

Наблюдение эффекта "квантовой запутанности" при анализе спиновых корреляций в парном рождении топ и анти-топ кварков в эксперименте АТЛАС.

Нарышкин Ю.Г.

Семинар ОФВЭ ПИЯФ, 17.10.2023

# План семинара

- Введение
- Квантовая запутанность в двухчастичной системе
- Критерии сепарабельности
- Топ кварк, его свойства и квантовая запутанность
- Спиновая матрица плотности и спиновые корреляции
- Анализ данных
- Результат

# Квантовая запутанность

- Запутанными состояниями (англ. "entangled states") называются такие состояния, в которых определенные характеристики/наблюдаемые входящих в них микросистем связаны ("запутаны" или "сцеплены") между собой при помощи какого-либо закона сохранения, т.е. состояние одного объекта нельзя описать независимо от другого.
- Такая взаимозависимость сохраняется, даже если эти объекты разнесены в пространстве за пределы любых известных взаимодействий. Измерение параметра одной частицы сопровождается мгновенным прекращением запутанного состояния другой, что может находиться в логическом противоречии с принципом локальности, который говорит о том, что на объект влияет только его непосредственное окружение, но при этом информация не передаётся и теория относительности не нарушается.
- Квантовая запутанность является неотъемлемым свойством квантовой механики.
- Исследования квантовой запутанности проводились в различных экспериментах, с использованием фотонов, атомов, мезонов, нейтрино, но она никогда не изучалась для пары кварков !!!
- В 2022 году Ален Аспект, Джон Клаузер и Антон Цайлингер получили нобелевскую премию за эксперименты с запутанными фотонами, установление нарушения неравенств Белла и исследования в области квантовой информатики.

# Квантовые системы

В квантовой механике различают два типа квантовых состояний: **чистые и смешанные**

- Чистое состояние – это полностью известное квантовое состояние, если объект находится в чистом состоянии, значит про него вся информация. Чистые состояния полностью описываются волновыми функциями  $|\psi_i\rangle$ . Если система находится в состояниях  $\Phi_n$  с вероятностями  $p_n$ , то систему можно описать с помощью матрицы плотности:

$$\rho = \sum_n p_n |\Phi_n\rangle \langle \Phi_n|$$

- Для чистого состояния  $\rho^2 = \rho$ , а для смешанного  $\rho^2 < \rho$ .
- Системы, состоящие из нескольких подсистем так же описываются матрицей плотности.
- Одним из требований к матрице плотности является то, что она должна быть положительно определенной, т.е. ее собственные значения не отрицательны (и в сумму равны 1, поэтому имеют смысл вероятностей).
- Диагональные элементы матрицы плотности можно интерпретировать как вероятности системы находится в определенном состоянии.
- Если сложная система может быть образована из **независимых** подсистем, то она является **не запутанной**, если ее можно представить в виде:  $\rho^{AB} = \sum_i p_i \rho_i^A \otimes \rho_i^B$ , если нельзя т.е. матрица плотности объединенной системы не может быть получена, как сумма прямых произведений матриц  $\rho_i^A$  и  $\rho_i^B$ :  $\rho^{AB} \neq \sum_i p_i \rho_i^A \otimes \rho_i^B$ , и полную систему нельзя образовать простым соединением невзаимодействующих физических подсистем то такая система является **запутанной**.

# Критерии сепарабельности

## Критерий Шмидта

Если квантовая система состоит из двух подсистем (два ортонормированных наборов векторов состояния  $|\phi_i\rangle$  и  $|\psi_j\rangle$  описывают две части системы), то ее можно представить в виде разложения Шмидта:

$$|\Phi\rangle = \sum_{i,j} c_{i,j} |\phi_i\rangle |\psi_j\rangle \quad \Rightarrow \quad |\Phi\rangle = \sum_i^k \lambda_i |i_\phi\rangle |i_\psi\rangle \quad (\rho = \sum p_i |i\rangle \langle i|, \rho = \sum p_j |j\rangle \langle j| - \text{матрицы плотности подсистем})$$

Где  $\lambda_i$  - неотрицательные числа (коэффициенты Шмидта), удовлетворяющие условию  $\sum_i \lambda_i^2 = 1$ , а наборы базисных состояний  $i_\phi, i_\psi$  образуют ортонормированную систему.

Число **ненулевых** значений коэффициентов Шмидта  $\lambda_i$  называется числом Шмидта  $k$  для вектора состояния  $|\Phi\rangle$ . Чистое двухчастичное состояние считается запутанным тогда, когда число Шмидта  $k > 1$ .

---

## Критерий Переса-Городецкого

Переса – Городецкого является необходимым условием для объединенной матрицы плотности двух квантово-механических систем.

Согласно критерию Переса-Городецкого, для того, чтобы между двумя системами была запутанность необходимо и достаточно, чтобы у частично транспонированной матрицы плотности системы существовало хотя бы одно отрицательное собственное значение:

$$\rho^{AB} = \sum_i p_i \rho_i^A \otimes \rho_i^B$$

$\Rightarrow$

$$\rho^{T_2} = \sum_n p_n \rho_n^a \otimes (\rho_n^b)^T$$

# Примеры запутанных состояний

- Примером запутанного состояния является система двух частиц со спином  $\frac{1}{2}$  (кубиты)
- В системе с двумя частицами со спином  $1/2$ , измеренными по заданной оси, каждая частица может быть либо со спином вверх, либо со спином вниз, поэтому всего система имеет четыре базовых состояния:  $\uparrow\uparrow, \uparrow\downarrow, \downarrow\uparrow, \downarrow\downarrow$

$$\left. \begin{aligned} |1, 1\rangle &= \uparrow\uparrow \\ |1, 0\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(\uparrow\downarrow + \downarrow\uparrow) \\ |1, -1\rangle &= \downarrow\downarrow \end{aligned} \right\} s = 1 \quad (\text{triplet})$$

Триплет (полный угловой момент = 1)

$|1, 1\rangle, |1, -1\rangle$  - спины параллельны (коррелируют)  $\rightarrow$  состояния **не запутаны**

$$|0, 0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(\uparrow\downarrow - \downarrow\uparrow) \left. \right\} s = 0 \quad (\text{singlet})$$

Синглет (полный угловой момент = 0)

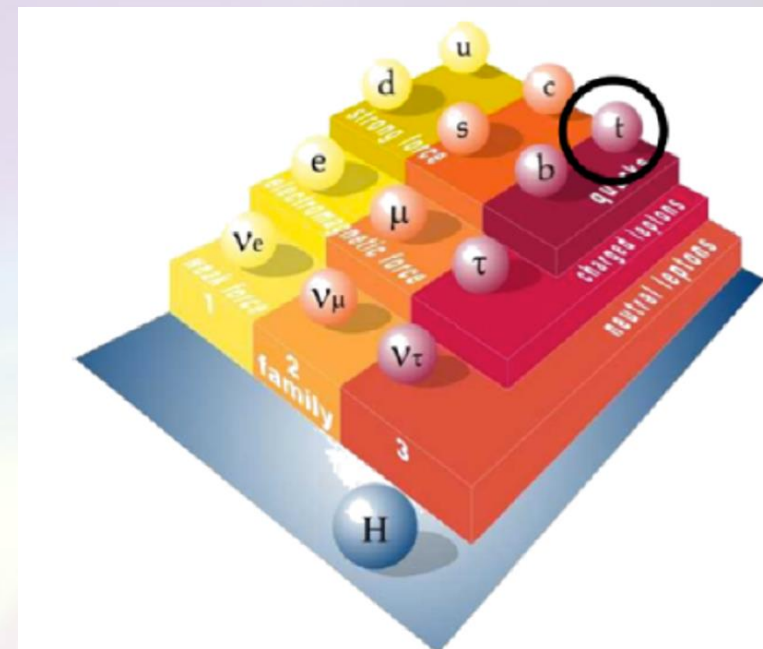
$|0, 0\rangle$  спины антипараллельны (анти коррелируют)  $\rightarrow$  состояния **запутаны**

# ТОП кварк в СМ: основные свойства

- Открыт в экспериментах CDF/D0 на Тэватроне в 1995 при исследовании рождения пар  $t\bar{t}$
- Рождение одиночного топ-кварка открыто в 2009 в экспериментах CDF/D0 и подтверждено в экспериментах 2011 ATLAS/CMS на БАК.
- Топ кварк является самой тяжелой из всех открытых частиц:

$$m_t = 173.0 \pm 0.4 \text{ ГэВ}$$

- Имеет малое время жизни:  $\tau_t = 5 \times 10^{-25} \text{ с}$
- В  $pp$ -взаимодействиях топ кварк рождается, в основном парами ( $t\bar{t}$ ) в сильном взаимодействии или одиночно, за счет слабого взаимодействия.



# Механизмы рождения топ кварка

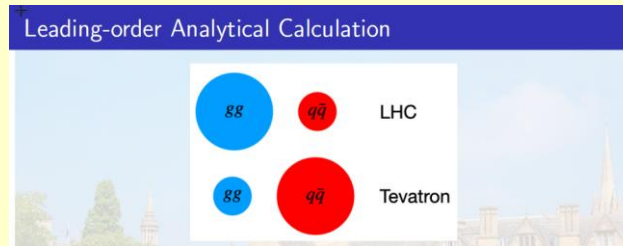
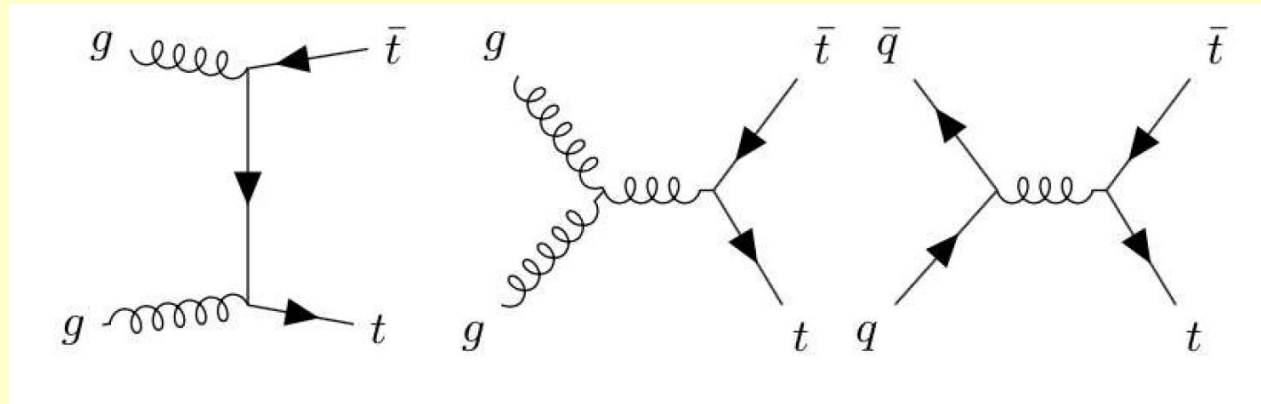
Доминирующим механизмом рождения рождения  $t\bar{t}$  на БАК является  $gg$  синтез.

Полученная пара  $t\bar{t}$  является запутанной только в двух областях фазового пространства:

- 1) на пороге, где пара  $t\bar{t}$  рождается в спин-синглетном состоянии и
- 2) при высоких  $p_T$ , где  $t\bar{t}$  пара рождается в спин-триплетном состоянии.

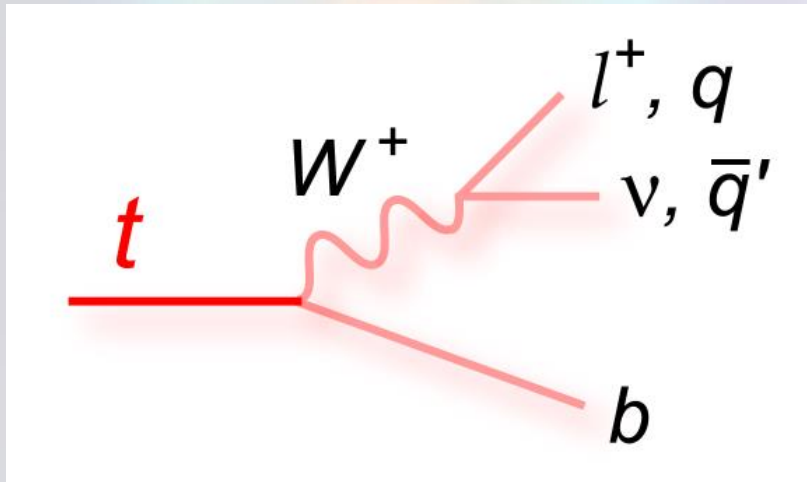
Область 1) является наиболее многообещающим кандидатом на обнаружение, поскольку сечения образования  $t\bar{t}$  больше.

$$q + \bar{q} \rightarrow t + \bar{t},$$
$$g + g \rightarrow t + \bar{t}.$$





# Распад $t$ -кварка



- С вероятностью 99,9%  $t$ -кварк распадается в канале  $t \rightarrow Wb$
- Вследствие малого времени жизни  $t$ -кварк распадается до адронизации
- Продукты распада  $t$ -кварка сохраняют информацию о его спине

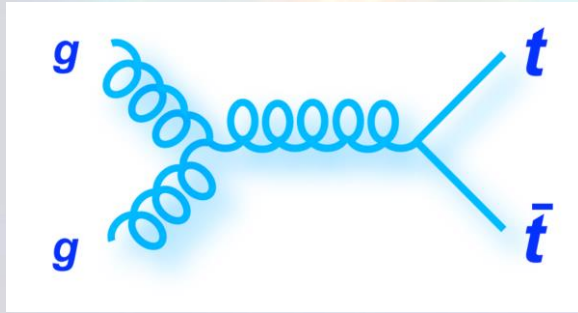
- Возможные конечные состояния будут определяться каналом распада  $W$ -бозона (лептонным или адронным)
- При распаде  $W$ -бозона в лептонном ( $\approx 33\%$ ) канале детектором регистрируется заряженный лептон и недостающая поперечная энергия ( $E_T^{miss}$ )
- При распаде  $W$ -бозона в адронном ( $\approx 67\%$ ) канале детектором регистрируются 2 струи
- Помимо этого детектором будет регистрироваться  $b$ -струя

# Почему интересно исследовать квантовую запутанность с помощью спиновых корреляций топ кварков

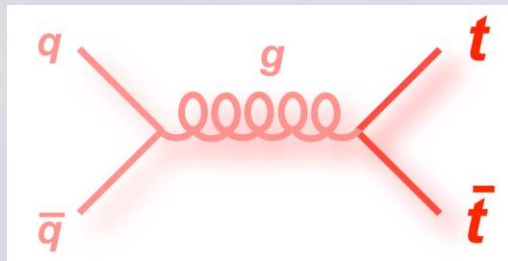
- так как время жизни мало, то топ распадается до процесса адронизации  $5 \times 10^{-23} \text{ s}$  и декорреляции спинов  $10^{-21} \text{ s}$ , т.о. передает информацию о спине продуктам распада  $\Rightarrow$  направление вылета лептонов коррелирует с направлением спина топ кварка
- Канал распада на лептон + струи имеет высокую анализирующую способность.
- При пороговом рождении пара топ-антитоп кварков рождается в синглетном состоянии (**arXiv: 0812.0919**), которое является “максимально запутанным”.

$$\rho^{gg}(2m_t, \hat{k}) = |\Psi_0\rangle \langle \Psi_0|, \quad |\Psi_0\rangle = \frac{|\uparrow_{\hat{n}} \downarrow_{\hat{n}}\rangle - |\downarrow_{\hat{n}} \uparrow_{\hat{n}}\rangle}{\sqrt{2}}$$

# Матрица плотности $t\bar{t}$



$$g(p_1) + g(p_2) \rightarrow t(k_1, s_1) + \bar{t}(k_2, s_2)$$



$$q(p_1) + \bar{q}(p_2) \rightarrow t(k_1, s_1) + \bar{t}(k_2, s_2)$$

Матрица плотности для этих процессов может быть записана в виде:

$$R_{\alpha_1 \alpha_2, \beta_1 \beta_2}^{pr} = \bar{\Sigma} \langle t(k_1, \alpha_2), \bar{t}(k_2, \beta_2) | T | a(p_1), b(p_2) \rangle^* \times \langle t(k_1, \alpha_1), \bar{t}(k_2, \beta_1) | T | a(p_1), b(p_2) \rangle$$

$pr \equiv a, b = gg, q\bar{q}$  - механизмы рождения  $t\bar{t}$ -пар  
 $t(k_1, \alpha_2), \bar{t}(k_2, \beta_2)$  - волновые функции топ, анти-топ кварков

$\alpha, \beta$  - helicity топ и анти-топ кварков.

Усреднение проводится по всем спиновым и цветовым состояниям начальных глюонов (кварков).

**Bernreuther, Heisler, Si, JHEP 1512, 026 (2015)**

# Матрица плотности $t\bar{t}$

$$R_{\alpha_1\alpha_2,\beta_1\beta_2}^{pr} = \bar{\Sigma} \langle t(k_1, \alpha_2), \bar{t}(k_2, \beta_2) | T | a(p_1), b(p_2) \rangle^* \times \langle t(k_1, \alpha_1), \bar{t}(k_2, \beta_1) | T | a(p_1), b(p_2) \rangle$$

Матрицу  $R_I$  можно записать в виде:

$$R_{pr} = f_{pr} \left[ A^{Pr} \mathbf{I} \otimes \mathbf{I} + \tilde{B}_i^{pr+} \sigma^i \otimes \mathbf{I} + \tilde{B}_i^{pr-} \mathbf{I} \otimes \sigma^i + \tilde{C}_{ij}^{pr} \sigma^i \otimes \sigma^j \right]$$

$$f_{gg} = \frac{(4\pi\alpha_s)^2}{N_c(N_c^2-1)}$$

$$f_{q\bar{q}} = \frac{(N_c^2-1)(4\pi\alpha_s)^2}{N_c^2}$$

$$|M|^2 \propto A + B^+ \cdot s_1 + B^- \cdot s_2 + C_{ij} s_{1i} s_{2j}$$

где:  $\sigma^i$  - матрицы Паули

$N_c$  - число цветных состояний

$\mathbf{I}$  - единичные матрицы

$A$  - неполяризованное сечение

$\tilde{B}_i^{l\pm}, \tilde{C}_{ij}^l$  - поляризация и коэффициенты корреляции

$B_a, B_b$  - поляризация (a,b = k,r,n)

$C(a,b)$  - коэффициенты корреляции

(+) (-) обозначения для топ анти-топ кварков

Bernreuther, Heisler, Si, JHEP 1512, 026 (2015)

# Сечение рождения $t\bar{t}$

$$|M|^2 \propto A + B^+ \cdot s_1 + B^- \cdot s_2 + C_{ij} s_{1i} s_{2j}$$

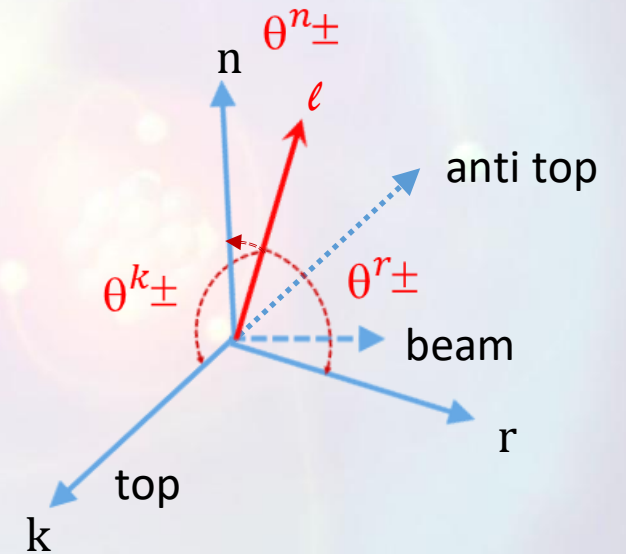
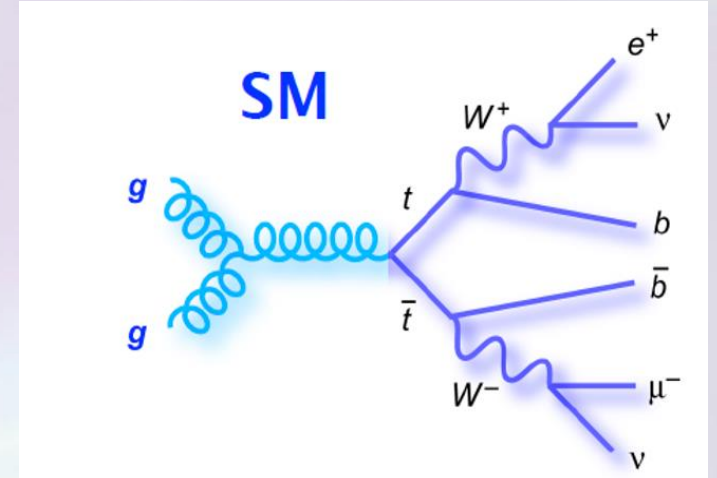
$$\frac{1}{\sigma} \frac{d^2\sigma}{d\cos\theta_a^+ d\cos\theta_b^-} = \frac{1}{4} (1 + B_a^+ \cos\theta_a^+ + B_b^- \cos\theta_b^- - C(a,b) \cos\theta_a^+ \cos\theta_b^-)$$

$B_a, B_b$  - поляризация ( $a, b = k, r, n$ )  
 $C(a, b)$  - коэффициенты корреляции  
 (+) (-) обозначения для топ анти-топ кварков

$\theta_a, \theta_b$  - углы между импульсом лептона от распада  $W$ -бозона и импульсом топ кварка в системе покоя топ кварка

$$B_a = 3 \langle \cos\theta_a \rangle$$

$$C(a, b) = -9 \langle \cos\theta_a^+ \cos\theta_b^- \rangle$$



# Коэффициенты корреляции

$$\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{d\Omega_+ d\Omega_-} = \frac{1 + B^+ \cdot \hat{q}_+ - B^- \cdot \hat{q}_- - \hat{q}_+ \cdot C \cdot \hat{q}_-}{(4\pi)^2}$$

Дифференциальное сечение для двух-лептонного распада

$\hat{q}_\pm$  направление лептона в системе покоя родительского топ кварка

$\Omega_\pm$  - углы вылета лептонов

$B^\pm, C$  – поляризации и коэфф. корреляции топ и анти-топ кварков

Коэффициенты корреляции и поляризации можно получить измеряя угловые распределения продуктов распада. Этот процесс называется “квантовой томографией”.

$$\frac{1}{\sigma_{\ell\bar{\ell}}} \frac{d\sigma_{\ell\bar{\ell}}}{d \cos \theta_\pm^i} = \frac{1}{2} (1 \pm B_i^\pm \cos \theta_\pm^i)$$

Компоненты поляризации  $B_i^\pm$  вычисляются с помощью распределений по косинусам углов между направлением импульса лептона от распада и осями базиса:  $\cos \theta_\pm^i$

$$\frac{1}{\sigma_{\ell\bar{\ell}}} \frac{d\sigma_{\ell\bar{\ell}}}{dx_{ij}} = \frac{1}{2} [1 - C_{ij} x_{ij}] \ln \frac{1}{|x_{ij}|}$$

Коэффициенты корреляции  $C_{i,j}$  вычисляются через произведение:  
 $x_{i,j} = \cos \theta_\pm^i \cos \theta_\pm^j$

$$\frac{1}{\sigma_{\ell\bar{\ell}}} \frac{d\sigma_{\ell\bar{\ell}}}{d \cos \varphi} = \frac{1}{2} (1 - D \cos \varphi), \quad D = \frac{\text{tr}[C]}{3}$$

Коэффициент корреляции  $D$ , (след матрицы спиновых корреляций) может быть получен с помощью измерения дифференциального сечения в зависимости от угла между направлениями лептонов в системе покоя соответствующего топ (анти-топ) кварка):  $\cos \varphi = \hat{l}_+ \cdot \hat{l}_-$

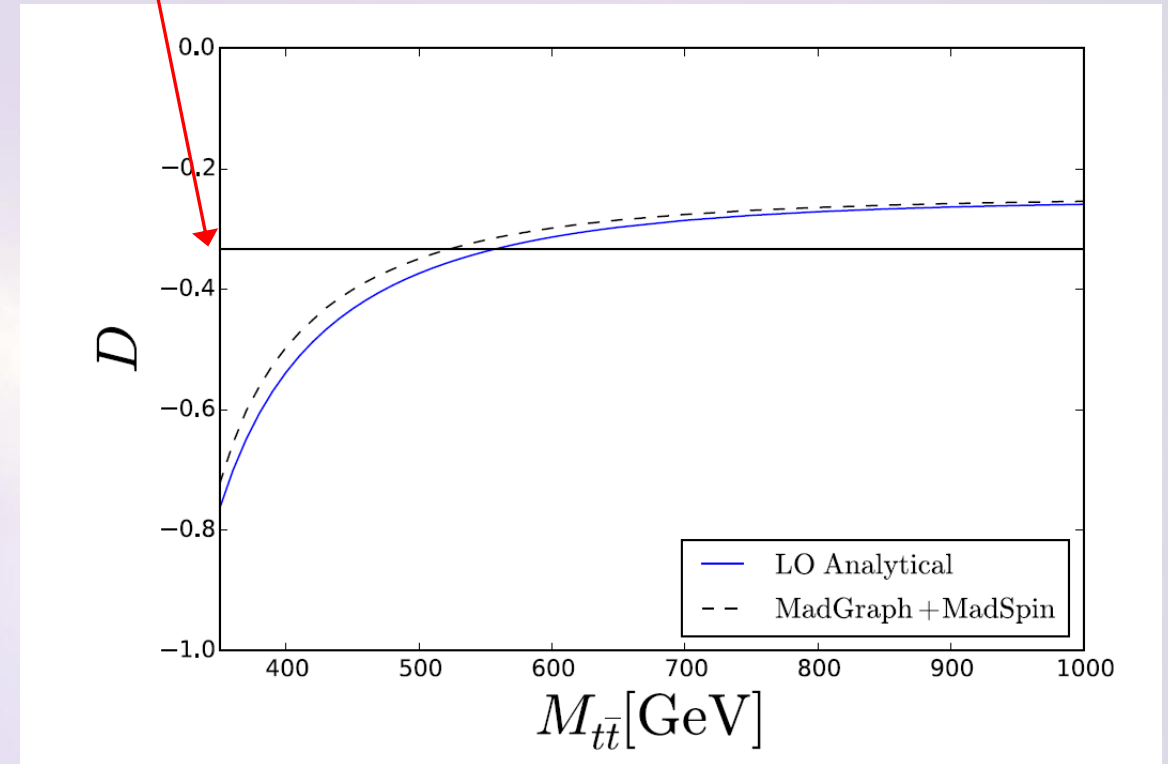
# Экспериментальное исследование

Entanglement  
limit

- Эффект квантовой запутанности можно исследовать путем измерения дифференциального нормированного сечения как функции  $\cos(\phi)$ , где  $\phi$  - угол между двумя лептонами в их соответствующей родительской системе покоя топ-кварка.

$$\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma}{d\cos(\phi)} = \frac{1}{2} (1 - D\cos(\phi))$$

- Согласно критерию Переса-Городецкого при выполнении условия  $D < -1/3$ , кварки находятся в “запутанном” состоянии.
- Этот эффект наблюдается, когда пара топ-анти-топ рождается вблизи порога (gg-fusion).



Y. Afik and J. R. M. De Nova, EPJPlus (2021).

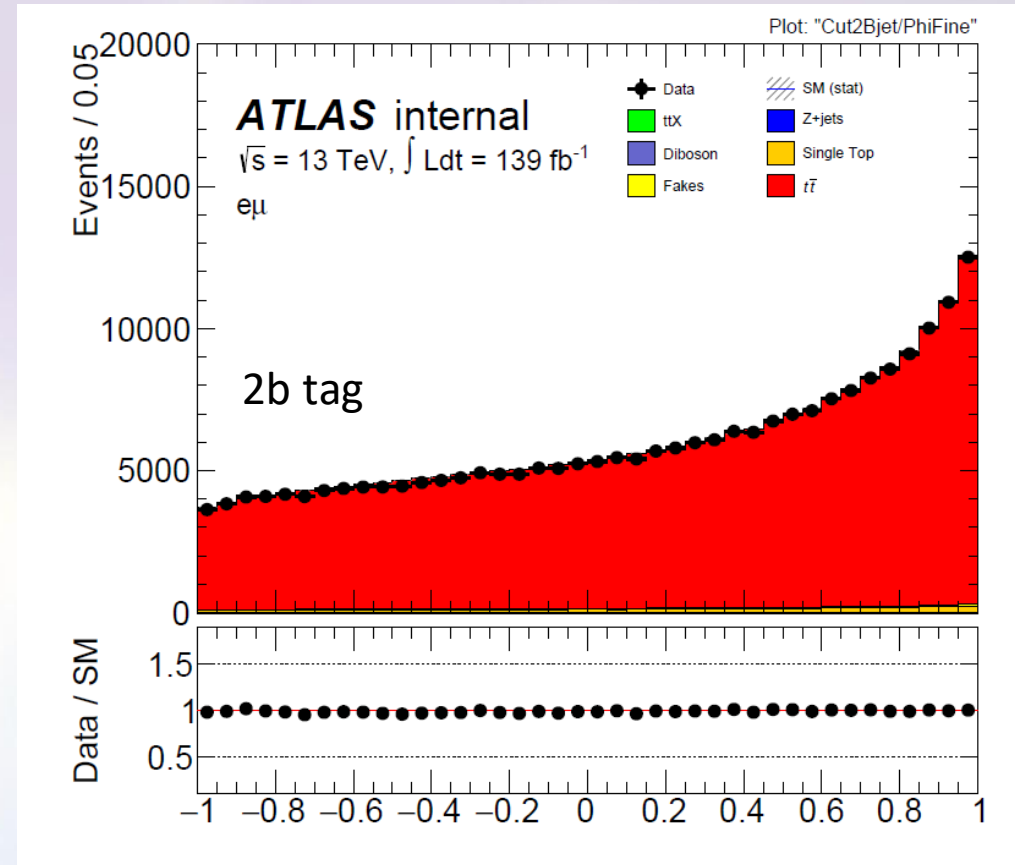
# Event selection & background

- Exactly two opposite sign charge leptons (e or  $\mu$ ).
- At least one trigger-matched lepton.
- At least two jets.
- At least one b-tagged jet.
- Veto cut on dilepton inv mass

## Main backgrounds:

- Z+jets
- Single top
- ttX
- Dibosons
- Fakes

cos( $\phi$ ) distribution after the full selection



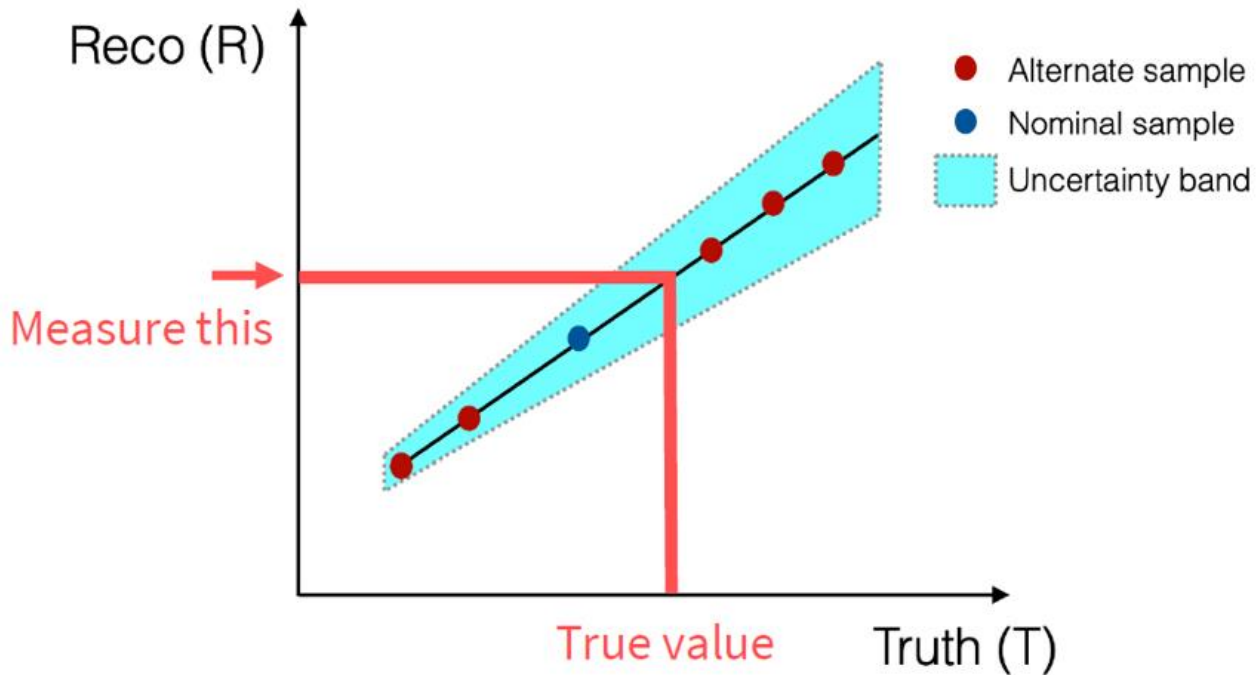
- Background contribution is very small !!!



# Учет аксептанса детектора

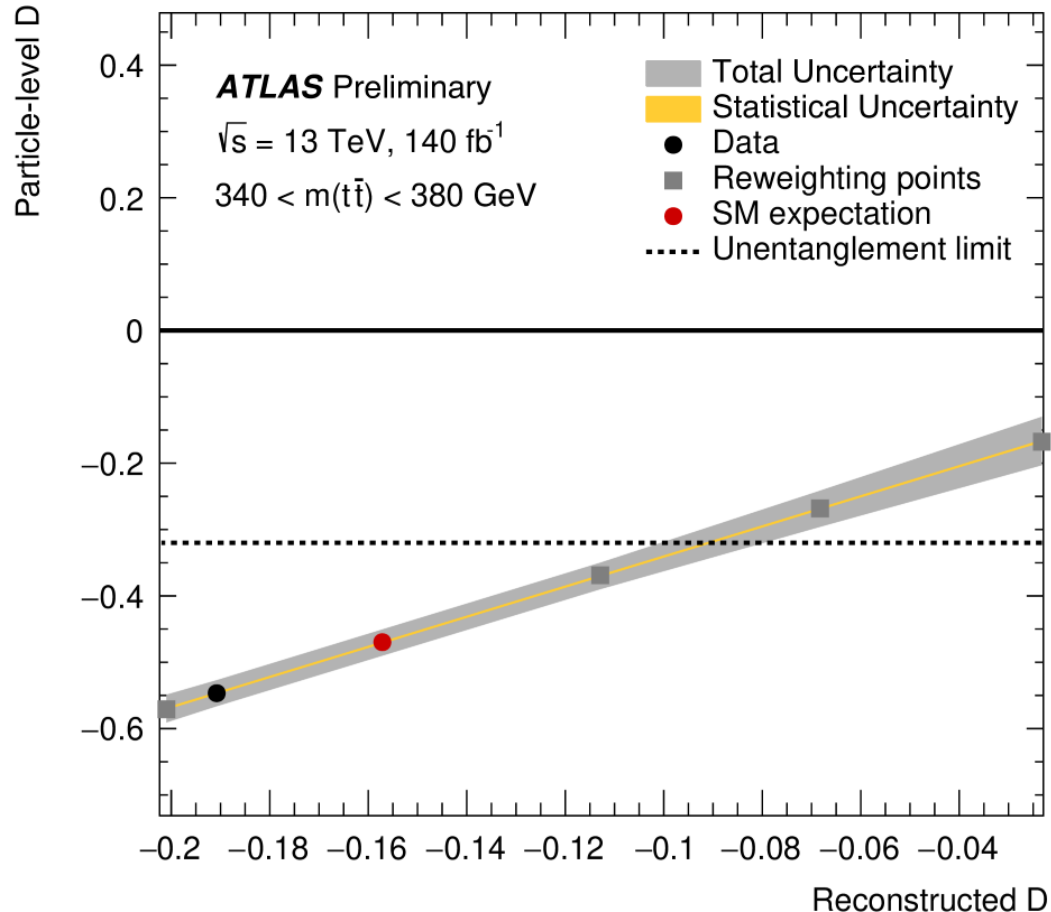
- Прохождение частиц через детектор, реконструкция треков и отбор событий искажают форму распределения  $\cos(\varphi)$ .
- Данные корректируются с учетом эффектов детектора до контрольного уровня частиц с использованием калибровочной кривой как в области сигнала, так и в контрольных областях, после вычета ожидаемого фона.
- калибровочная кривая связывает любое значение на уровне реконструированных треков с соответствующим значением на уровне частиц.
- Для этой цели различные значения  $D$  получают путем повторного взвешивания событий в соответствии с относительным изменением  $D$ .

# Метод калибровочной кривой



- Устанавливает связь между наблюдаемыми данными и значением на уровне частиц (до реконструкции но после адронизации).
- Измеряется значение  $D$  по данным (наблюдаемое  $D$ )
- Сопоставляется соответствующее значение уровня частиц (скорректированное  $D$ )
- Значимость – это разница между результатом и нулевой гипотезой.
- Данные корректируются с учетом эффектов детектора до уровня частиц с использованием калибровочной кривой как в области сигнала, так и в валидационных (контрольных) областях, после вычета ожидаемого фона.

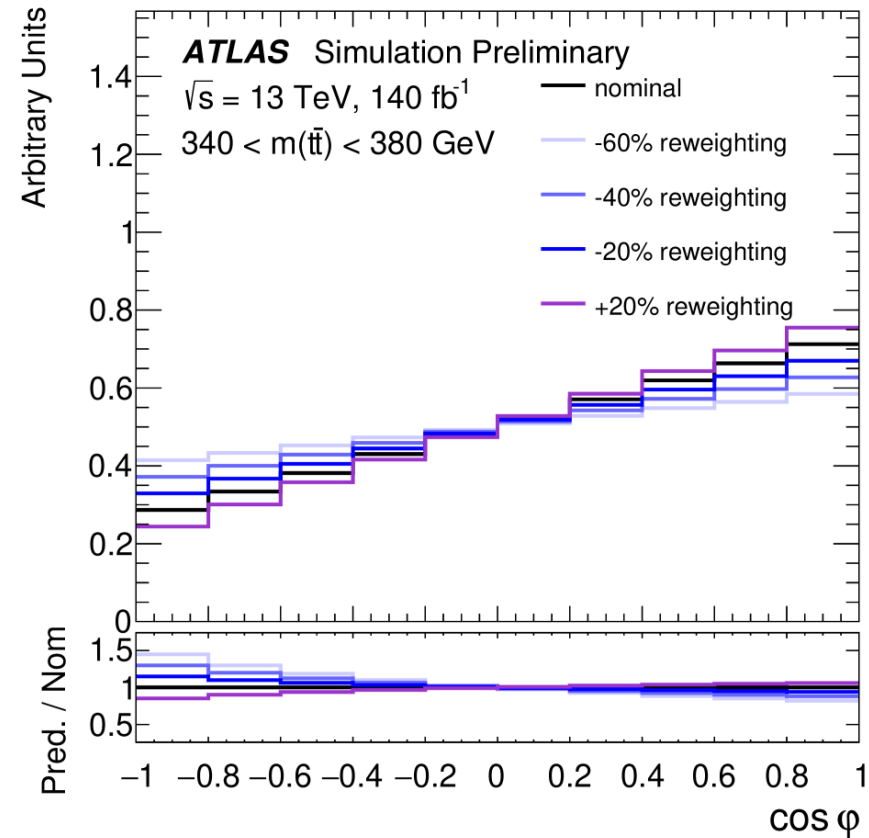
# Калибровочная кривая



- Калибровочная кривая строится по парам Reco-Truth в 5 различных точках (гипотезах) и линейно интерполируется между ними.
- Гипотезы соответствуют SM и 4 различным перевзвешенным точкам (+20%, -20%, -40%, -60%).
- Наблюдаемые данные корректируются с использованием этой кривой для перехода от наблюдаемого Reco к скорректированному значению truth.
- Желтая полоса представляет статистическую ошибку, а серая полоса представляет общую ошибку, обусловленную статистической и систематической неопределенностью.
- Полная ошибка получается путем квадратичного сложения статистической и всех систематических неопределенностей.
- Измеренные и ожидаемые значения отмечены черными и красными кружками соответственно
- Предел для квантовой запутанности (пунктирная линия) представляет собой преобразование значения  $D = -1/3$  на партонном уровне в соответствующее значение на уровне частиц.

# Перевзвеска

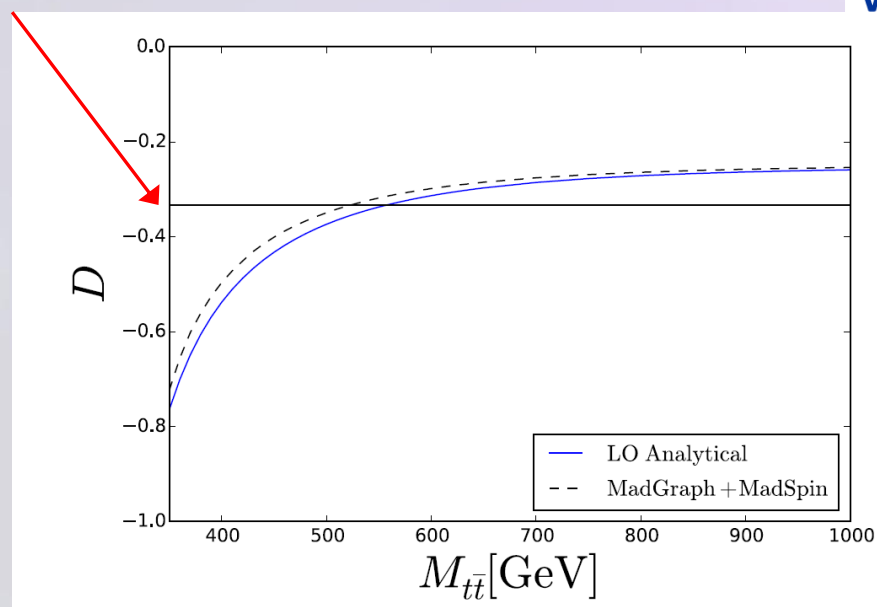
Чтобы проверить альтернативные гипотезы, мы должны изменить D.  
Альтернативный подход: каждое событие перевзвешивается (на партонном уровне).  
Для каждого интервала  $m(t\bar{t})$  при этом сохраняется линейность по  $\cos(\varphi)$ .



# Исследуемые кинематические области

- В анализе использовалось одна сигнальная область и две проверочные области (validation region)
- Сигнальная область создается для выбора событий, в которых пара топ кварков образуются близко к порогу, поскольку именно здесь ожидается, что пары топ-антитоп будут в запутанном состоянии.
- Оптимальное окно для области сигнала было определено как  $340 < m(t\bar{t}) < 380$  ГэВ. Эта область определялась путем изменения верхней границы области с шагом 5 ГэВ и оценки статистической и доминирующей систематической неопределенностей.

Entanglement  
limit



Три кинематические области по переменной  $m(t\bar{t})$  были проанализированы:

**SR:**  $340 < m(t\bar{t}) < 380$  ГэВ (высокая степень квантовой запутанности)

**VR1:**  $380 < m(t\bar{t}) < 500$  ГэВ (степень квантовой запутанности меньше)

**VR2:**  $m(t\bar{t}) > 500$  ГэВ (нет квантовой запутанности)

$$D = \frac{\text{tr}[C]}{3} < -\frac{1}{3}$$

Это следствие критерия  
Переса-Городецкого

Y. Afik and J. R. M. De Nova, EPJPlus (2021).

# Data/MC comparison

Process	Inclusive	340 – 380 GeV	380 – 500 GeV	> 500 GeV
$t\bar{t}$	$1030000 \pm 40000$	$202000 \pm 8000$	$408000 \pm 16000$	$417000 \pm 17000$
$tW$	$59800 \pm 1100$	$10330 \pm 200$	$23800 \pm 500$	$25700 \pm 500$
Z+jets	$38000 \pm 4000$	$9300 \pm 400$	$19000 \pm 4000$	$9730 \pm 270$
WW/WZ/ZZ	$9140 \pm 340$	$1320 \pm 50$	$3280 \pm 120$	$4540 \pm 170$
$t\bar{t}X$	$2959 \pm 6$	$437.7 \pm 2.1$	$1080.1 \pm 3.4$	$1441 \pm 4$
fakes	$17700 \pm 8900$	$3600 \pm 1900$	$7100 \pm 3800$	$7000 \pm 3700$
Expectation	$1150000 \pm 40000$	$227000 \pm 8000$	$462000 \pm 17000$	$466000 \pm 17000$
Data	1105403	225056	441196	439151
data/MC	$0.96 \pm 0.03$	$0.99 \pm 0.04$	$0.95 \pm 0.04$	$0.94 \pm 0.04$

Хорошее согласие данных с предсказаниями СМ

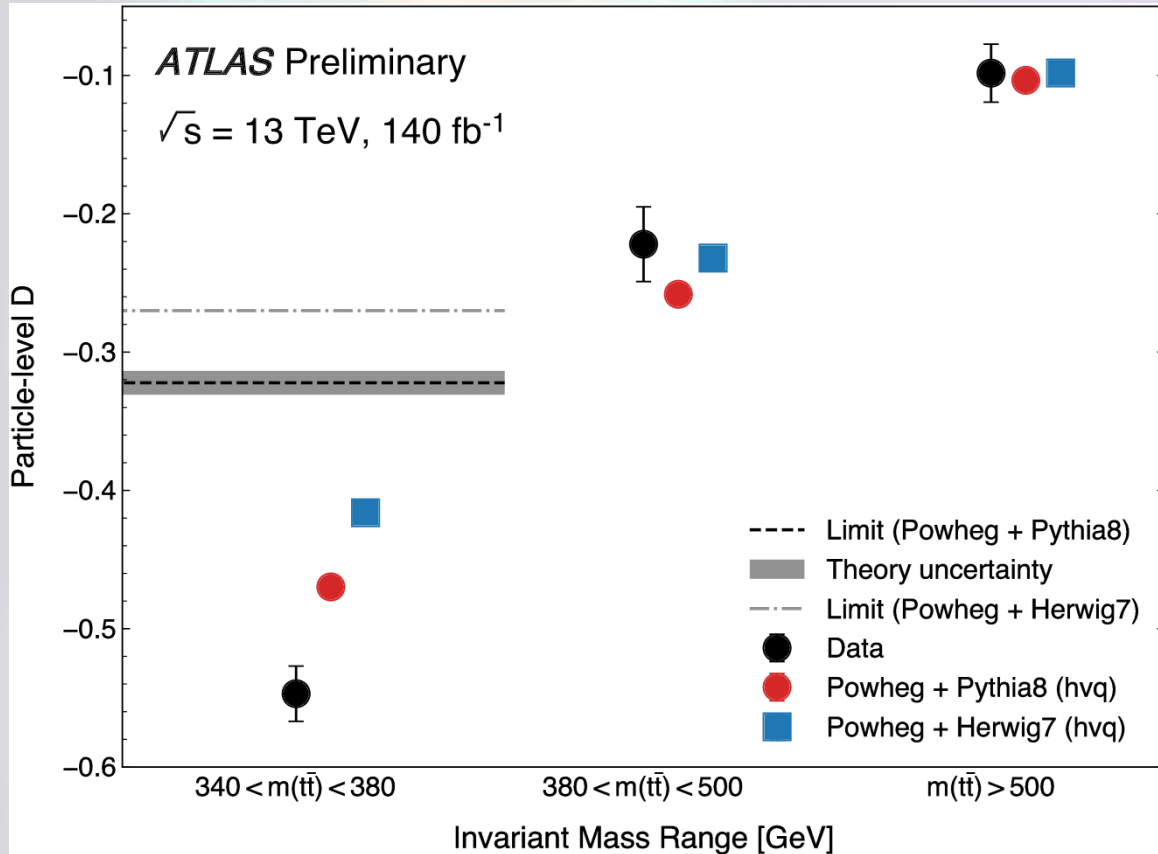
# Systematic uncertainties

Systematic uncertainties include three categories: modelling uncertainties on the  $t\bar{t}$  production and decay, modelling uncertainties on the backgrounds, and detector-related uncertainties for both the  $t\bar{t}$  signal and the SM backgrounds. Each source of systematic uncertainty can result in a different calibration curve, as it changes the shape of  $\cos\varphi$  either at particle level and / or at detector level.

Systematic source	$\Delta D_{\text{observed}}(D = -0.547)$	$\Delta D$ (%)	$\Delta D_{\text{expected}}(D = -0.470)$	$\Delta D$ (%)
Signal Modelling	0.017	3.2	0.015	3.2
Electrons	0.002	0.4	0.002	0.4
Muons	0.001	0.1	0.001	0.1
Jets	0.004	0.7	0.004	0.8
$b$ -tagging	0.002	0.4	0.002	0.4
Pile-up	< 0.001	< 0.1	< 0.001	< 0.1
$E_{\text{T}}^{\text{miss}}$	0.002	0.3	0.002	0.4
Backgrounds	0.010	1.8	0.009	1.8
Total Statistical Uncertainty	0.002	0.3	0.002	0.4
Total Systematic Uncertainty	0.021	3.8	0.018	3.9
Total Uncertainty	0.021	3.8	0.018	3.9

# Result

Анализ был сделан на particle level → коэффициент D не важен, важно его отклонение от entanglement limit



- Предел  $D = -1/3$  переносится с уровня партонов на уровень частиц (с учетом эффекты партонных ливней) с использованием генераторов: Powheg + Pythia 8 и, альтернативно, Powheg + Herwig 7 которые дают пределы:  $-0.322 \pm 0.009$  (ошибка - моделирование) and  $-0.27$ , соответственно.
- В проверочных областях данные совпадают с результатами моделирования, проведенными разными генераторами → нет явного предпочтения конкретного MC генератора.
- Эффект наблюдается со значимостью более  $5\sigma$ .  
Наблюдаемое:  $D = -0.547 \pm 0.002$  [стат.]  $\pm 0.021$  [систем.]  
Ожидаемое:  $D = -0.470 \pm 0.002$  [стат.]  $\pm 0.017$  [систем.]
- Отклонение от предсказаний СМ  $\sim 3\sigma$

VR1:  $D = -0.222 \pm 0.001$  [stat.]  $\pm 0.027$  [syst.] ( $-0.258 \pm 0.001$  [stat.]  $\pm 0.026$  [syst.])

VR2:  $D = -0.098 \pm 0.001$  [stat.]  $\pm 0.029$  [syst.] ( $-0.103 \pm 0.001$  [stat.]  $\pm 0.021$  [syst.])



# Pythia vs Herwig PS

Большое расхождение между генераторами Монте-Карло связано с разными алгоритмами, используемыми в Pythia и Herwig для упорядочивания партонного ливня.

Номинальный образец МС создается с помощью NLO ME, реализованного в PowhegBox (hvq) затем передается в Pythia 8.230, либо в Herwig 7.21 для моделирования партонных ливней, адронизации и сопутствующих событий.

На партонном уровне распределения по  $\cos(\varphi)$  очень близки, а на уровне частиц сильно отличаются.

Два основных различия между Pythia и Herwig: **модель адронизации** и **упорядочение ливней**.

**Pythia** основана на модели струн Лунда и использует ливень с pT-упорядочением.

**Herwig** основан на кластерной модели и по умолчанию использует ливень с угловым упорядочением .

Сравнение моделирования с различными моделями адронизации показало, что они оказывают незначительное влияние как инклюзивно, так и в сигнальной области анализа, с  $340 < m(t\bar{t}) < 380$  ГэВ.

Нет однозначного заключения для выбора МС генератора.

- Recently,  $D$  was measured with no selection on  $M_{t\bar{t}}$  by the CMS collaboration.
- Results:  
 $D = -0.237 \pm 0.011 > -1/3$ ;  
 $\Delta D/D = 4.6\%$ .
- No evidence of quantum entanglement.  
 $\Rightarrow$  **We need a dedicated analysis!**

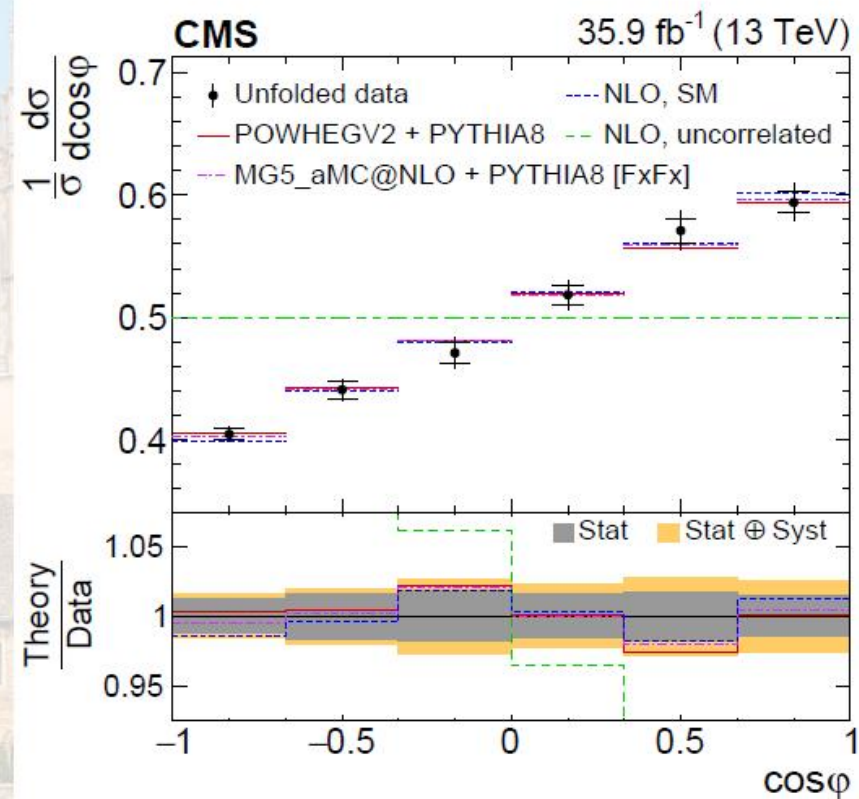


Figure: Distribution of  $\cos\varphi$ . Figure is from [Phys. Rev. D 100, 072002](#).

# Заключение

- Впервые наблюдался эффект квантовой запутанности для системы состоящей из двух кварков (ТОП кварков)
- Эффект наблюдается на уровне более чем пять стандартных отклонений!
- Это первое когда-либо сделанное измерение квантовой запутанности между парой кварков и первое наблюдение квантовой запутанности на для высоких энергий.
- Результат опубликован в ноте: ATLAS-CONF-2023-069 и в CERN courier, в настоящий момент идет подготовка публикации для журнала.
- Исследуемая наблюдаемая чувствительна к моделированию партонного ливня → требуется дополнительная работа для проверки основных генераторов на предмет прецизионных измерений.

The background features a soft, ethereal glow with a color palette of light blues, purples, and pinks. Scattered throughout are abstract, glowing particles and thin, intersecting lines, resembling a network or a molecular structure. A prominent, bright, multi-colored beam of light originates from the upper left and extends towards the center, where it appears to interact with the text.

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**

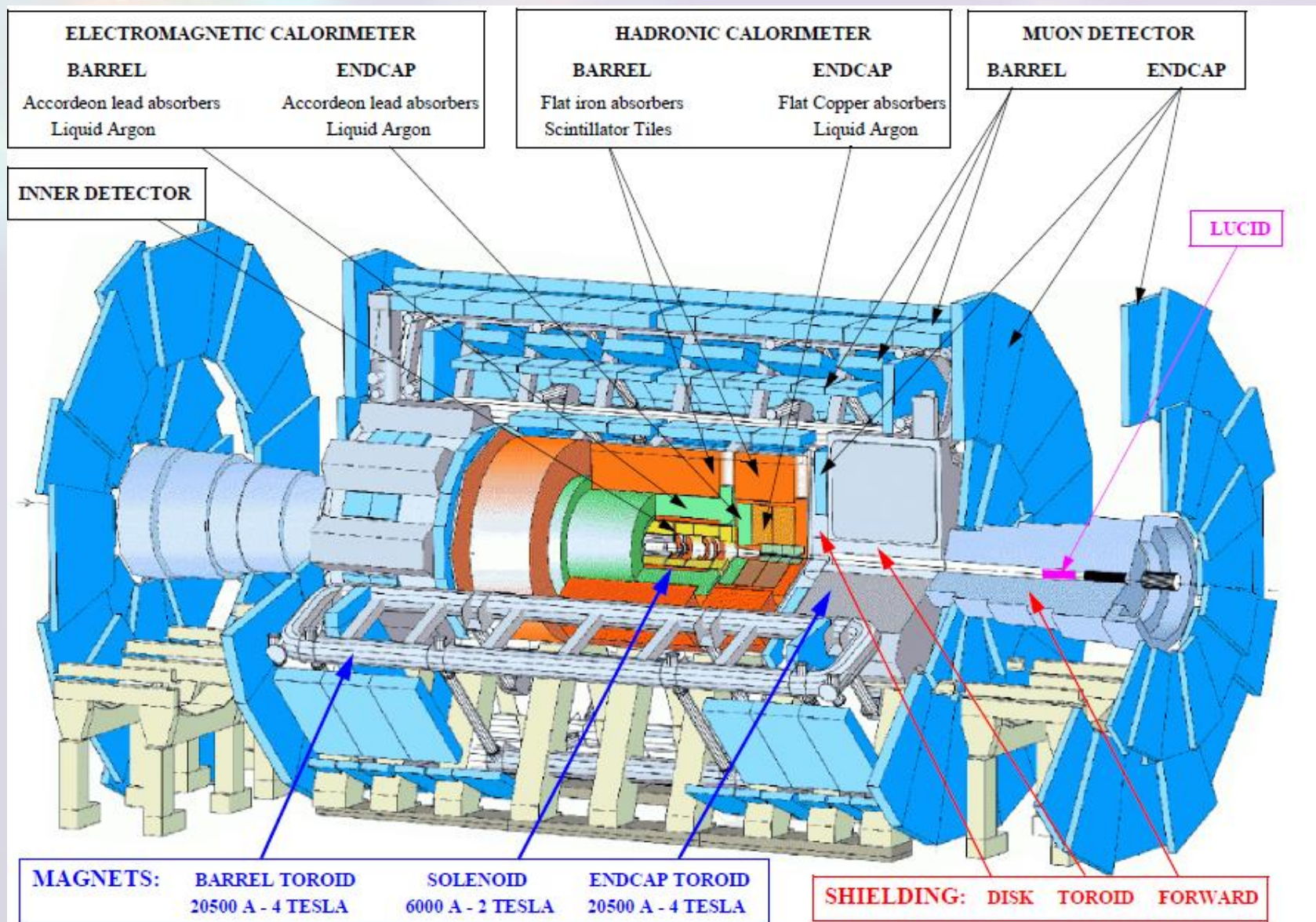
The background features a soft, ethereal glow with a central horizontal beam of light. On either side of the beam are stylized atomic models. The model on the left has a glowing orange nucleus and a cyan electron cloud. The model on the right has a glowing red nucleus and a cyan electron cloud. The overall color palette is light blue, purple, and cyan.

***BACK UP***

# Современный статус исследований квантовой запутанности

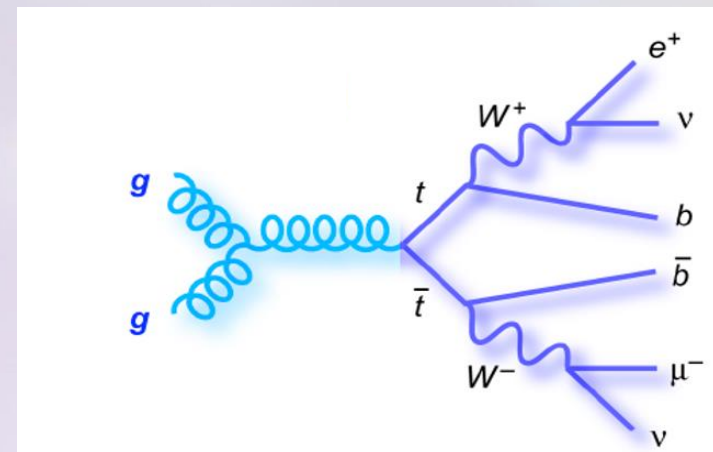
- Изучения квантовой запутанности проводились в различных экспериментах, с использованием:
  - **фотонов**: A. Aspect, P. Grangier, and G. Roger, Phys. Rev. Lett. 49, 91 (1982).
  - **атомов**: E. Hagley, X. Maitre, G. Nogues, C. Wunderlich, M. Brune, J. M. Raimond, and S. Haroche, Phys. Rev. Lett. 79, 1 (1997).
  - **мезонов**: A. Go et al. (Belle), Phys. Rev. Lett. 99, 131802 (2007), arXiv:quant-ph/0702267 [QUANT-PH].
  - **Нейтрино**: J. A. Formaggio, D. I. Kaiser, M. M. Murskyj, and T. E. Weiss, Phys. Rev. Lett. 117, 050402 (2016).
  - В 2022 году Ален Аспе, Джон Френсис Клаузер и Антон Цайлингер
  - .....
  - **Никогда не измерялось для пары кварков !!!**

# Детектор "АТЛАС"

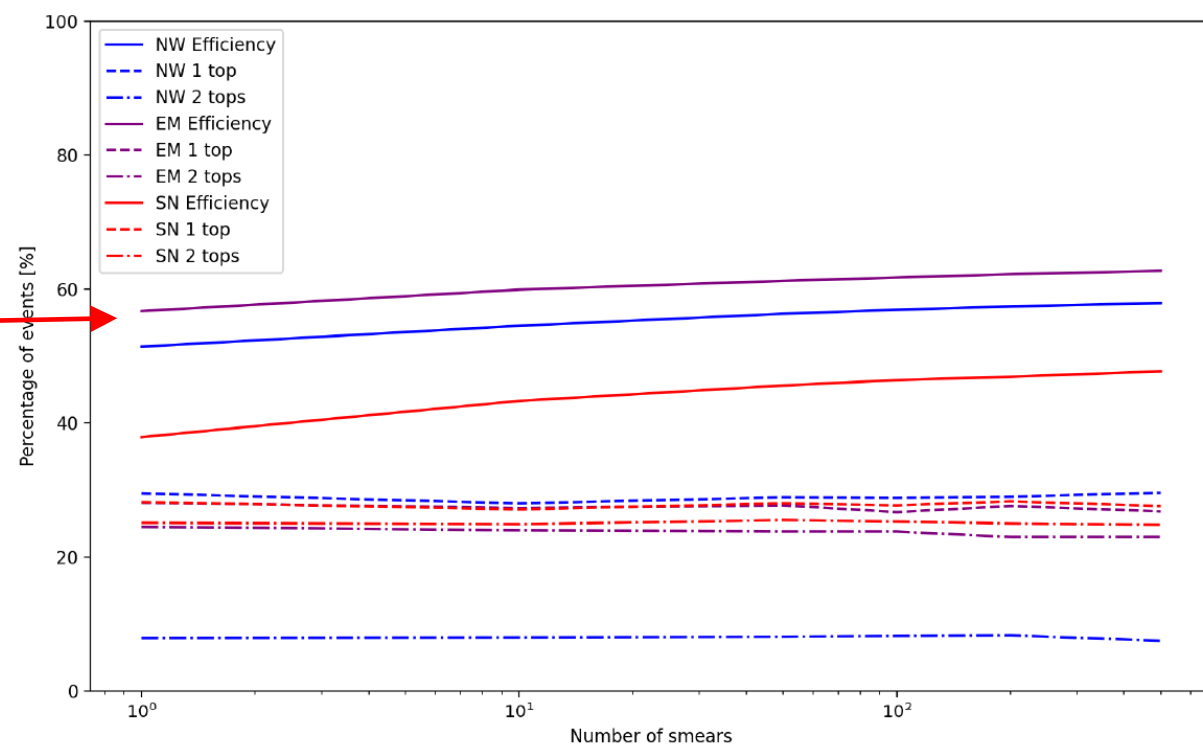


# $t\bar{t}$ kinematic reconstruction

- Dilepton channel: 6 kinematical equations and 6 unknowns which are  $\nu$  and  $\bar{\nu}$  momenta components.
- Equation can be solved analytically



- **Sonenshein method** – is perform a sequential solution of kinematic equations to solve for the neutrino momenta.
- **Ellipse method** – is a geometric approach to analytically solving equations of constraint on the decay of top quarks involving leptons using linear algebra techniques.
- **NW method** -  $\eta(\nu)$  and  $\eta(\bar{\nu})$  are scanned in full  $\eta$  range to find the optimal solution.

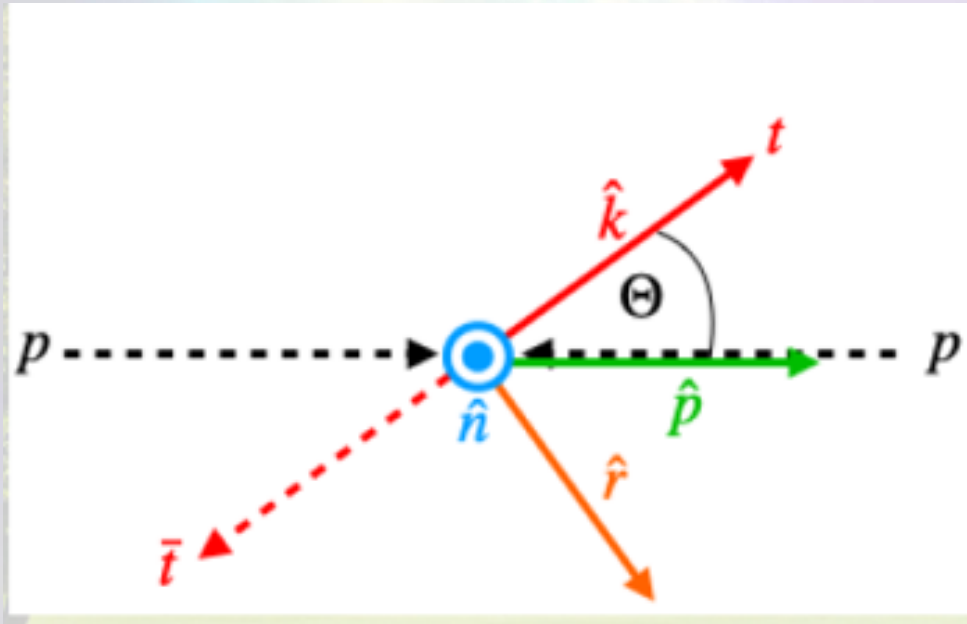




# Triggers

Year	Trigger
<b>Electron triggers</b>	
2015	e24_lhmedium_L1EM20VH, e60_lhmedium, e120_lhloose
2016	e26_lhtight_nod0_ivarloose, 60_lhmedium_nod0, e140_lhloose_nod0
2017	e26_lhtight_nod0_ivarloose, 60_lhmedium_nod0, e140_lhloose_nod0
2018	e26_lhtight_nod0_ivarloose, 60_lhmedium_nod0, e140_lhloose_nod0
<b>Muon triggers</b>	
2015	mu20_iloose_L1MU15, mu50
2016	mu26_ivarmedium, mu50
2017	mu26_ivarmedium, mu50
2016	mu26_ivarmedium, mu50

# Helicity basis



- Helicity basis:  $\{\hat{k}, \hat{r}, \hat{n}\}$ :

- $\hat{k}$  - direction of the top in the  $t\bar{t}$  CM frame.
- $\hat{p}$  - direction of the beam.
- $\cos \Theta = \hat{k} \cdot \hat{p}$ .
- $\hat{r} = (\hat{p} - \cos \Theta \hat{k}) / \sin \Theta$ .
- $\hat{n} = \hat{r} \times \hat{k}$ .