускорителях: их масса мала, но энергия высока.

При низких скоростях $\gamma \approx 1$, а при $v \rightarrow c$ он стремится к бесконечности.



Формулы релятивистской кинематики

Основные уравнения энергии и импульса

Энергия и импульс частицы выражаются через Лоренц-фактор γ :

$$E = \gamma m, \quad |\vec{p}| = \gamma \beta m$$

где: $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad \beta = \frac{v}{c}$

Связь энергии и импульса: $E^2 = \vec{p}^2 + m^2$

Безмассовые частицы (фотоны): $E = |\vec{p}|$

Дополнительная энергия, возникающая из-за движения:

$$T = E - m = (\gamma - 1)m$$

Нерелятивистский предел $\beta \ll 1$: $T = \frac{1}{2}mv^2$

Формулы релятивистской кинематики

В релятивистской механике координаты и импульсы удобно выражать через **четырёх-вектора**:

$$p^\mu = (E, \mathbf{p}), \quad p_\mu = (E, -\mathbf{p})$$

$$x^\mu = (t, \mathbf{x}), \quad x_\mu = (t, -\mathbf{x})$$

Метрический тензор позволяет опускать и поднимать индексы:

$$p_\mu = g_{\mu\nu} p^\nu, \quad g_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Инвариантное скалярное произведение:

$$A^\mu B_\mu = A^0 B^0 - \mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$$

Четырёх-импульс и инвариантная масса:

$$p^\mu p_\mu = g_{\mu\nu} p^\mu p^\nu$$

$$E^2 - |\mathbf{p}|^2 = m^2$$

Инвариантная масса

Инвариантная масса иногда называется **энергией системы центра масс** или записывается как $\sqrt{s}$.

Что такое инвариантная масса?

- Инвариантная масса – это физическая величина, которая остаётся неизменной в любой системе отсчёта.
- Она играет ключевую роль в идентификации частиц в экспериментах, так как определяется через энергию и импульс продуктов их распада.

Для **одиночной частицы** инвариантная масса выражается через её энергию и импульс:

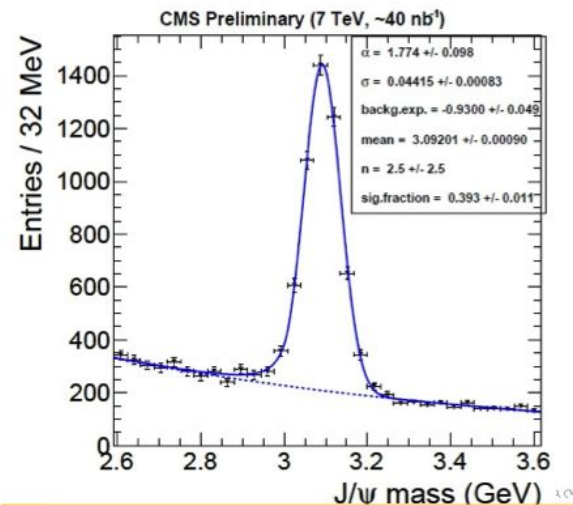
$$m^2 = E^2 - |\vec{p}|^2$$

Формула для системы частиц ($X \rightarrow 1 + 2 + \dots + n$)

$$M_X^2 = \left(\sum_{i=1}^n E_i \right)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \vec{p}_i \right)^2 \quad M_X^2 = ((E_1, \vec{p}_1) + (E_2, \vec{p}_2) + \dots)^2$$

Простой случай: распад $X \rightarrow 1 + 2$

$$M_X^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1 E_2 - |\vec{p}_1| |\vec{p}_2| \cos \theta)$$



Этот метод активно применяется в поиске новых частиц в экспериментах **ATLAS** и **CMS** на **Большом адронном коллайдере**

Роль Z-бозона в слабом взаимодействии

Z-бозон как переносчик слабого взаимодействия

- В отличие от W^+ и W^- , не изменяет заряды частиц.
- Ответственен за **нейтральные токи слабого взаимодействия**, обеспечивающие рассеяние без изменения типа частиц.
- Важен для понимания взаимодействий нейтрино.

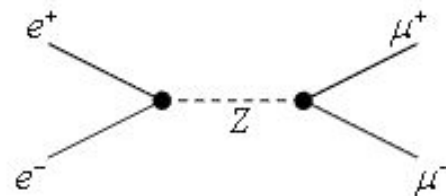
Физический смысл

- Позволяет нейтрино рассеиваться без превращения в другие частицы.
- Объясняет редкие слабые взаимодействия, которые невозможно описать только W-бозонами.

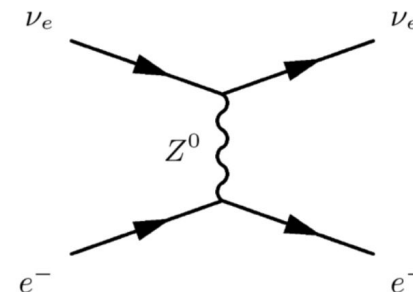
Экспериментальное обнаружение

- Z-бозон был открыт в 1983 году в **CERN** на коллайдере **SPS** (эксперименты UA1 и UA2).
- Позже изучен детально на **LEP** (Large Electron-Positron Collider), где измерили его массу (~ 91.2 ГэВ) и ширину.

Участвует во всех типах слабых взаимодействий



Вклад в аннигиляцию частиц:



Рассеяние нейтрино

Распад Z-бозона: основные каналы

Z-бозон распадается на **различные группы частиц** с разными вероятностями.

10% случаев → пары заряженных лептонов

- e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, $\tau^+\tau^-$ (примерно 3.36% на каждый канал)

20% случаев → распад на нейтрино

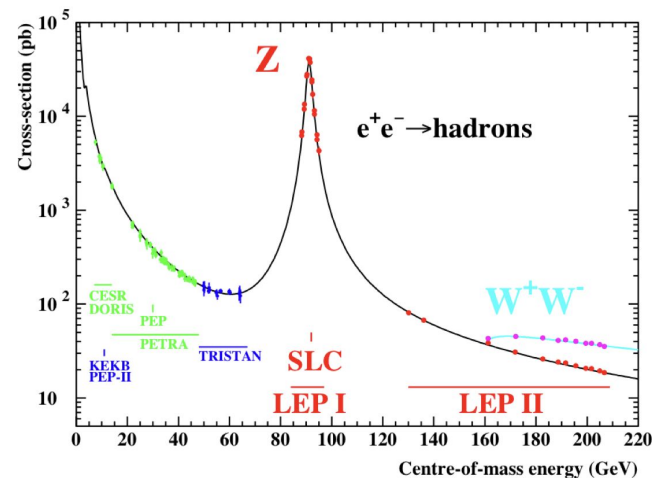
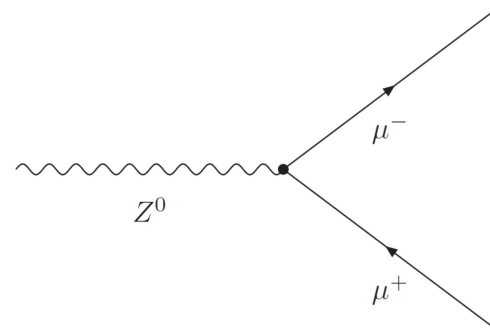
- $\nu\nu^-$ (не наблюдаются детекторами, но вычисляются по "пропавшей" энергии)

70% случаев → распад на кварки → джеты

- Z-бозон может распадаться на **кварк – антикварк**
- В детекторе проявляется как «джеты» – потоки частиц

Экспериментальная проверка

- Пик сечения на **91.2 ГэВ** подтвердил существование Z-бозона.



Хиггс бозон

Хиггс-бозон: частица, дающая массу

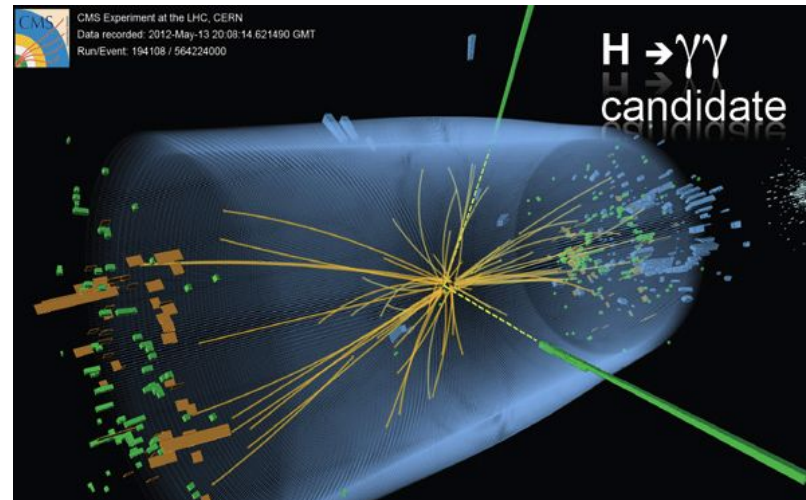
- Бозон Хиггса — это **ключевая частица** в Стандартной модели.
- Он является **квантовым возбуждением поля Хиггса**, которое придаёт массу другим частицам.
- Без механизма Хиггса **фундаментальные частицы остались бы безмассовыми**, а Вселенная была бы совсем другой.

Почему Хиггс-бозон так сложно обнаружить?

- **Редкость рождения:** На LHC он рождается примерно **раз в 10 миллиардов столкновений**.
- **Мгновенный распад:** Хиггс-бозон живёт **$\approx 10^{-22}$ секунд** и сразу распадается.
- Нужно искать "подпись" распада, например, $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell^*$.

Открытие в 2012 году

- Эксперименты **ATLAS** и **CMS** собрали данные и подтвердили существование Хиггса.
- **Масса бозона** ≈ 125 ГэВ, что совпадает с предсказаниями.
- График справа показывает, как экспериментально найден пик событий на **125 ГэВ**, соответствующий бозону Хиггса.

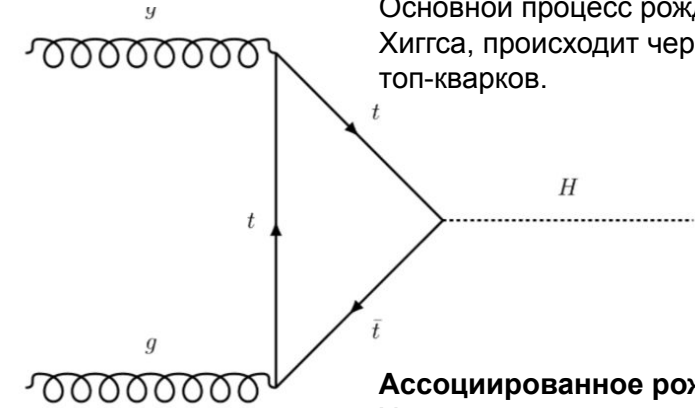


Одно из событий рождения хиггсовского бозона и его распада на два фотона, зарегистрированных детектором CMS.

Хиггс бозон

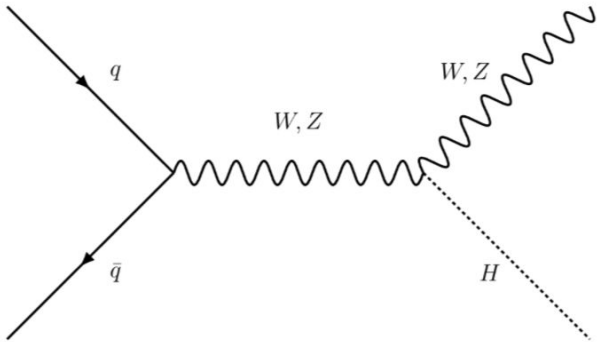
Глюонное слияние (ggF) (~87%)

Основной процесс рождения Хиггса, происходит через петлю топ-кварков.



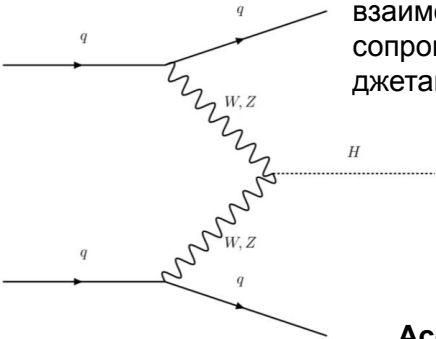
Ассоциированное рождение с W/Z (~5%)

Хиггс рождается вместе с W или Z бозоном.



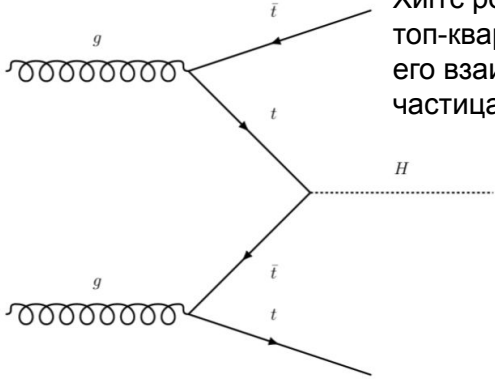
VBF (Векторное рассеяние W/Z) (~7%)

Хиггс рождается в результате взаимодействия W и Z бозонов, сопровождается "форвардными" джетами.



Ассоциированное рождение с топ-кварками (~1%)

Хиггс рождается вместе с парой топ-кварков, что помогает изучать его взаимодействие с тяжелыми частицами.



Идентификация бозона Хиггса через его распады

- Бозон Хиггса имеет **чрезвычайно малое время жизни** ($\sim 10^{-22}$ сек).
- Это делает **прямое обнаружение невозможным** – мы можем регистрировать **только его продукты распада**.

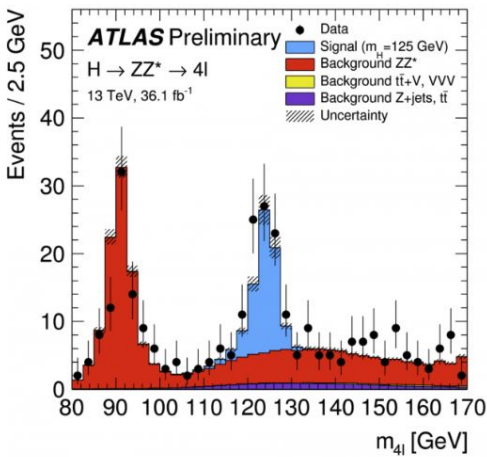
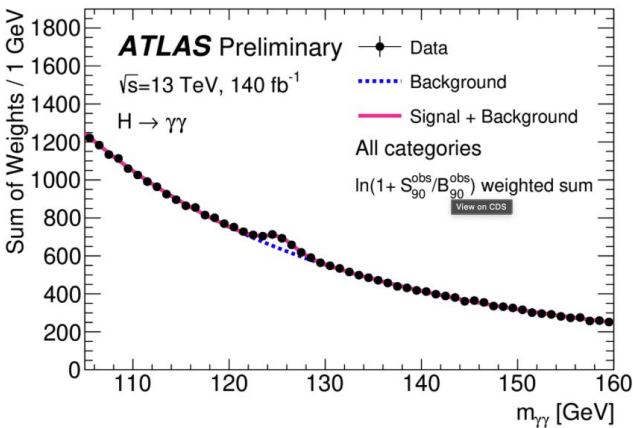
Основные распады

Decay channel	Branching ratio	Rel. uncertainty
$H \rightarrow \gamma\gamma$	2.28×10^{-3}	+5.0% -4.9%
$H \rightarrow ZZ$	2.64×10^{-2}	+4.3% -4.1%
$H \rightarrow W^+W^-$	2.15×10^{-1}	+4.3% -4.2%
$H \rightarrow \tau^+\tau^-$	6.32×10^{-2}	+5.7% -5.7%
$H \rightarrow b\bar{b}$	5.77×10^{-1}	+3.2% -3.3%
$H \rightarrow Z\gamma$	1.54×10^{-3}	+9.0% -8.9%
$H \rightarrow \mu^+\mu^-$	2.19×10^{-4}	+6.0% -5.9%

Чистый канал,
редкий

Золотой канал, легко
идентифицируемый

Наиболее частый, но
сложный для
детектирования.



Распад бозона Хиггса $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$

Бозон Хиггса может распадаться разными способами, но один из наиболее чистых сигналов:

$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$$

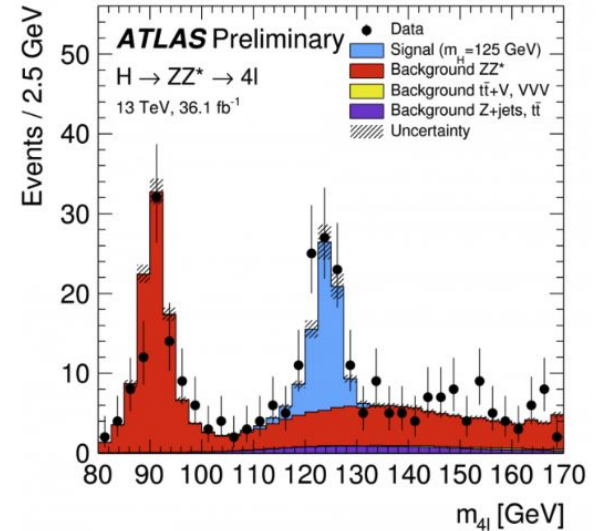
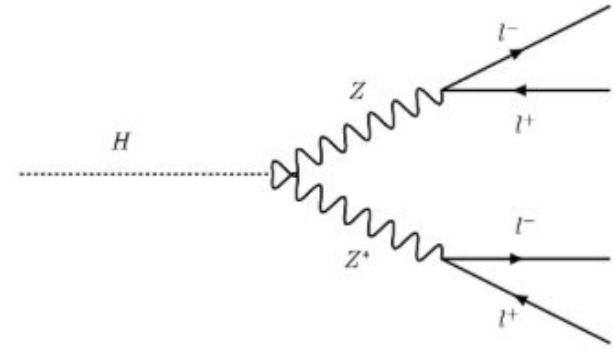
где ℓ – заряженные лептоны (электроны или мюоны).

Почему именно этот канал?

- **Четыре лептона** в финальном состоянии легко реконструировать.
- **Чистый сигнал**, так как лептоны менее подвержены влиянию адронных фонов.
- Возможность построить **инвариантную массу системы**, чтобы найти пик около **125 ГэВ** – массы бозона Хиггса.

Подтверждение наличия бозона Хиггса

- **Реконструируем инвариантную массу** системы 4-х лептонов.
- **Ожидаем увидеть пик в районе 125 ГэВ** – массы бозона Хиггса.



Фоновые процессы (backgrounds)

Основные фоны в этом канале:

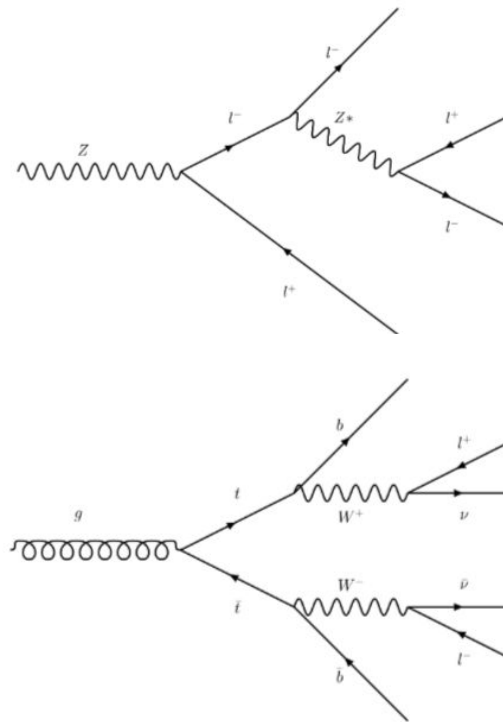
1. **Ирредуцируемый фон:** не прямое рождение ZZ без участия Хиггса.
2. **Редуцируемый фон:**
 - — дополнительные лептоны из ошибочно реконструированных джетов.
 - — пары топ-кварков, где мюоны могут появляться из полураспадов тяжелых кварков.

Как подавить фоновый вклад? (Cuts)

Исключаем события с **большим недостающим импульсом (MET)**, так как не содержат невидимых частиц.

Проверяем, что **инвариантная масса пар лептонов** соответствует массе Z (~ 91 ГэВ)

Исключаем события с лептонами, которые могут быть **misidentified jets**.



Отличие сигнала от фона

Свойства лептонов в распаде $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$

- Бозон Хиггса **нейтрален** и имеет **нулевое лептонное число**.
- Сумма зарядов конечных лептонов **должна быть равна нулю**.
- Сумма их **лептонных чисел должна быть нулевой**.

Фильтрация данных (cuts)

- Исключаем события, где **заряд и лептонное число конечных частиц не удовлетворяют этим условиям**.
- Такие "срезы" данных помогают повысить **отношение сигнала к фону** и сделать детекцию Хиггса более точной.

Что такое Z^* ?

- это **виртуальный Z-бозон**, который **не находится на своей массовой оболочке (off-shell)**.
- Это означает, что его масса **не обязательно равна стандартным 91 ГэВ** (массе обычного Z).