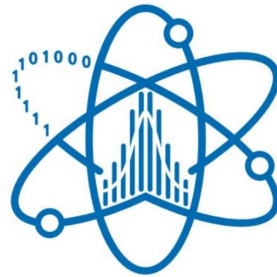


# Введение в физику частиц и анализ экспериментальных данных

## 6 лекция

---



# Предыдущая лекция

Что такое трек в детекторе ATLAS и зачем он нужен?

Какие параметры трека в ATLAS важны для его анализа?

Что такое топо-кластер в калориметре и зачем он нужен?

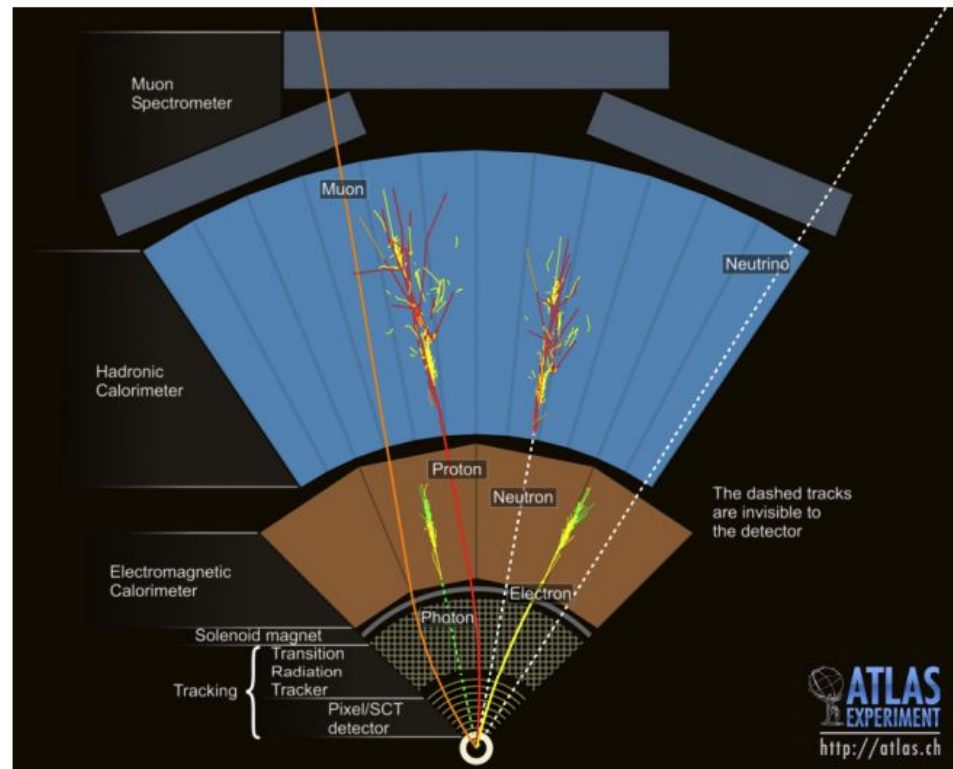
Как в ATLAS определяются электроны и фотоны?

Какие проблемы возникают при реконструкции фотонов и как ATLAS их решает?

Почему идентификация тау-лептонов отличается от

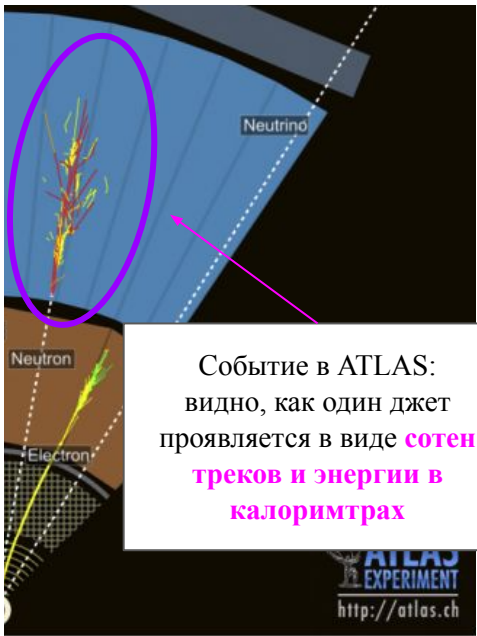
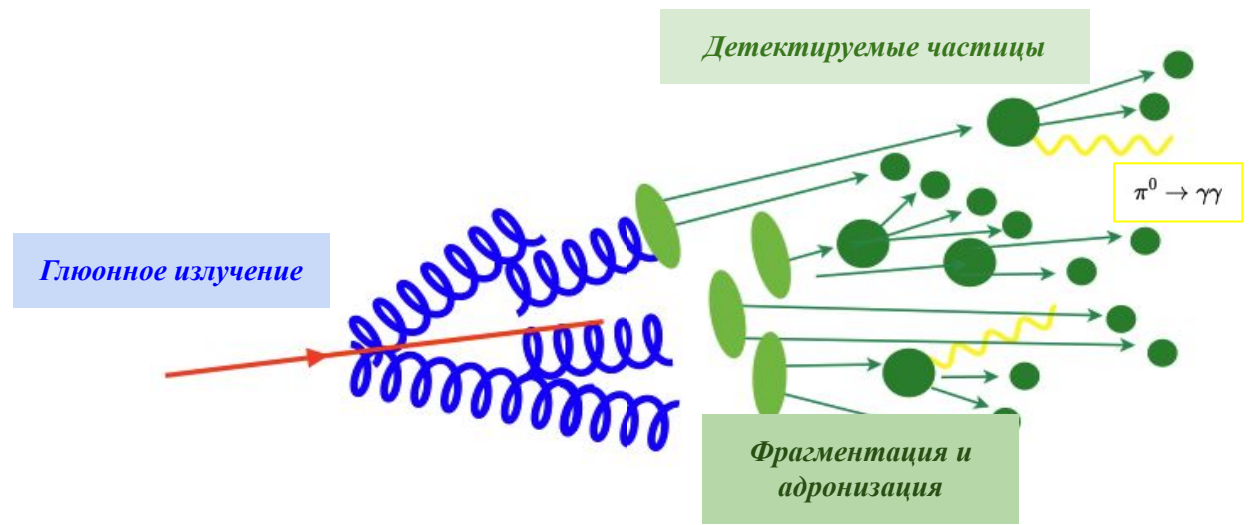
других лептонов

Что такое pile-up?



# Что такое джет (jet) и откуда он берётся?

Когда кварки и глюоны образуются во время столкновения... → Они распадаются на ещё больше глюонов и кварков... → которые затем адронируются в стабильные (или нестабильные) частицы → **Нужно измерить не одну частицу, а сотни за одно событие.**

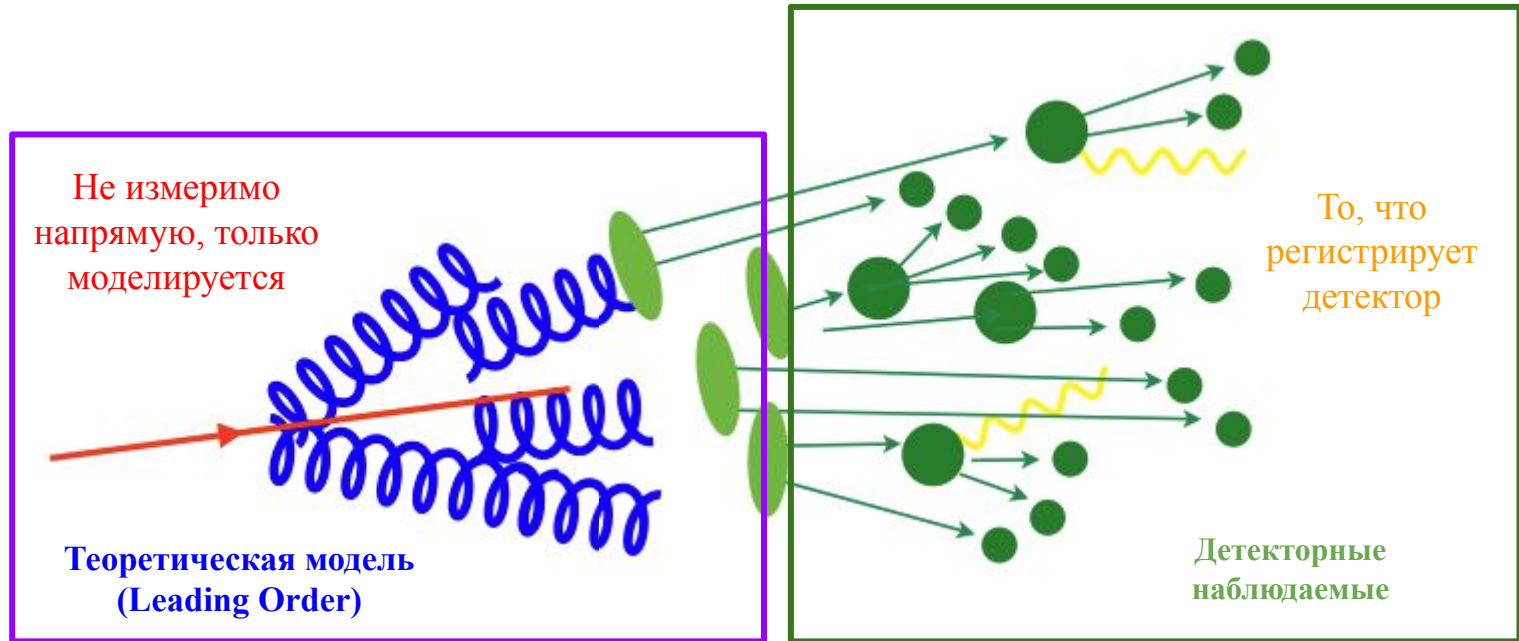


Событие в ATLAS: видно, как один джет проявляется в виде **сотен треков и энергии в калоримтрах**

Глоссарий:  
**Конфайнмент** – запрет на свободные кварки  
**Фрагментация** – рождение адронов из струи кварков/глюонов  
**Джет** – пучок частиц, рожденных из одного исходного кварка или глюона

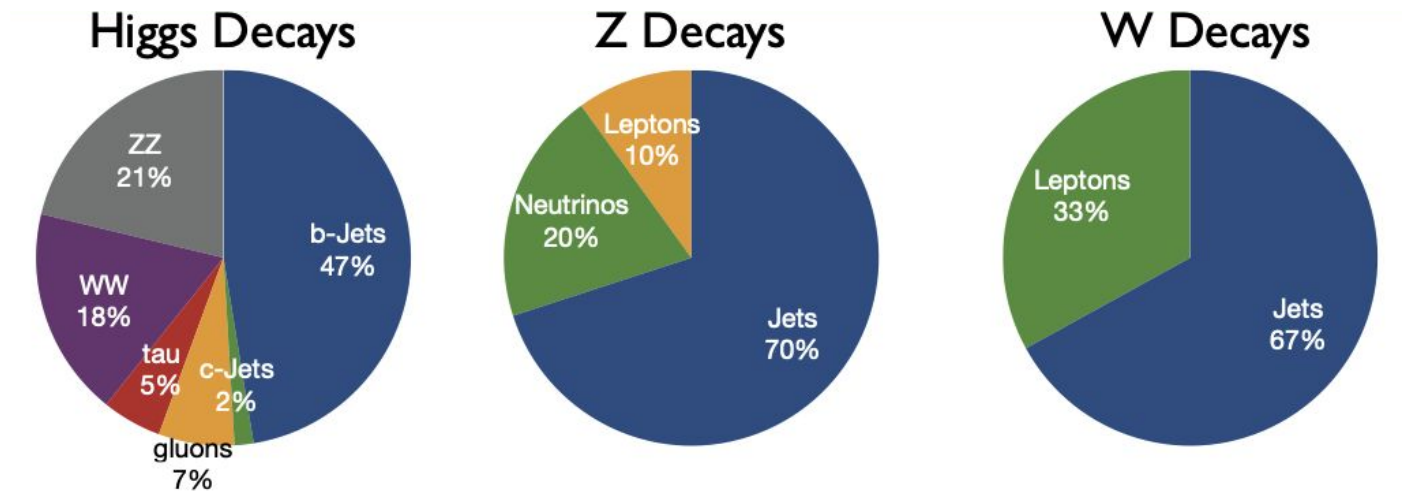
Сечение детектора по η-φ

# От теории к измерениям



- Конечные стабильные частицы — это то, **что можно измерить**.
- Картина с кварками/глюонами — это **приближение ведущего порядка**

# Почему джеты так важны в анализах ЛНС?

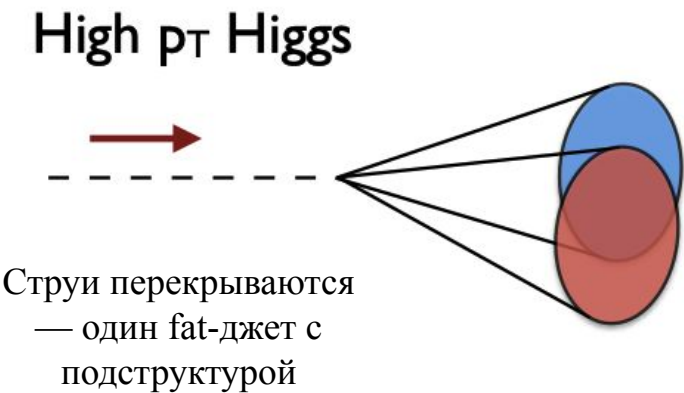
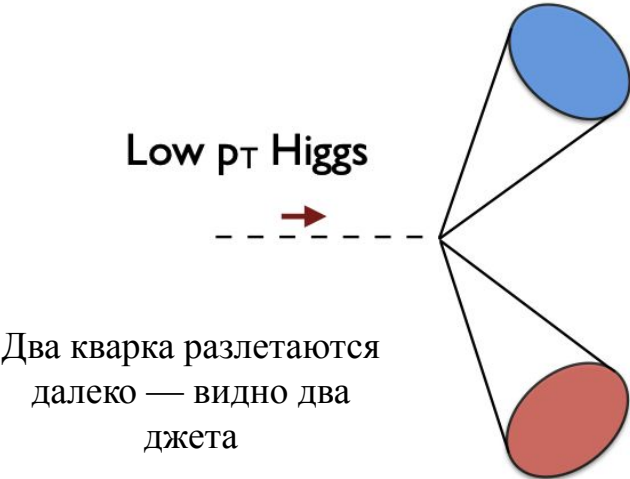


**Большинство бозонов Хиггса, W и Z распадаются на джеты!**

- Джеты присутствуют почти в любых измерениях или поисках электрослабых взаимодействий.
- Фон может быть высоким, но отсутствие фона не помогает, когда нет сигнала.
- Особенно при "высокой массе", когда фон естественно низкий, высокие коэффициенты ветвления джетов могут помочь сохранить редкие сигналы.

# Восстановление распада частиц

Предположим, что  $H \rightarrow b\bar{b}$



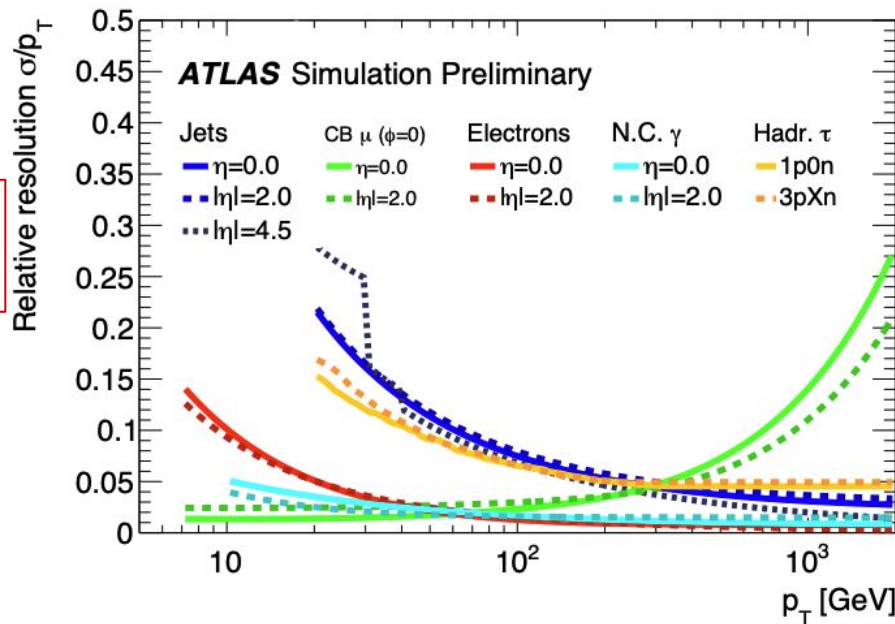
| Сценарий   | Джеты          | Метод анализа            |
|------------|----------------|--------------------------|
| Low $p_T$  | 2 узких джета  | Реконструкция 2 b-джетов |
| High $p_T$ | 1 широкий джет | Fat jet + substructure   |

# Разрешающая способность объектов

- Джеты — самые «трудные» объекты:
  - разрешение **намного хуже**, чем у других частиц (электронов, фотонов, мюонов и т.д.)

$$\text{Разрешение} = \frac{\sigma}{p_T}, \quad \text{меньше — лучше!}$$

лучшие объекты  
(электроны, фотоны)  
худшие (джеты)



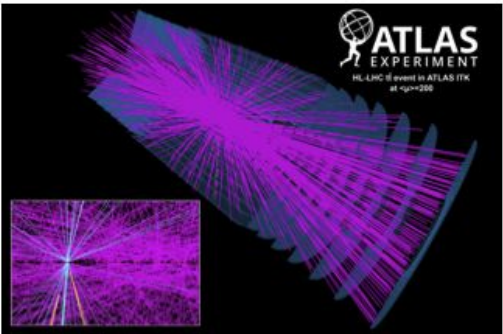
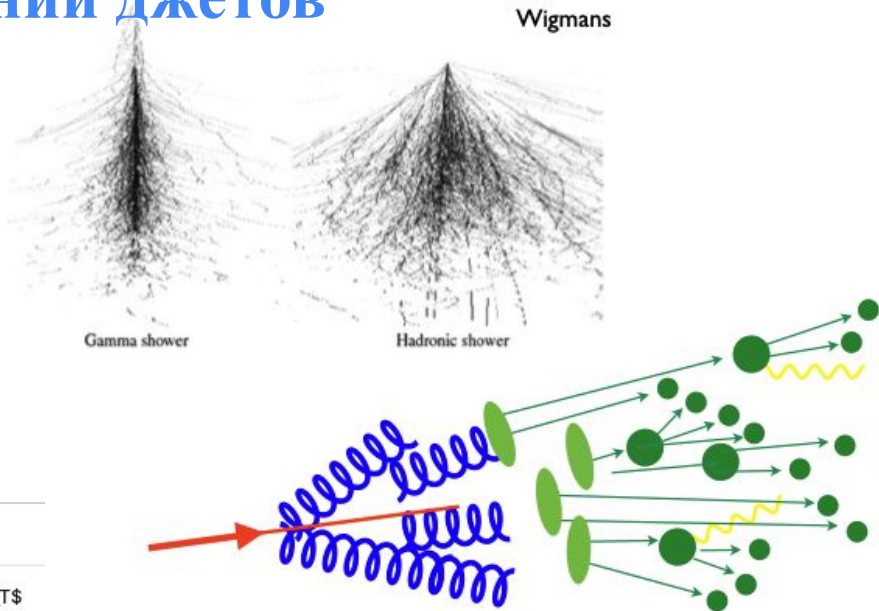
Джеты — это наша основная экспериментальная  
сложность

# Флуктуации и вызовы в измерении джетов

- 1. Флуктуации в отдельных ливнях частиц
- 2. Флуктуации в фрагментации/адронизации и т. д.
- 3. Флуктуации из-за pile-up

| Источник флуктуации    | Примеры                                                               | Последствия                |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| EM vs Hadronic showers | $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ vs $\pi^\pm \rightarrow \text{ядро}$ | Ширина/форма ливня         |
| Фрагментация           | Кол-во и энергия адронов                                              | Разное распределение $p_T$ |
| Pile-up                | Наложение других событий                                              | Ложный вклад в джет        |

Больше флуктуаций ведет к худшим измерениям и худшему разрешению.



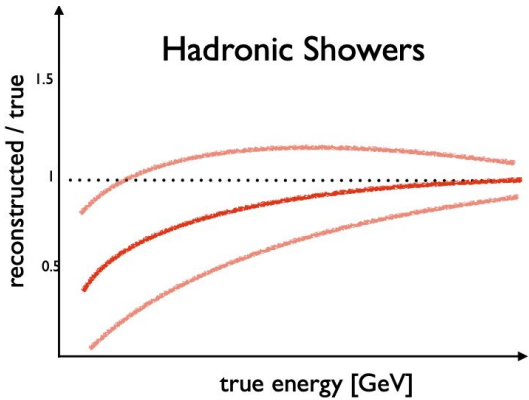
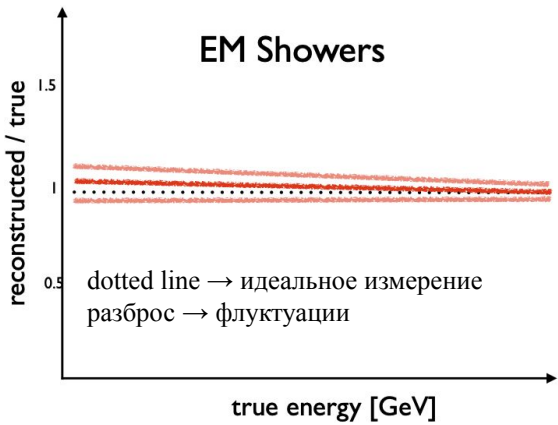
# Каскады частиц

**Электромагнитные (ЭМ) каскады** — **простые**: участвует только электромагнитное взаимодействие.

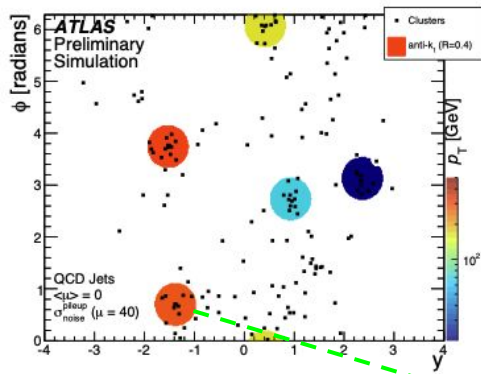
Возможны только такие процессы:  $\gamma \rightarrow e e$  и  $e \rightarrow e + \gamma$

**Адронные каскады** связаны с КХД (квантовой хромодинамикой): это гораздо более сложные процессы, включая возбуждение ядер — и **не все из них мы можем зарегистрировать!**

| Признак            | ЕМ каскады                | Адронные каскады           |
|--------------------|---------------------------|----------------------------|
| Тип взаимодействия | Электромагнитное          | КХД                        |
| Продукты           | $e \pm, \gamma$           | $\pi \pm, \pi^0, n$ , ядра |
| Вариативность      | Низкая (стабильная форма) | Высокая (флуктуации)       |
| Разрешение энергии | Хорошее                   | Плохое                     |

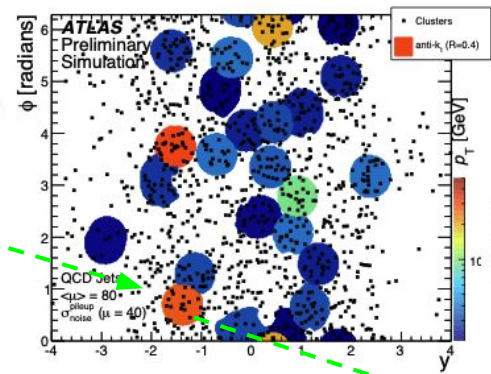


# Pile-up - вызов для реконструкции джетов



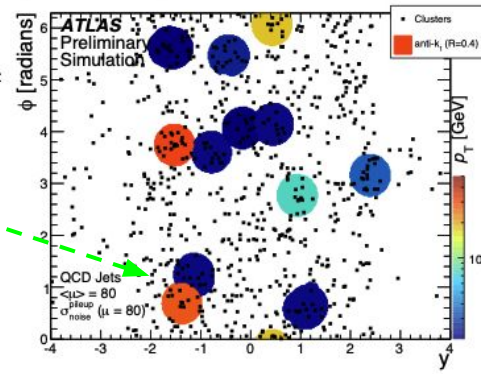
No pileup

$\mu = 80$ , no noise thresh



«Истинный» джет

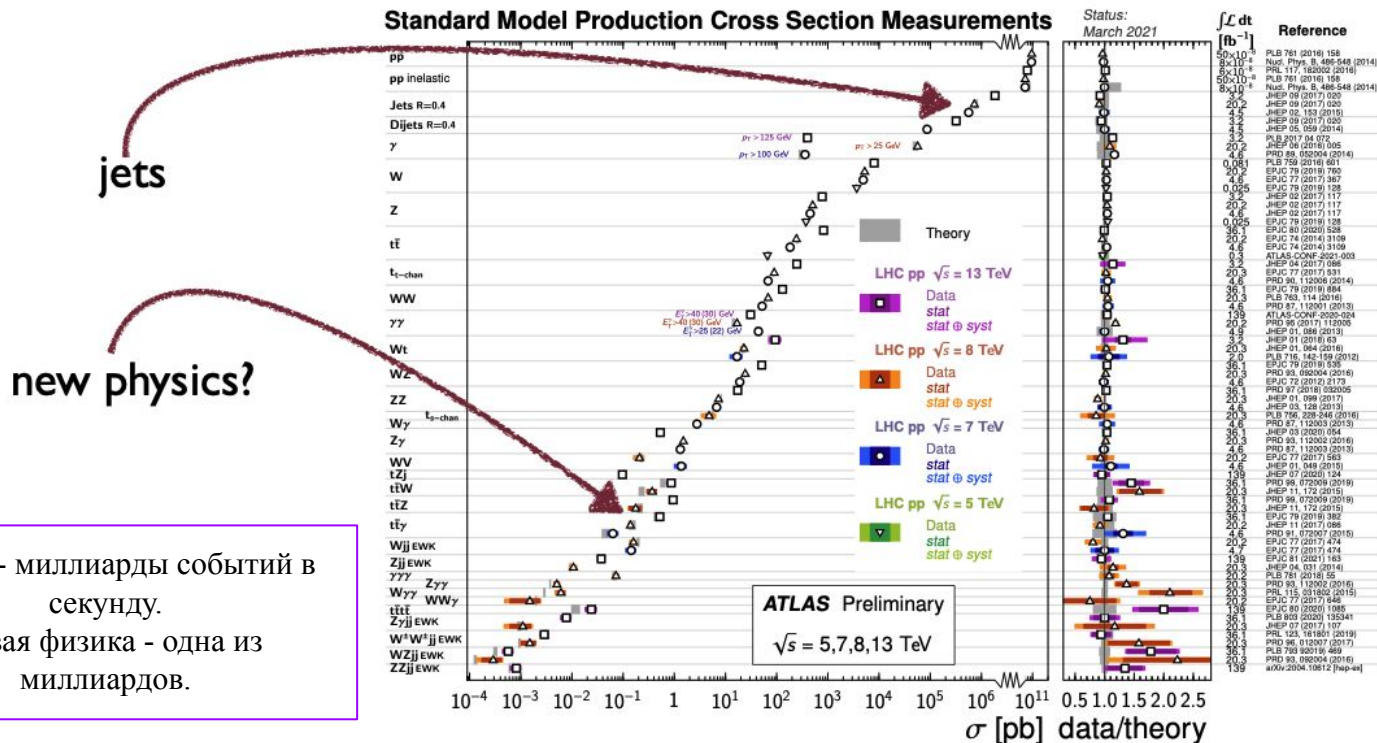
$\mu = 80$ , w/ noise thresh



$\mu$  = среднее число наложенных  $pp$ -столкновений на одно событие

Pile-up приводит как к ложным джетам, так и к загрязнению джетов

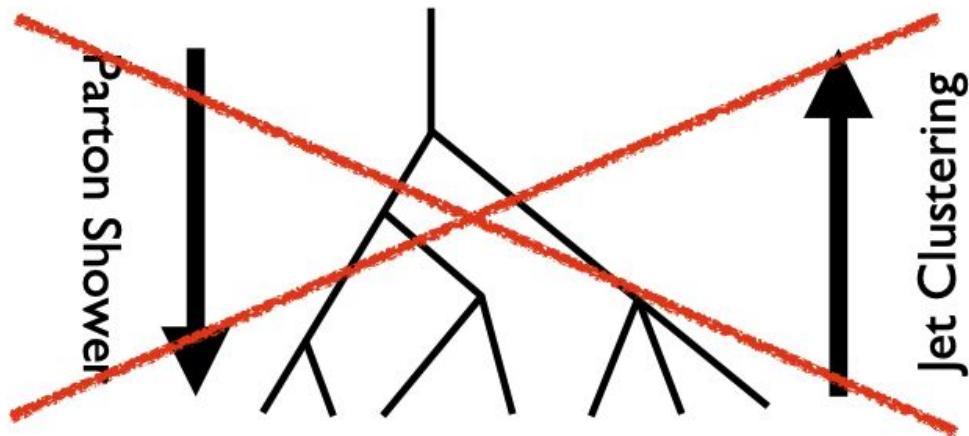
## Джеты самый большой фон на LHC



## Поперечное сечение джетов на БАК огромное: оно создает огромный фоновый сигнал для триггеров, измерений, поисков...

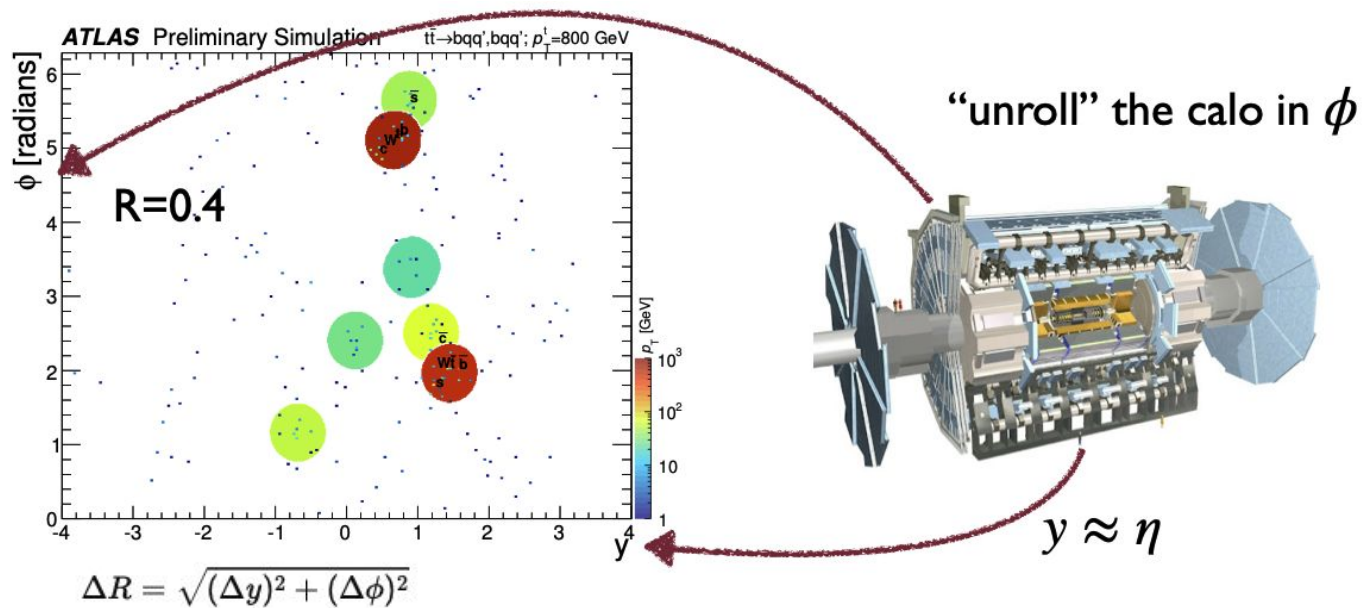
# Кластеризация джетов

- Джет алгоритмы являются обратными к партонному ливню



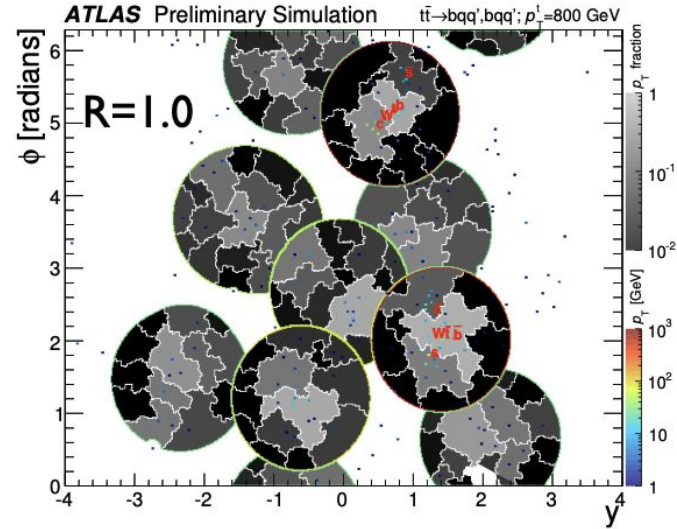
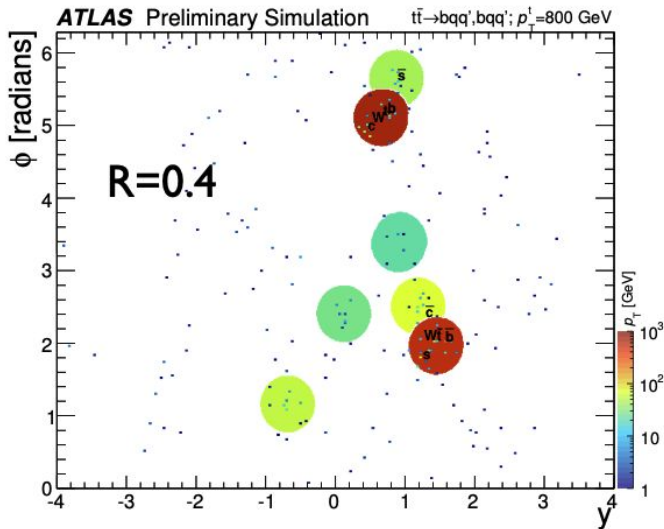
- Но партонный ливень на самом деле **не инвертируем!**
- Существует множество способов развития партонного ливня: **нет уникального обратного процесса!**
- Нет "правильной" кластеризации, есть только **лучше** или **хуже**.
- Кластеризация** — это то, что мы выбираем: обычно стремимся к **“collinear” and “infrared” safety**
- В итеративных алгоритмах кластеризации определяется метрика расстояния и суммируются 4-векторы ближайших пар, пока не достигается критерий остановки.

# Радиус джета: основной параметр алгоритма кластеризации



Алгоритмы струй определяются параметром радиуса: он задает критерий остановки.

## Как влияет параметр $R$ на форму джета?



Джет алгоритмы определяются параметром радиуса: он задает критерий остановки.

## ATLAS обычно использует $R=0.4$ и $R=1.0$

# Алгоритмы кластеризации джетов

- Алгоритм кластеризации – группирует частицы события в джеты.
- Инфракрасная и коллинеарная безопасность (IRC-безопасность):
  - Устойчивость к добавлению мягких частиц с энергией.
  - Устойчивость к расщеплению одной частицы на две с тем же направлением.

## Формула кластеризации

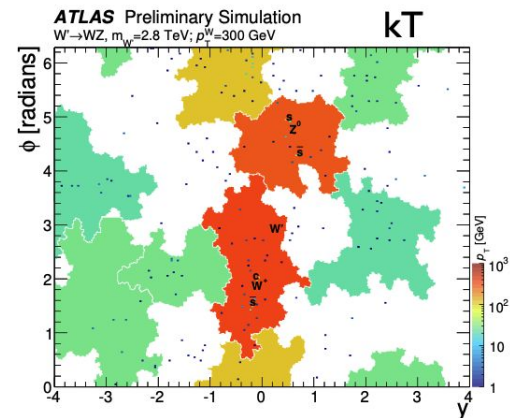
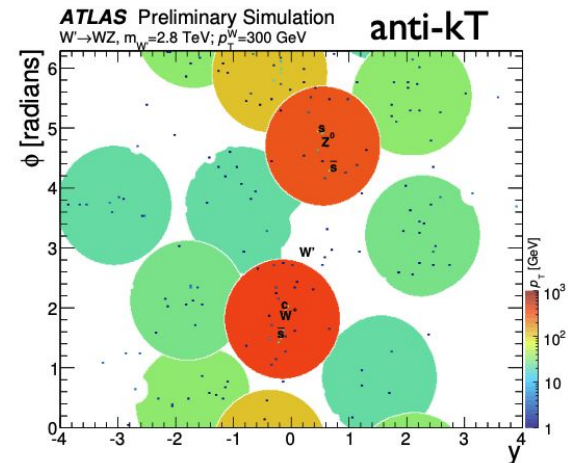
$$d_{ij} = \min(p_{Ti}^{2p}, p_{Tj}^{2p}) \frac{\Delta R_{ij}}{R^2}, \quad d_i = p_{Ti}^{2p}$$

где  $\Delta R_{ij}^2 = (y_i - y_j)^2 + (\phi_i - \phi_j)^2$ .

Параметр  $p$  определяет тип алгоритма:

- $p = -1 \rightarrow$  анти- $k_t$  (стандартный алгоритм).
- $p = 1 \rightarrow k_t$  (имитирует фрагментацию).
- $p = 0 \rightarrow$  Кембридж/Аахен (кластеризация по углу).

Leads to anti- $k_T$  and  $k_T$  algorithms: circular shapes vs. “organic” shapes

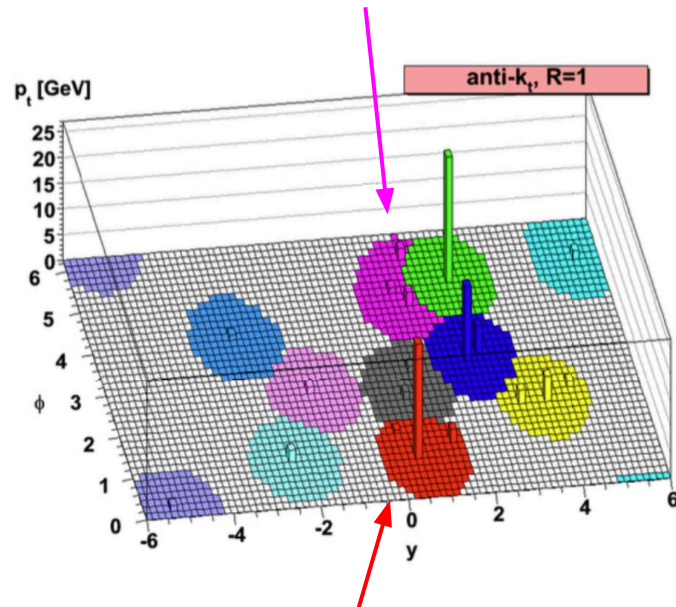


# Как работает кластеризация anti- $k_T$ ?

$$d_{ij} = \min \left( p_{Ti}^{2p}, p_{Tj}^{2p} \right) \frac{\Delta R_{ij}}{R^2}, \quad d_i = p_{Ti}^{2p}$$

- Рассчитать  $d_{ij}$  и  $d_i$  для всех частиц.
- Найти минимальное значение  $d = \min(d_{ij}, d_i)$ :
  - Если  $d = d_{ij}$  объединить джеты  $i$  и  $j$ .
  - Если  $d = d_i$  то  $i$  становится финальным джетом.
- Повторять до тех пор, пока все частицы не будут сгруппированы.
- Начинает кластеризацию вокруг самых жестких частиц (с наибольшим  $p_T$ ).
- Джеты имеют **правильные границы, близкие к коническим**.

Полуокружности для  
сублидирующих джетов.



Коническая форма  
основных джетов.

# Топо-кластеры

**Топо-кластеры** — метод для восстановления энергии в калориметре ATLAS. Формируются по значимости сигнала:

энергия ячейки

$$\zeta_{\text{cell}}^{\text{EM}} = \frac{E_{\text{cell}}^{\text{EM}}}{\sigma_{\text{noise, cell}}^{\text{EM}}}$$

ожидаемый шум

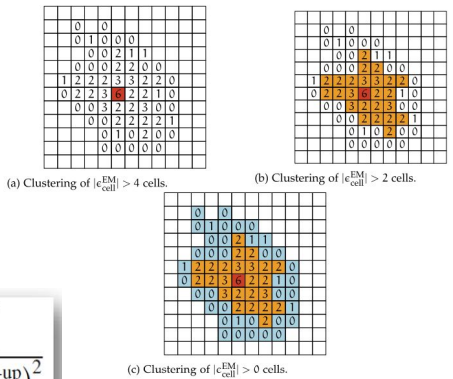
Этапы построения:

- 1. **Инициализация:** Ячейки с  $\zeta_{\text{cell}}^{\text{EM}} > 4$ .
- 2. **Рост:** Добавление соседних ячеек ( $\zeta_{\text{cell}}^{\text{EM}} > 2$ ).
- 3. **Граница:** Добавление периметра ( $\zeta_{\text{cell}}^{\text{EM}} > 0$ ).
- 4. **Разделение:** топо-кластер делится на два, если в нем есть два локальных максимума энергии

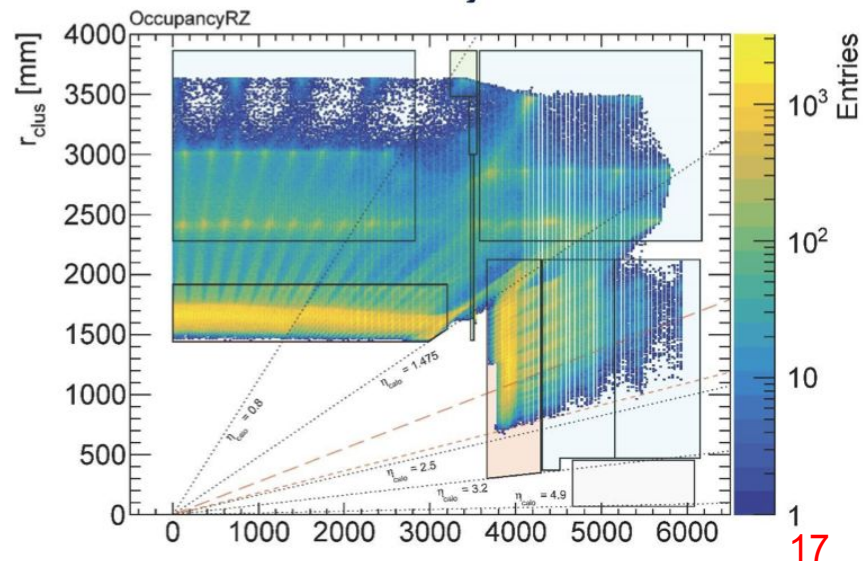
Джеты с расстоянием  $R = 0.4$  называются **ЕМТоро джетами** и представляют индивидуальные кварки и глюоны.

В реконструкции учитываются только топо-кластеры с **положительной суммарной энергией**.

Схема формирования топо-кластеров в калориметре ATLAS



$$\sigma_{\text{noise}} = \begin{cases} \sigma_{\text{noise}}^{\text{electronic}} & < 2011 \\ \sqrt{(\sigma_{\text{noise}}^{\text{electronic}})^2 + (\sigma_{\text{noise}}^{\text{pile-up}})^2} & \geq 2011 \end{cases}$$

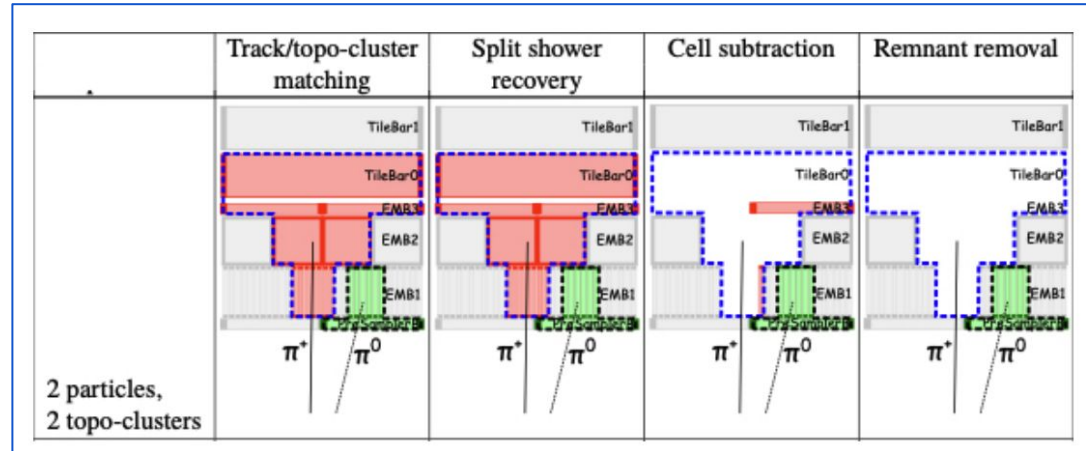


# Particle Flow

- **PFlow объекты** — это объекты, полученные из данных эксперимента, которые содержат информацию о частицах (например, адронах), их энергии и траекториях.
- Они формируются из треков и топо-кластеров (групп энергии, измеренной в детекторе).

## Основные шаги:

- **Вычитание энергии:**  
предотвращение двойного учета энергии от треков и кластеров.
- **Сопоставление треков с топо-кластерами:**  
треки сопоставляются с кластерами, если они несут  $>10\%$  энергии трека.
- **Восстановление разделенного ливня:**  
объединение соседних топо-кластеров, если энергия трека меньше ожидаемой.
- **Формирование PFlow джетов:**  
Полученные PFlow объекты группируются в джеты с использованием алгоритма **anti-kT**.



# Как отличить реальные джеты от фона

- **HS джеты** — это джеты, происходящие от кварков и глюонов в процессе жесткого рассеяния (hard scatter).
- **PU джеты** — джеты, происходящие от фонового pile-up (PU) вершин, не связанных с основным вершинным процессом.

## Jet Vertex Fraction (JVF):

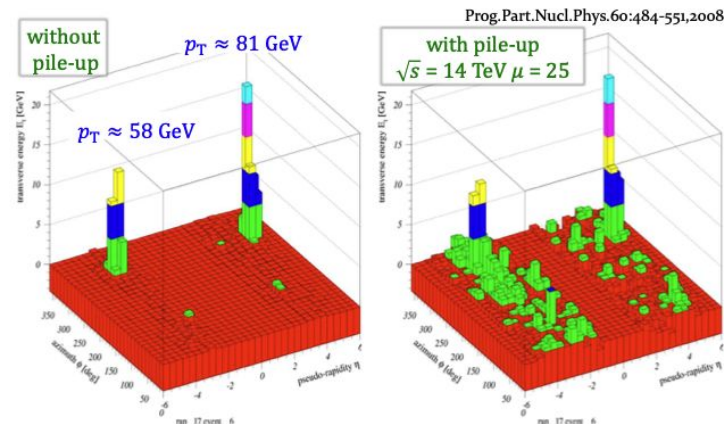
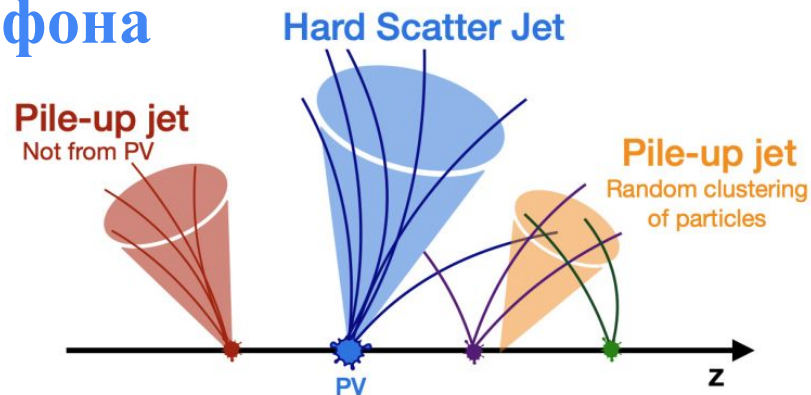
- JVF используется для проверки, от основной ли вершины пришел джет.
- **Исправленный JVF (corrJVF)** учитывает зависимость от PU вершин, корректируя зависимость от числа PU треков.

## Распределение $R_{pT}$ :

- $R_{pT}$  измеряет энергию джета, происходящего от основной вершины.
- HS джеты имеют более высокие значения  $R_{pT}$ , а PU джеты — низкие.

## Jet Vertex Tagger:

- используется для выделения HS джетов на основе переменных JVF и  $R_{pT}$



# Boosted jets

- Используются для представления джетов от бозонов *Higgs*, *W* и *Z*.
- Кластеризуются с использованием топо-кластеров с параметром  $R=1.0$

## Процесс очистки (trimming):

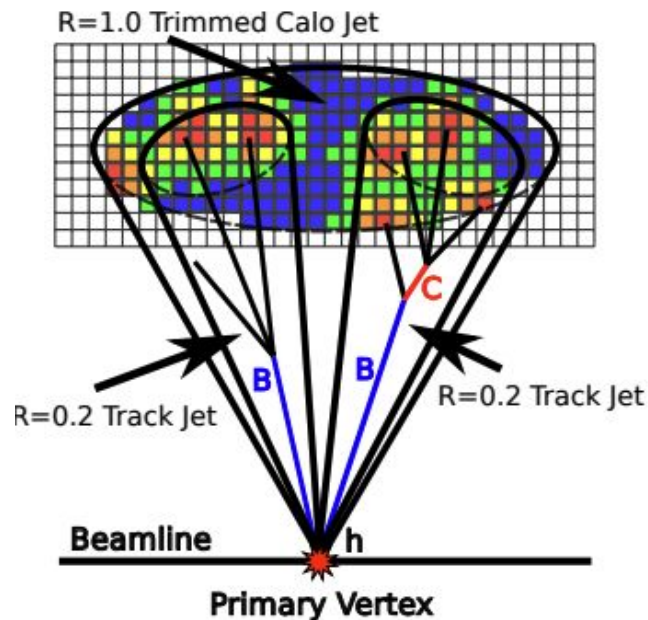
- Используется для уменьшения влияния фона, такого как пиле-ап столкновения и начальное излучение.
- Частицы с  $p_T$  менее 5% от общей энергии джета удаляются из большого джета.

## Подклассификация джетов:

- Большие джеты перераскладываются в "подджеты" с параметром  $R=0.2$  для удаления несущественных составляющих.

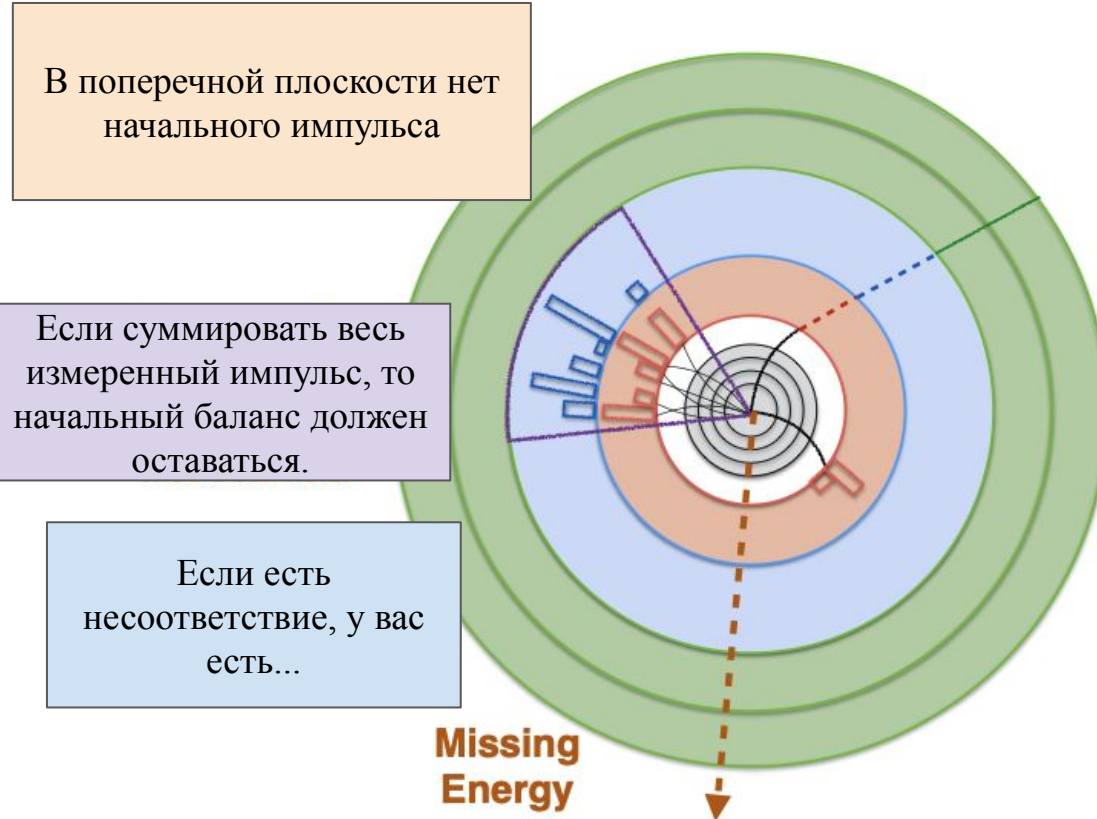
## Идентификация пронгов (substructure):

- Используются джеты, кластеризованные из треков (track jets), для поиска hard prongs внутри большого джета.
- Prongs выделяются с использованием алгоритмов b-tagging.



Для учета более точной реконструкции треков при коллимированных распадах используется **Variable Radius (VR)** для реконструкции джетов с переменным радиусом.

Радиус для каждого джета обратно пропорционален  $p_T$  предложенного джета, как указано в уравнении  $R_{eff} = \rho/p_T$ , где  $\rho$  — параметр, устанавливающий масштаб радиуса джета.



# Расчёт MET: hard и soft term

$$\mathbf{E}_T^{\text{miss}} = - \sum_{\text{selected electrons}} \mathbf{p}_T^e - \sum_{\text{accepted photons}} \mathbf{p}_T^\gamma - \sum_{\text{accepted } \tau\text{-leptons}} \mathbf{p}_T^{\tau_{\text{had}}} - \sum_{\text{selected muons}} \mathbf{p}_T^\mu - \sum_{\text{accepted jets}} \mathbf{p}_T^{\text{jet}} - \sum_{\text{unused tracks}} \mathbf{p}_T^{\text{track}}$$

The diagram illustrates the calculation of MET as the negative sum of transverse momenta of various particles. The terms are grouped into two categories:

- Hard term (purple box):** Includes the transverse momenta of selected electrons, accepted photons, accepted  $\tau$ -leptons, selected muons, and accepted jets. These are represented as  $\mathbf{E}_T^{\text{miss}, e}$ ,  $\mathbf{E}_T^{\text{miss}, \gamma}$ ,  $\mathbf{E}_T^{\text{miss}, \tau_{\text{had}}}$ ,  $\mathbf{E}_T^{\text{miss}, \mu}$ , and  $\mathbf{E}_T^{\text{miss}, \text{jet}}$  respectively.
- Soft term (green box):** Includes the transverse momentum of unused tracks, represented as  $\mathbf{E}_T^{\text{miss}, \text{soft}}$ .

A purple dashed arrow points from the text "Hard term" to the purple box, and a green dashed arrow points from the text "Soft term" to the green box.

- Суммируйте 2-вектора всех выбранных объектов: это будет «жесткий термин» (hard term).
- Но затем у нас есть дополнительная энергия от частиц, которые не образуют джеты или другие частицы.
- Это «мягкий термин» (soft term), который особенно важен, когда масштаб жесткого термина не очень высок.

# Практические сложности

На практике ...

- Мягкий термин: частицы с низким импульсом  $p_T$ : самые сложные для измерения.
- Каждый объект нужно обрабатывать правильно, без дублирования.
- Удаление перекрытий — это даже более сложная задача, чем сам анализ...
- Джеты и все их проблемы (плохое разрешение, ложные джеты и т. д.).

# Подведение итогов

|                                     | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------------------------------------|---|---|---|---|
| 1. Ерофеев Дмитрий Витальевич       |   |   |   |   |
| 2. Бернгардт Андрей Евгеньевич      |   |   |   |   |
| 3. Жидков Кирилл Евгеньевич         |   |   |   |   |
| 4. Петрова Ольга Владимировна       |   |   |   |   |
| 5. Махманазаров Рамдас Миршакарзода |   |   |   |   |
| 6. Чалый Никита Андреевич           |   |   |   |   |
| 7. Вологжин Матвей Алексеевич       |   |   |   |   |
| 8. Старков Дмитрий Николаевич       |   |   |   |   |
| 9. Плетнев Никита Николаевич        |   |   |   |   |
| 10. Полищук Илья Романович          |   |   |   |   |
| 11. Агафонов Глеб Олегович          |   |   |   |   |
| 12. Конов Иван Александрович        |   |   |   |   |
| 13. Акимов Иван Максимович          |   |   |   |   |
| 14. Неда Фироз                      |   |   |   |   |
| 15. Цыден Дашицыренов               |   |   |   |   |