

2026/6/3

伊藤悠風

Activity details

- Introducing TauFinder
(Check simulation results)

真のタウの親粒子が電子になってしまう（レプトン数の保存が破れている + 陽電子が記録されていない）の調査

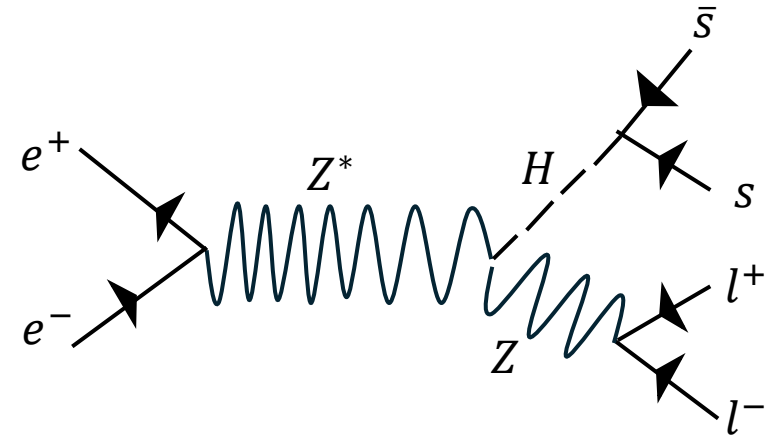
Physics Motivation and Challenges

解析の目的

ストレンジクォークの湯川結合の測定は、ヒッグス結合の世代普遍性を検証する上で重要である。そこでILCにおけるHiggs-strahlung過程($e^+e^- \rightarrow HZ$)を利用し、第2世代湯川結合($H \rightarrow s\bar{s}$)の精密測定を目指す。

$H \rightarrow s\bar{s}$ の分岐比(BR)は極めて小さいため($\text{BR}(H \rightarrow s\bar{s}) \approx 0.024\%$)、以下の二点が解析のカギとなる：

- 背景事象の抑制(Background Suppression)
- 信号事象の受容効率最大化(Efficiency Maximization)

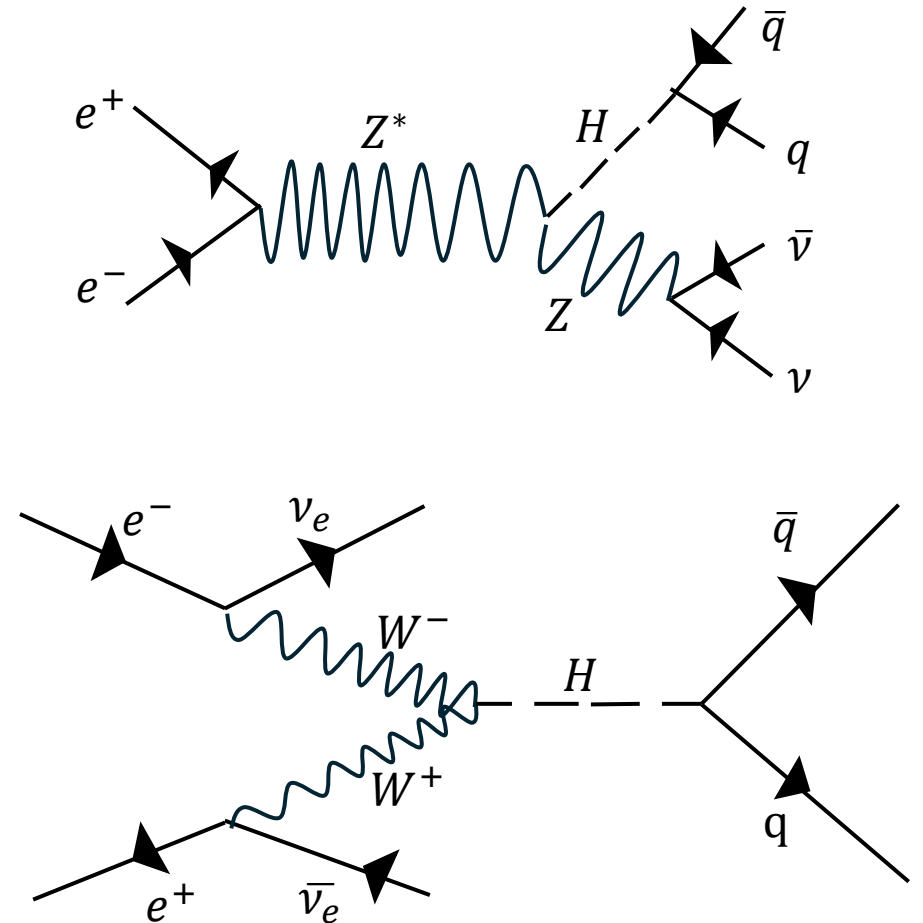


Tau Veto for Background Suppression

背景事象の棄却戦略($\nu\bar{\nu}H$ 解析) $Z \rightarrow \nu\bar{\nu} & H \rightarrow s\bar{s}$

$\nu\bar{\nu}H$ チャンネルでは、バックグラウンドとして混入するハドロン崩壊タウ ($\tau \rightarrow hadrons + \nu_\tau$)がストレンジジェットを模倣する。

- 課題: 欠損エネルギーにより反跳質量 (Recoil Mass)の精度が劣化。
- 解決策: Tau Finderをフィルター(Veto)として運用し、タウ事象を物理サンプルから排除することで、サンプルの純度(Purity)を確保する。

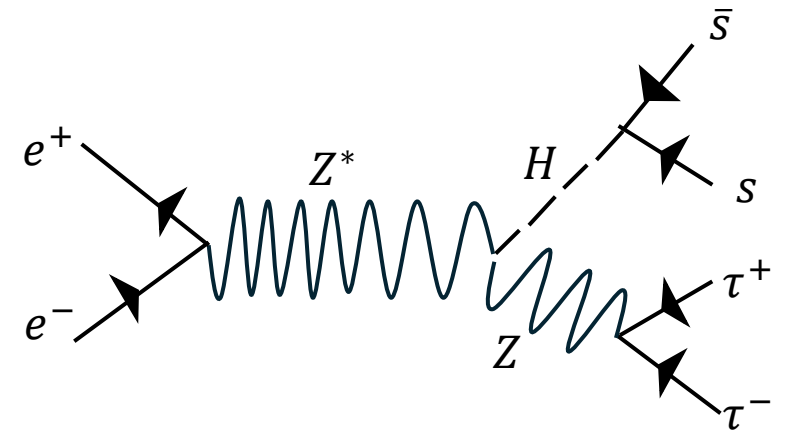


Tau Tagging for Signal Recovery

信号事象の回収戦略($\tau^+\tau^-H$ 解析) $Z \rightarrow \tau^+\tau^-$ & $H \rightarrow s\bar{s}$

従来、 $H \rightarrow q\bar{q}$ 探索のような精密測定において、タウ対チャンネルはニュートリノの欠損エネルギーに伴う反跳質量分解能の劣化を理由に、解析対象から除外されることが標準的であった。

- アプローチ: Tau Finderを識別のレーダー (Tagging)として運用。
- 利点: これまで損失していた $\tau^+\tau^-H$ 事象を直接同定し、信号事象を回収 (Signal Recovery) することで、統計量を最大化して、全体の測定感度を向上させる。



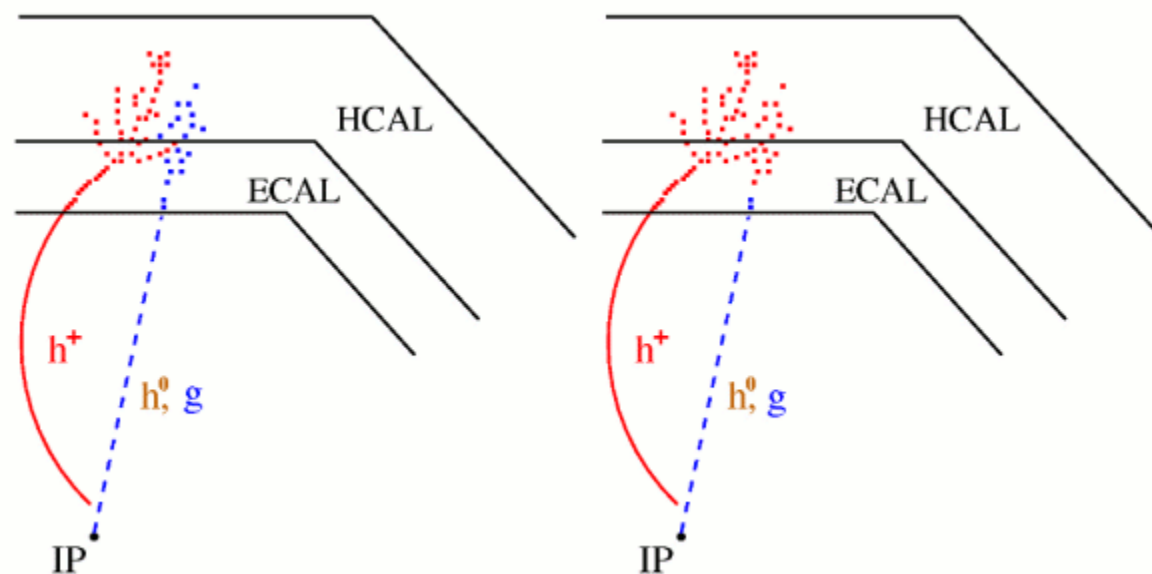
Strategic Approach to Performance Maximization

タウ誤同定メカニズムの物理的解明
PFO(粒子フローオブジェクト)レベルでの
Confusion(Over-clustering)や、検出器内での相互作用
等に起因するFake-Tau生成プロセスを定量的・物理的
に評価する。

識別アルゴリズムの最適化
隔離(Isolation)基準、Cone角度、不変質量のカットパ
ラメータを、 $H \rightarrow s\bar{s}$ 特有のトポロジーおよび運動学的
制約(Kinematic constraints)に基づき再調整(Tune)す
る。

同定性能の極限追求
Veto(棄却)性能とTagging(同定)効率のトレードオフ特
性(ROC特性)を最適化し、ILCの粒子フロー環境におけ
るタウ再構成性能の物理的限界(Performance Limit)を
押し上げる。

DESYのParticle Flowより引用



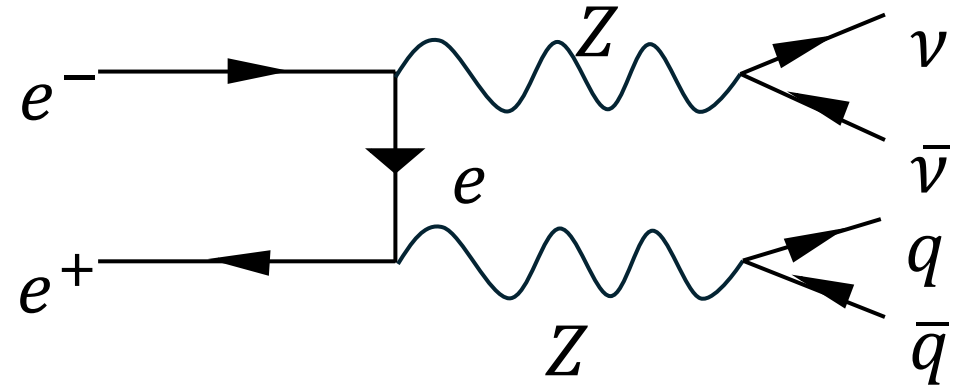
Confusion

左の図のように荷電粒子(h^+)と中性粒子(h^0, g)が互いに近接してシグナルを残している。
このような場合、近接した粒子によって放出されたエネルギーを区別することは困難で、右の図のように間違っ
て再構成されてしまうことがある

Process Definition: 4f_ZZnunu_semileptonic

物理過程の定義

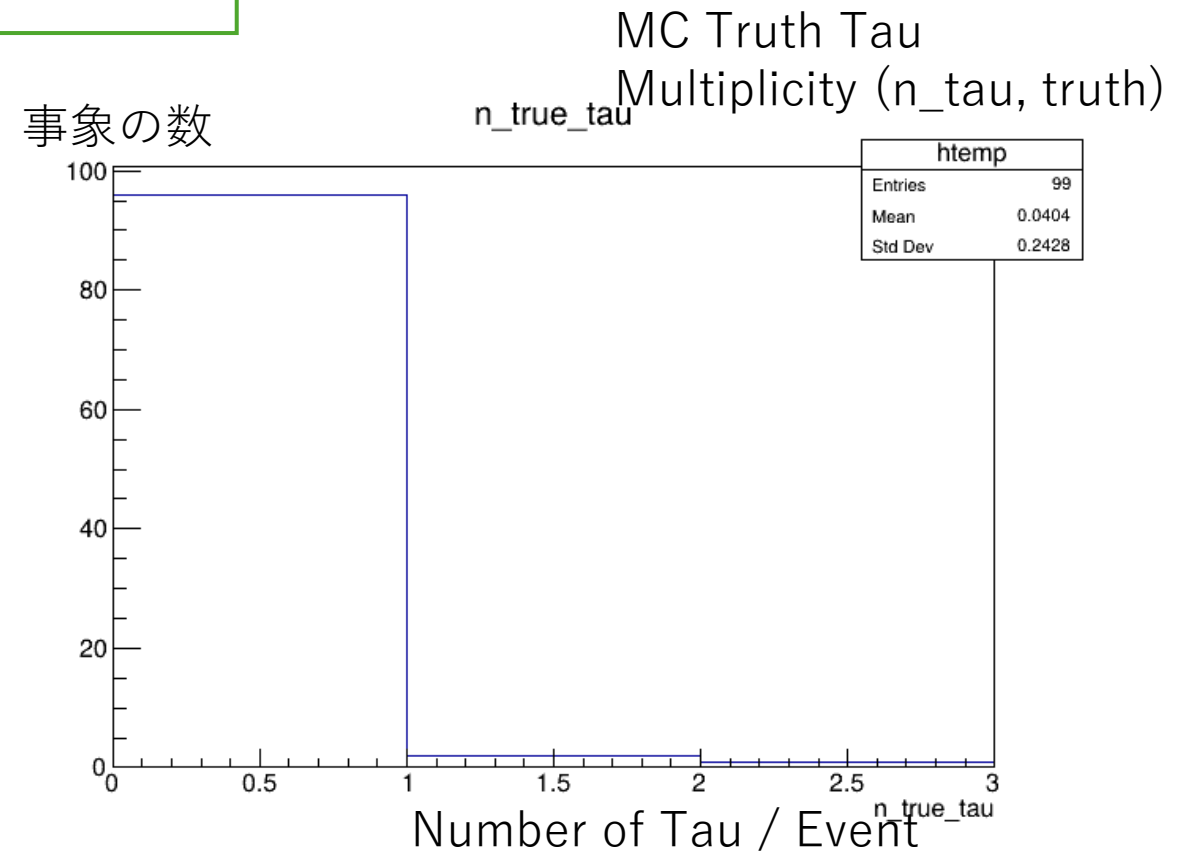
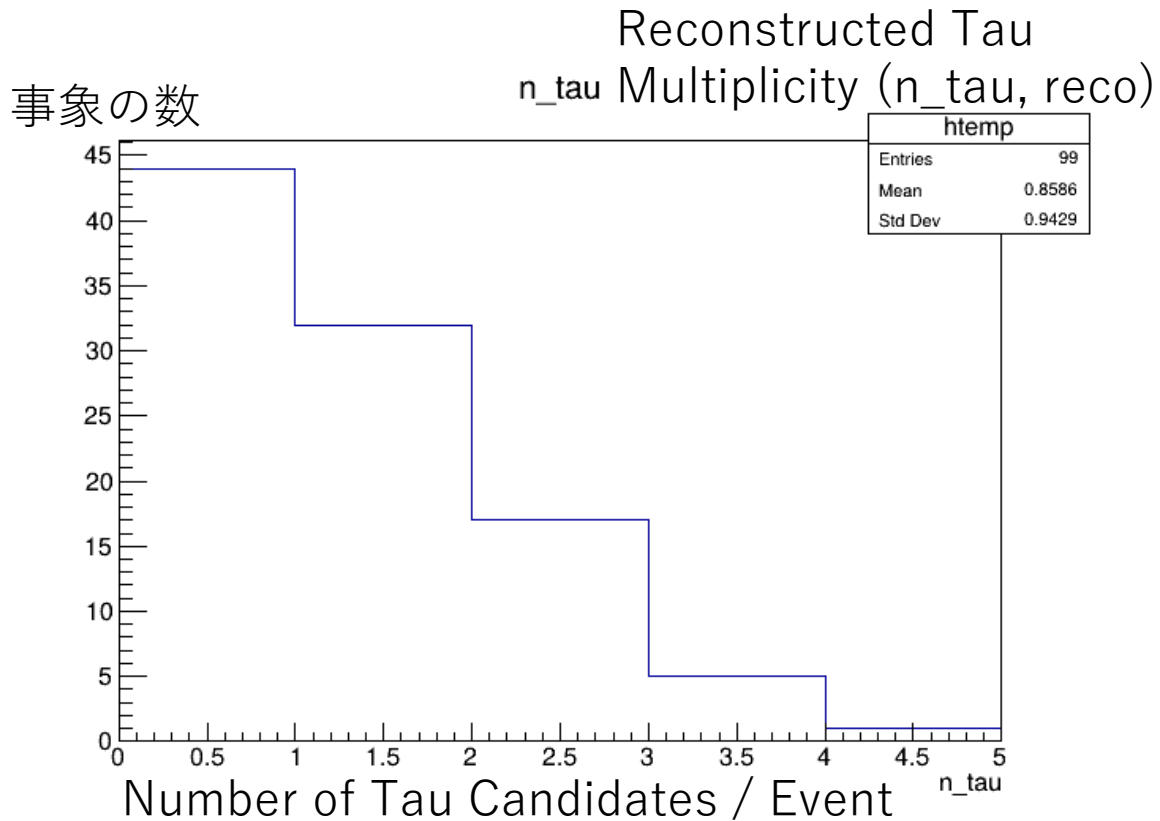
- 生成過程: t-channel電子(e)交換によるZボソン対生成 ($e^+e^- \rightarrow ZZ \rightarrow \nu\bar{\nu}q\bar{q}$)
- 特徴: 2つのハドロンジェット + ニュートリノに伴う不可視粒子による欠損4元運動量がある。



- Hard-process Level:
ハードプロセス ($e^+e^- \rightarrow ZZ \rightarrow \nu\bar{\nu}q\bar{q}$) において、終状態にプライマリなタウは原理的に生成されない ($N_{\tau,primary} = 0$)
- Reconstruction -level expectation :
TauFinderがとらえた再構成候補の大部分 (Vast Majority) は、クォークジェットの誤認 (Hadronic Fake) であると推測される。
- Caveat:
ただし、重ハドロンの二次崩壊 (Secondary Decays) に起因する物理的な真のタウ (Genuine Tau) が低統計ながら随伴する

Baseline Performance: Reconstructed vs. MC Truth Multiplicity

本背景事象サンプルにおけるアルゴリズムのFake-ID Rate（誤同定率）を評価するため、多重度分布の比較を行った。1回の事象の中でTaufinderがタウだと判断したタウ候補の個数(n_{tau})と、実際に1回の事象のうちで生成されたジェネレーターレベルでの真のタウの個数($n_{\text{true_tau}}$)を比較した。

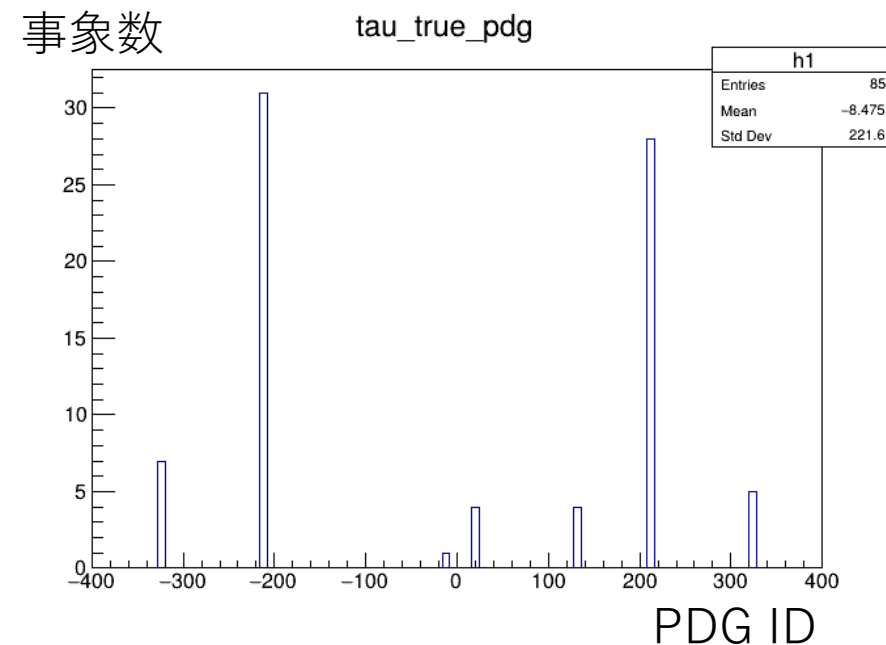


PDG ID Composition

Origin of Misidentified Reconstructed Particles

TauFinderに誤同定された候補の起点となったシード軌跡(Seed Track)をMC Truth情報と紐づけ、PDG IDの分類により、誤同定の主成分がJet Fragmentationに起因するハドロン成分であることを特定した。

MC Truth PDG ID	Particle Candidate
-11	陽電子(Positron)
22	光子(Photon)
± 211	荷電 π 中間子(Pion)
± 321	荷電K中間子(Kaon)
2212	陽子(Proton)
-3112	シグママイナス(Sigma minus)
1,000e+09	原子核破片(Nuclear Spallation Fragment)



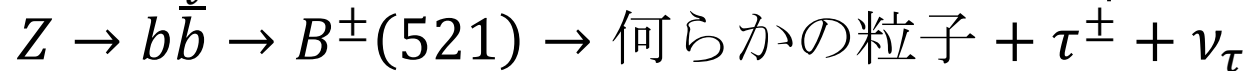
Ancestry Analysis: Origin of Genuine Taus in 4f_zznunu_semileptonic

シミュレーションデータ (MC Truth) に記録されている物理的な真のタウ (Genuine Tau) がどのように生成されているのかを知るため、タウの親粒子のPDG IDを調べた

- ± 521 : B^\pm meson

Zボソンから生まれたbクォークはフラグメンテーション過程において海クォーク (Sea quarks) と結合し、ハドロン化 (Hadronization) を経てB中間子を形成する。

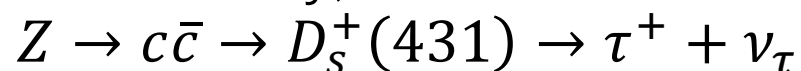
B中間子は不安定で、約1ピコ秒後に別の粒子に崩壊(弱い相互作用)するときに、約2.5%の確率で τ と ν_τ を含む半レプトン崩壊 (Semileptonic decay) を起こす。



- 431: D_s^+ meson

Zボソンからチャームクォーク (c) が生まれた場合、あるいはB中間子が崩壊した過程で D_s^+ 中間子という、チャームクォークと反ストレンジクォークが中間子共鳴状態 (Meson resonance) が出来ることがある。

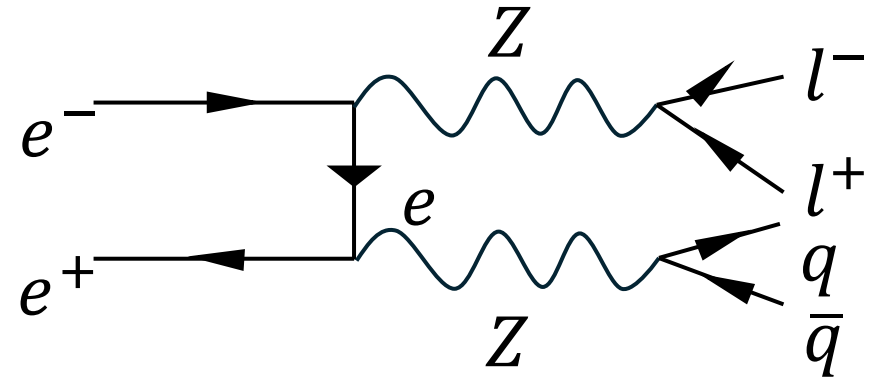
この D_s^+ 中間子は、約5.5%という確率で、直接 τ^+ と ν_τ に順レプトン崩壊して純レプトン崩壊 (Pure leptonic decay) により崩壊する。



Process Definition: 4f_ZZ_semileptonic

物理過程の定義

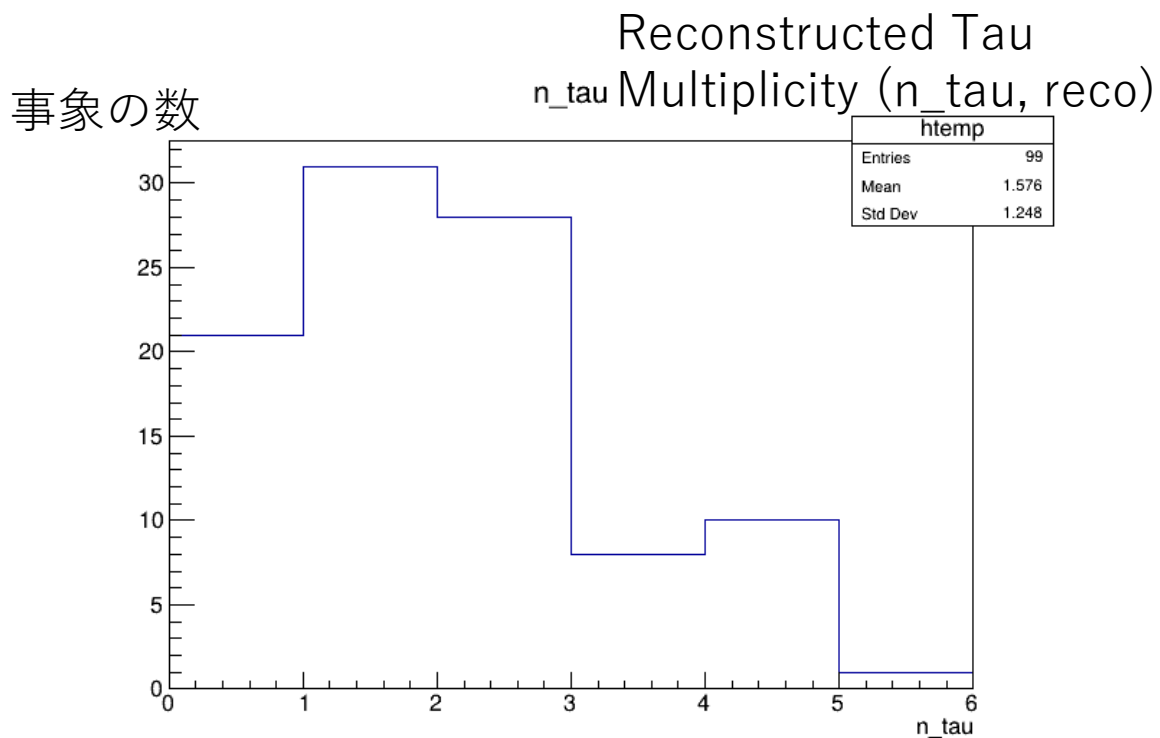
- 生成過程: t-channel電子(e)交換によるZボソン対生成 ($e^+e^- \rightarrow ZZ \rightarrow l^+l^-q\bar{q}$)
- 特徴: 2つのハドロンジェット + 2本の高運動量な孤立荷電レプトン (e, μ, τ) が存在する。



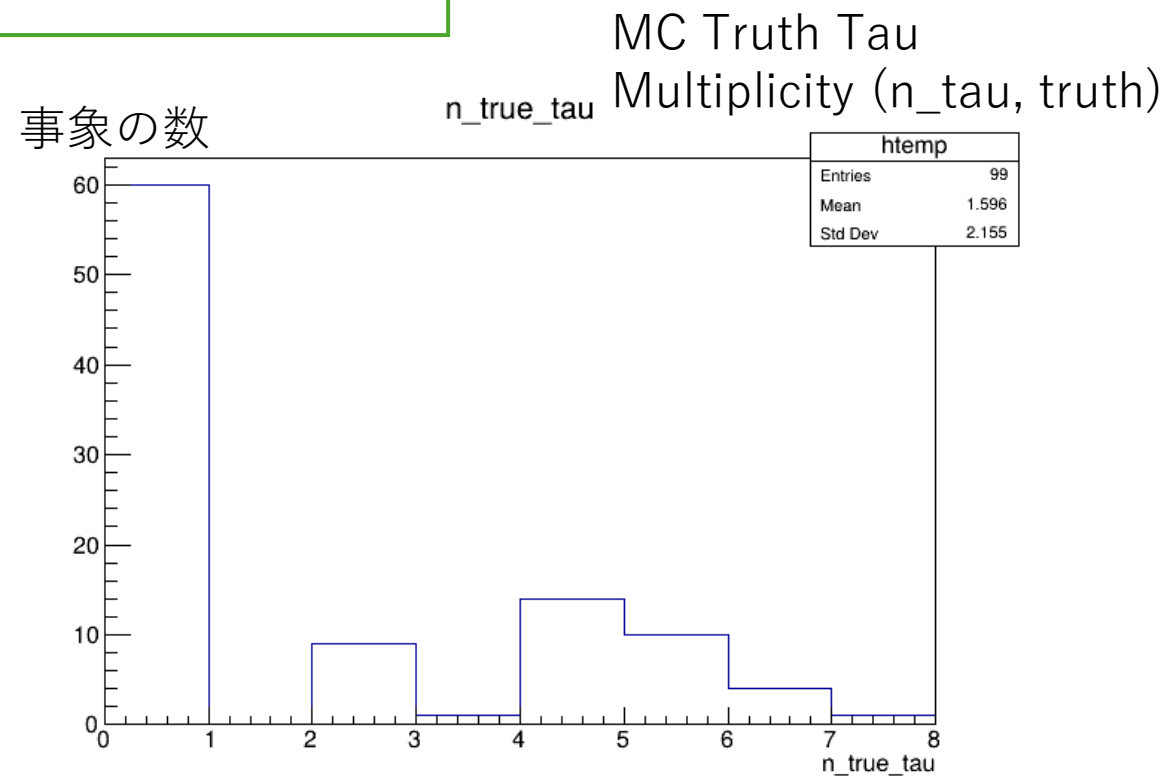
- Hard-process Level:
ハードプロセス($e^+e^- \rightarrow ZZ \rightarrow l^+l^-q\bar{q}$)において、Zボソンの崩壊から直接、プライマリなタウ・レプトン対($\tau^+\tau^-$)が一定の割合で生成される ($N_{\tau,primary} \geq 0$)。
- Reconstruction-level expectation :
TauFinderはこれら真のタウを同定するが、同時に終状態の孤立レプトン (電子・ミュオン) をタウと誤認(Leptonic Fake)するリスクが高いと推測される。
- Caveat :
加えて、クォークジェットの誤認(Hadronic Fake)や、重ハドロンの二次崩壊 (Secondary Decays) に起因する物理的な真のタウ(Genuine Tau)も混在する。

Baseline Performance: Reconstructed vs. MC Truth Multiplicity

本背景事象サンプルにおけるアルゴリズムの同定効率 (Efficiency) および Fake-ID Rate (誤同定率) を評価するため、多重度分布の比較を行った。1回の事象の中でTaufinderがタウだと判断したタウ候補の個数(n_{tau})と、実際に1回の事象のうちで生成されたジェネレーターレベルでの真のタウの個数($n_{\text{true_tau}}$)を比較した。



Number of Tau Candidates / Event



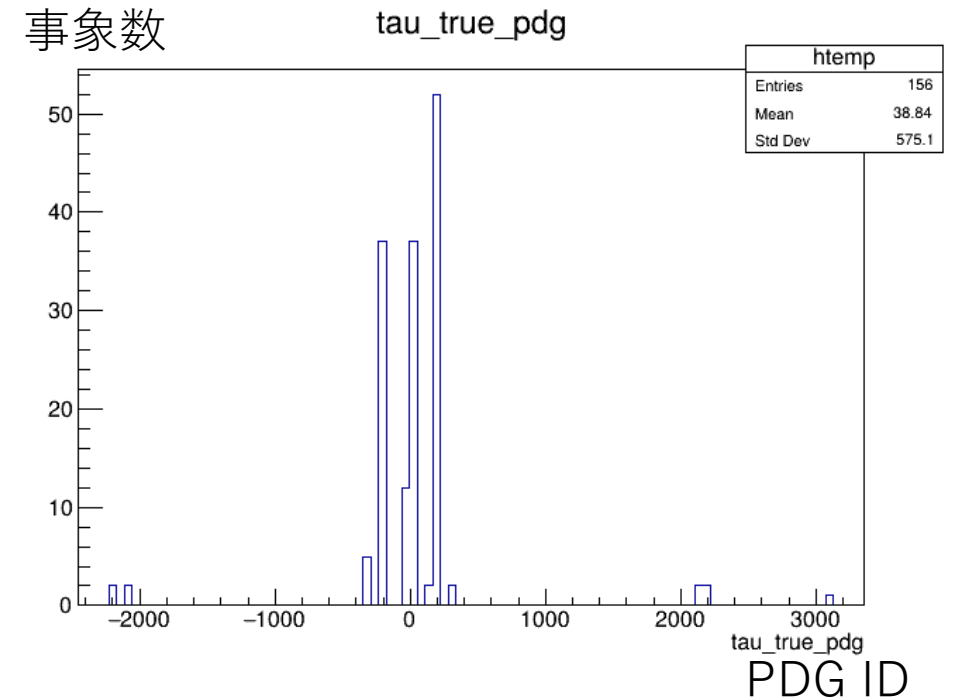
Number of Tau / Event

PDG ID Composition

Origin of Misidentified Reconstructed Particles

TauFinderに誤同定された候補の起点となったシード軌跡 (Seed Track)をMC Truth情報と紐づけ、PDG IDを分類・特定した。

MC Truth PDG ID	Particle Candidate
± 11	電子 / 陽電子 (Electron / Positron)
± 13	ミューオン (Muon)
22	光子 (Photon)
± 211	荷電 π 中間子 (Pion)
± 321	荷電K中間子 (Kaon)
2212	陽子 (Proton)
2112	中性子 (Neutron)
3112	Σ^- バリオン (Sigma baryon)
130	中性K中間子 (K_L^0)



Ancestry Analysis: Origin of Genuine Taus in 4f ZZ semileptonic

シミュレーションデータ (MC Truth) に記録されている物理的な真のタウ (Genuine Tau) がどのように生成されているのかを知るため、タウの親粒子のPDG IDを調べた

- Primary Prompt Production [PDG ID: 11 e^- / 23 Zboson]
 e^+e^- 全消滅 (Annihilation) によるZボソン生成 (Hard scattering) から直接生成された、第一世代のシグナル様タウ背景事象。 ($e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow \tau^+\tau^-$)
- Final State Radiation (FSR) [PDG ID: ± 15 tau]
タウが飛行中に光子 (γ) を放出し、エネルギーを失った際 (制動放射)、ジェネレータ (Whizard/Pythia) がその放射前後を別エントリとして記録したもの。物理的には同一のタウ・レプトンであり、再構成においては一体のものとして扱う必要がある。
- Parton Fragmentation Artifacts [PDG ID: 94]
ジェネレータのハドロン化モデル (Lund String / Cluster model) における計算上の励起状態。
- Beam-induced $\gamma\gamma \rightarrow hadrons$ Overlay [PDG ID: 521 B^+ meson / -511 B^0 meson]
ビームストラールング (ビーム誘導放射光) の相互作用による $\gamma\gamma$ 衝突から生じた、ハドロン・オーバーレイ背景事象。
この背景事象内で生成されたB中間子が二次崩壊 (Secondary decay) してタウを生成している。これは ILC のリアルな検出器環境下における、不可避な物理背景事象 (Irreducible Background) である。

Diagnostics of Over-clustering: $E_{charged}/E_{total}$

tau_charged_E / tau_E {tau_true_pdg == 211}

解析目的:

TauFinderが荷電パイ中間子(π^\pm)をシードとした際に、周囲の不必要な中性エネルギーをどれだけ誤って統合 (Over-clustering) しているかを定量的に評価する。

変数の定義:

tau_E: TauFinderがタウ候補として判定したオブジェクト全体の合計エネルギー。

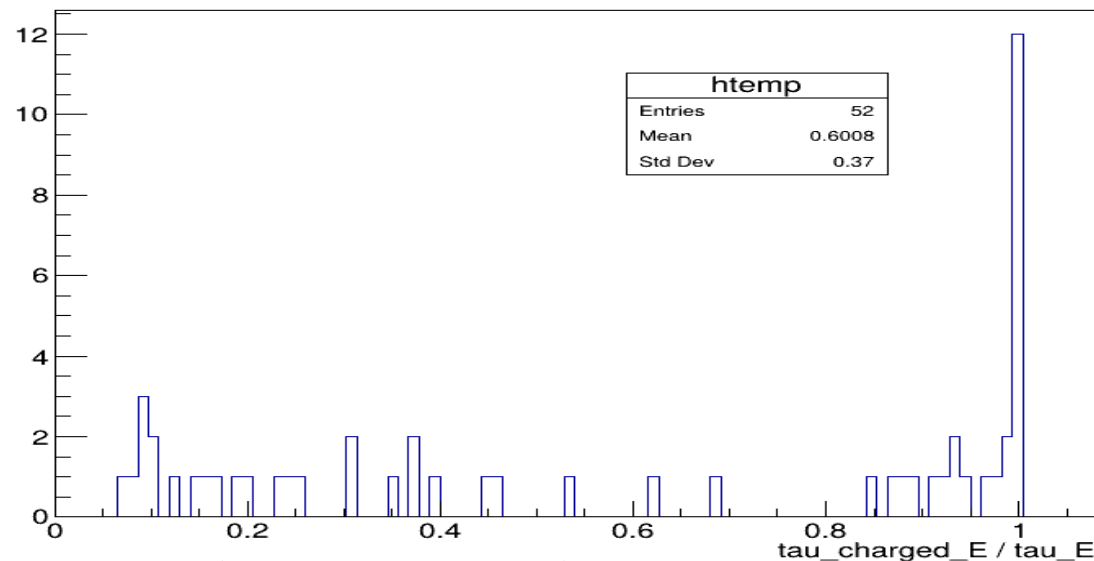
tau_charged_E: タウ候補に含まれる電荷をもったトラックのエネルギーの合計値。

縦軸・横軸:

パイ中間子自身のトラックが、タウ候補全体の何割のエネルギーを占めているか ($E_{charged}/E_{total}$) の分布。

条件:

tau_true_pdg == 211: シミュレーションの真値 (MC Truth) 情報を用いて、起点となった荷電粒子が確実にパイ中間子 (π^\pm) であるオブジェクトのみに絞り込んでいる。



Observation (ヒストグラムの解釈)

分布は $Ratio \approx 1.0$ 付近の集団と、 $Ratio < 0.4$ 付近の集団に二極化している。

$Ratio \approx 1.0$ の集団:

再構成されたタウ候補のほぼ100%のエネルギーを荷電 π 中間子自身が持っている。余計な中性粒子のエネルギーを巻き込んでおらず、純粋な孤立 π 中間子が綺麗に再構成された姿である。

$Ratio < 0.4$ の集団:

荷電トラックのエネルギーが、タウ候補全体の半分以下にとどまっている。これは、アルゴリズムが π 中間子トラックの近傍にあった無関係な電磁シャワー (中性粒子) を過剰に拾い上げ、一つのタウとしてまとめてしまった Over-clustering (過剰クラスターリング) が実際に発生していることを示している。

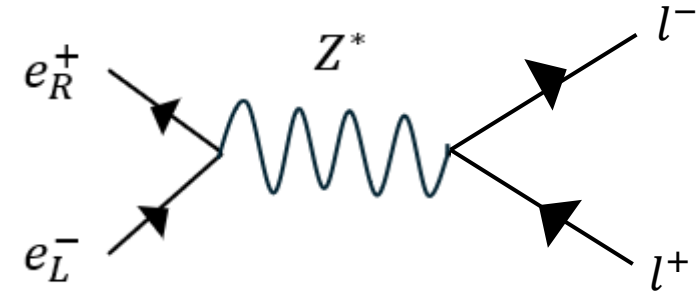
次の課題

- $E_{charged}/E_{total}$ の $0.4 < Ratio < 0.8$ の集団の正体を探る
中性のPFO (Neutral Particle Flow Objects) に焦点を当てていく。
 - 巻き込まれた中性粒子の MC Truth PDG ID 分布
タウ候補を構成する PFO のうち、電荷を持たないもの (Neutral PFO) の真の正体を見る。
 - 中性のPFOの不変質量 (Invariant Mass)
巻き込まれた中性成分のエネルギーと運動量から不変質量を計算する。
 - シード飛跡と中性PFOの空間的距離 (ΔR または 角度 $\Delta\theta$)
荷電 π 中間子と、巻き込まれた中性PFOが、空間的にどれくらい離れているかをプロットする。
- 全体のトポロジーから
シード軌跡の周りだけを見るのではなく、全体の角度情報、距離情報、エネルギー、運動量を探ることで

Process Definition: 2f_leptonic_eL_pR

物理過程の定義

- 生成過程: s-channelのZボソンまたは仮想光子(γ^*)交換によるレプトン対生成 ($e^+e^- \rightarrow Z/\gamma^* \rightarrow l^+l^-$)
※Bhabha散乱等の場合はt-channelも寄与する。
- 特徴:終状態にハドロンジェットを持たず、背中合わせ(Back-to-back)に放出される2本の高運動量な孤立レプトン (e, μ, τ) が存在する事象。
- Hard-process Level:
ハードプロセス($e^+e^- \rightarrow l^+l^-$)において、Zボソンや仮想光子の崩壊から直接、純正なタウ・レプトン対 ($\tau^+\tau^-$) が生成される ($N_{\tau,primary} = 2$)。電子対(e^+e^-) ミューオン対($\mu^+\mu^-$) が生成されるときもある ($N_{\tau,primary} = 0$)。
- Reconstruction-level expectation :
TauFinderはこれら真のタウを高い効率で同定(Tagging)することが期待される。一方で、ジェットが存在しないためクォークの誤認(Hadronic Fake)は抑制されるが、終状態の電子・ミューオンをタウと誤認(Leptonic Fake)するリスクが支配的となる。
- Caveat :
本サンプルは純正なタウペアを豊富に含むため、タウ同定アルゴリズムのシグナル受容効率(Signal Acceptance)を評価・最適化するためのベンチマーク(Standard Candle)として利用できる。

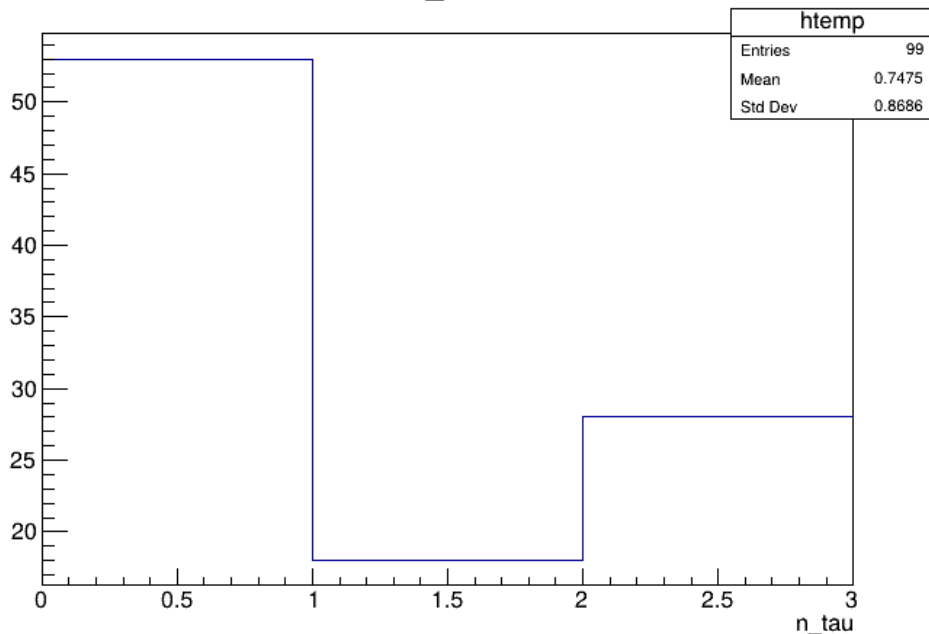


Baseline Performance: Reconstructed vs. MC Truth Multiplicity

純正なタウペア ($\tau^+\tau^-$) を豊富に含む本サンプルにおけるアルゴリズムの同定効率 (Efficiency) および、孤立レプトン由来のFake-ID Rate (誤同定率) を評価するため、多重度分布の比較を行った。1回の事象の中でTauFinderがタウだと判断したタウ候補の個数(n_{tau})と、実際に1回の事象のうちで生成されたジェネレーターレベルでの真のタウの個数($n_{\text{true_tau}}$)を比較した。

Reconstructed Tau Multiplicity (n_{tau} , reco)

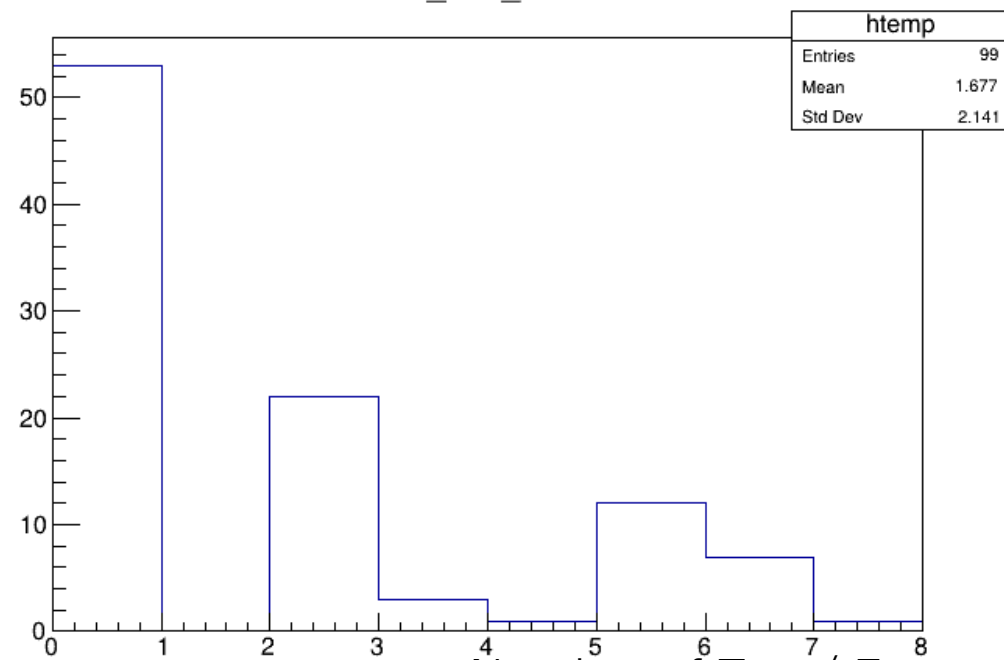
事象の数



Number of Tau Candidates / Event

事象の数

$n_{\text{true_tau}}$



Number of Tau / Event

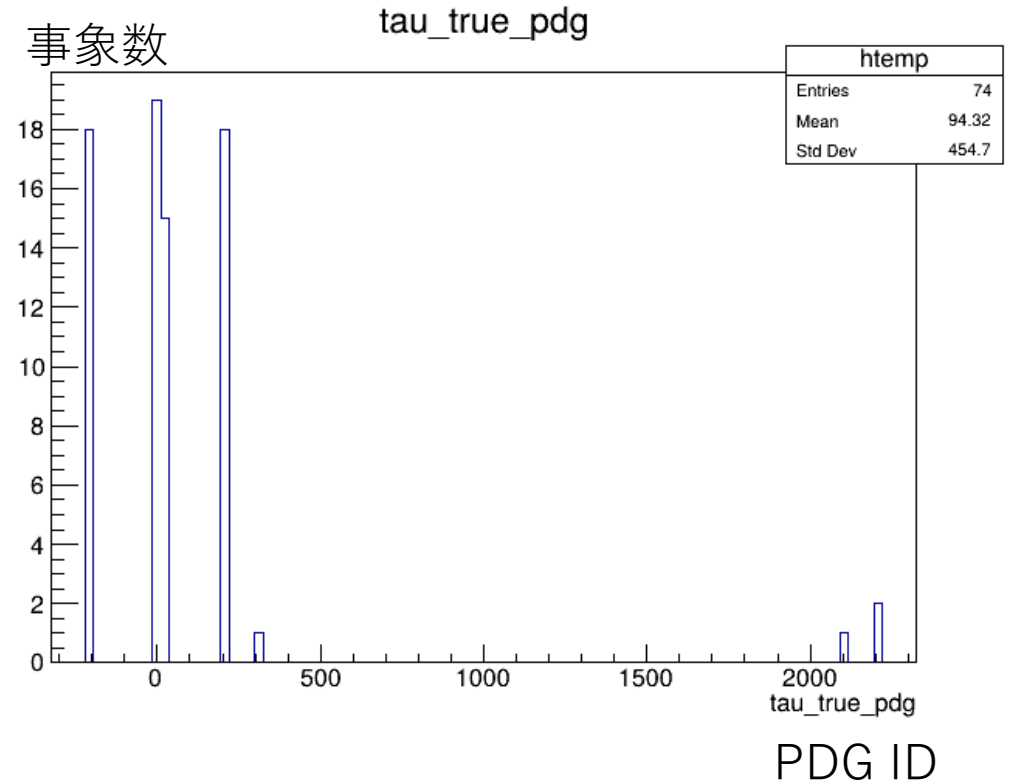
MC Truth Tau Multiplicity (n_{tau} , truth)

PDG ID Composition

Origin of Misidentified Reconstructed Particles

TauFinderに誤同定された候補の起点となったシード軌跡 (Seed Track)をMC Truth情報と紐づけ、PDG IDを分類・特定した。

MC Truth PDG ID	Particle Candidate
± 11	電子 / 陽電子 (Electron / Positron)
± 13	ミューオン (Muon)
22	光子 (Photon)
± 211	荷電 π 中間子 (Pion)
± 321	荷電K中間子 (Kaon)
2212	陽子 (Proton)
2112	中性子 (Neutron)



Ancestry Analysis: Origin of Genuine Taus in 2f_leptonic_eL_pR

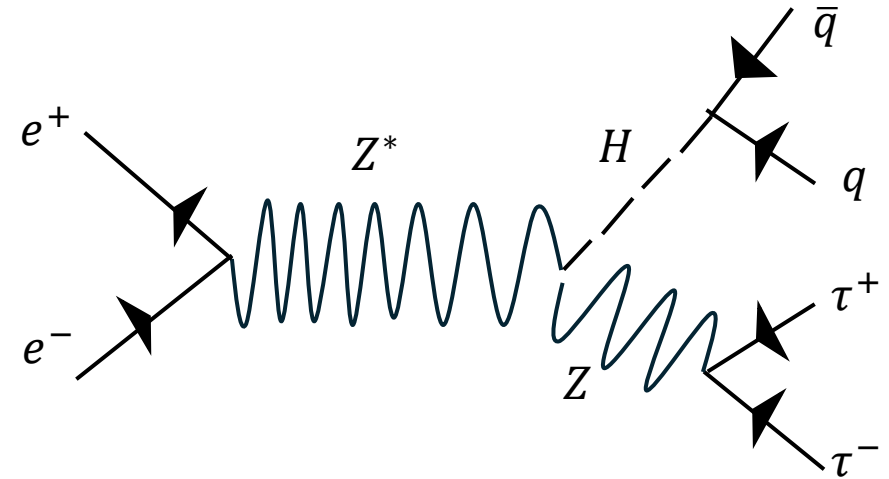
シミュレーションデータ (MC Truth) に記録されている物理的な真のタウ (Genuine Tau) がどのように生成されているのかを知るため、タウの親粒子のPDG IDを調べた

- Primary Prompt Production [PDG ID: 23 (Z) / 22 (γ^*)]
sチャネルのZボソン共鳴または仮想光子交換 ($e^+e^- \rightarrow Z/\gamma^* \rightarrow \tau^+\tau^-$) から直接生成された、第一世代のタウ・レプトン。
- Final State Radiation (FSR) [PDG ID: 15(τ)]
タウが飛行中に光子 (γ) を放出し、エネルギーを失う過程 (制動放射)。ジェネレータ (Whizard/Pythia) の記録上、放射前後のタウが親娘関係としてエントリされているもの。物理的には同一粒子である。
- Parton Fragmentation Artifacts [PDG ID: 94]
ビームストラールング由来の $\gamma\gamma$ 衝突によって重畳 (Overlay) された背景事象内の B 中間子崩壊。

Process Definition: Higgs_tauchannel

物理過程の定義

- 生成過程: Higgsstrahlung (ZH生成) によるヒッグスボソン生成 ($e^+e^- \rightarrow ZH \rightarrow \tau^+\tau^-q\bar{q}$)
- 特徴: Zボソン由来の2本の高運動量な孤立タウ・レプトンに加え、ヒッグス由来の2本のハドロンジェット ($s\bar{s}, b\bar{b}$ 等) が混在する。



Hard-process Level:

大元の反応から、Zボソンの崩壊を介してプライマリなタウ対が必ず生成される ($N_{\tau,primary} = 2$)。ヒッグスボソンは主にクォーク対へと崩壊する。

Reconstruction-level expectation:

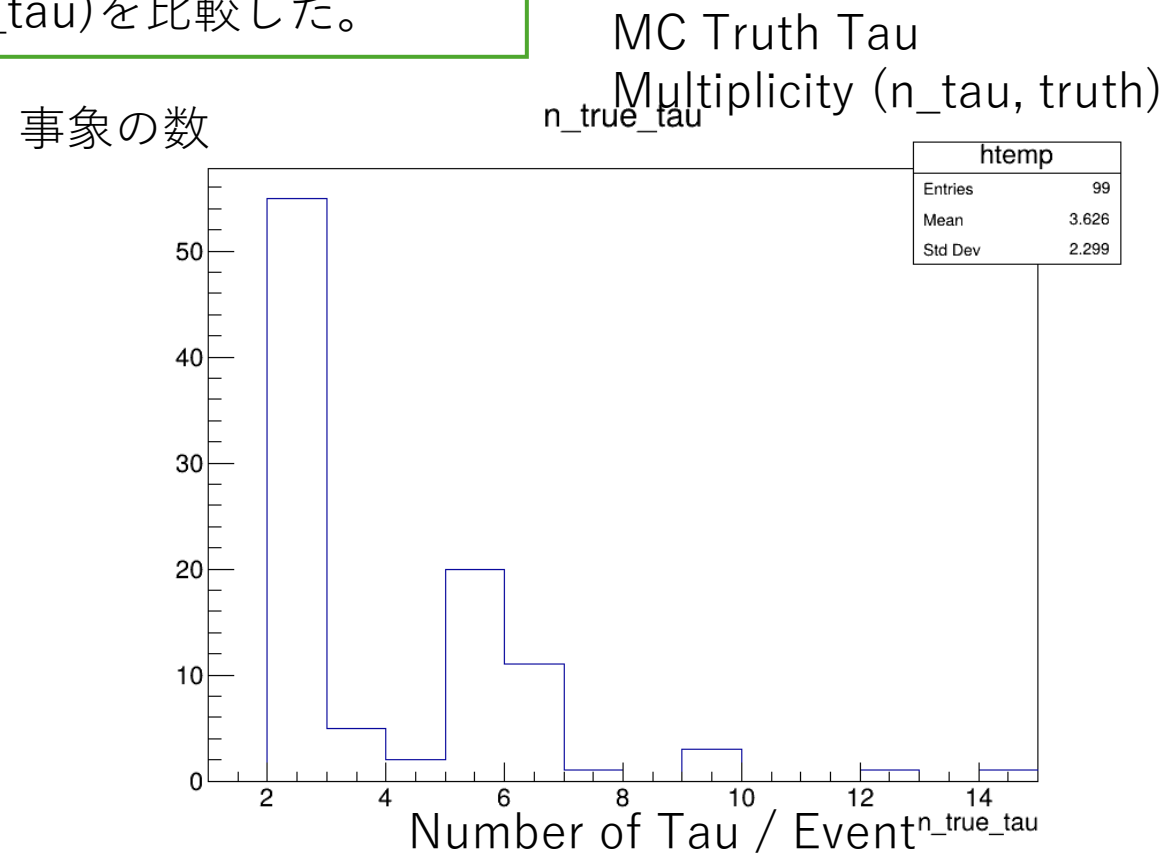
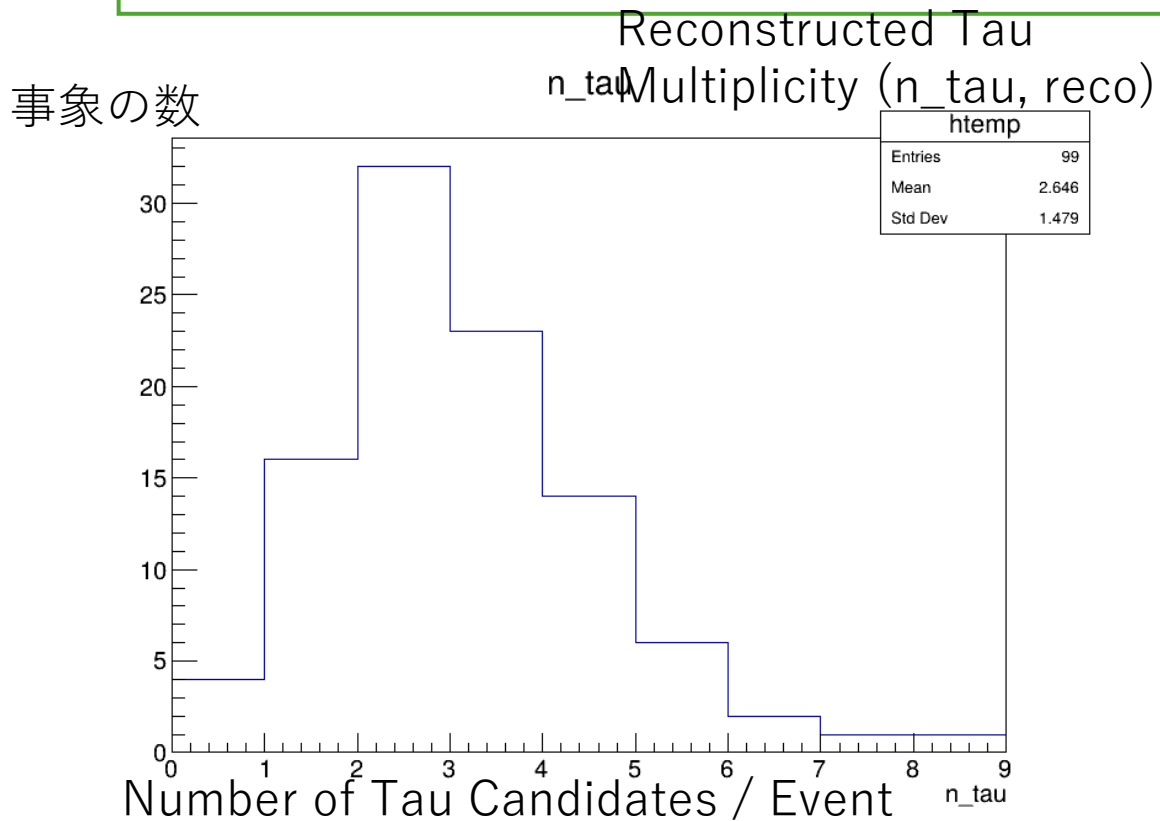
TauFinderを用いて $Z \rightarrow \tau^+\tau^-$ を正確に同定 (Tagging) することで、これまで背景事象として棄却されていたヒッグス事象を回収 (Signal Recovery) し、統計感度を向上させる。

Caveat:

ヒッグス由来のジェットとZ由来のタウが近接するトポロジーにおいて、ハドロン成分の誤結合 (Overclustering) を抑制し、不変質量再構成の精度を維持することが課題となる。

Baseline Performance: Reconstructed vs. MC Truth Multiplicity

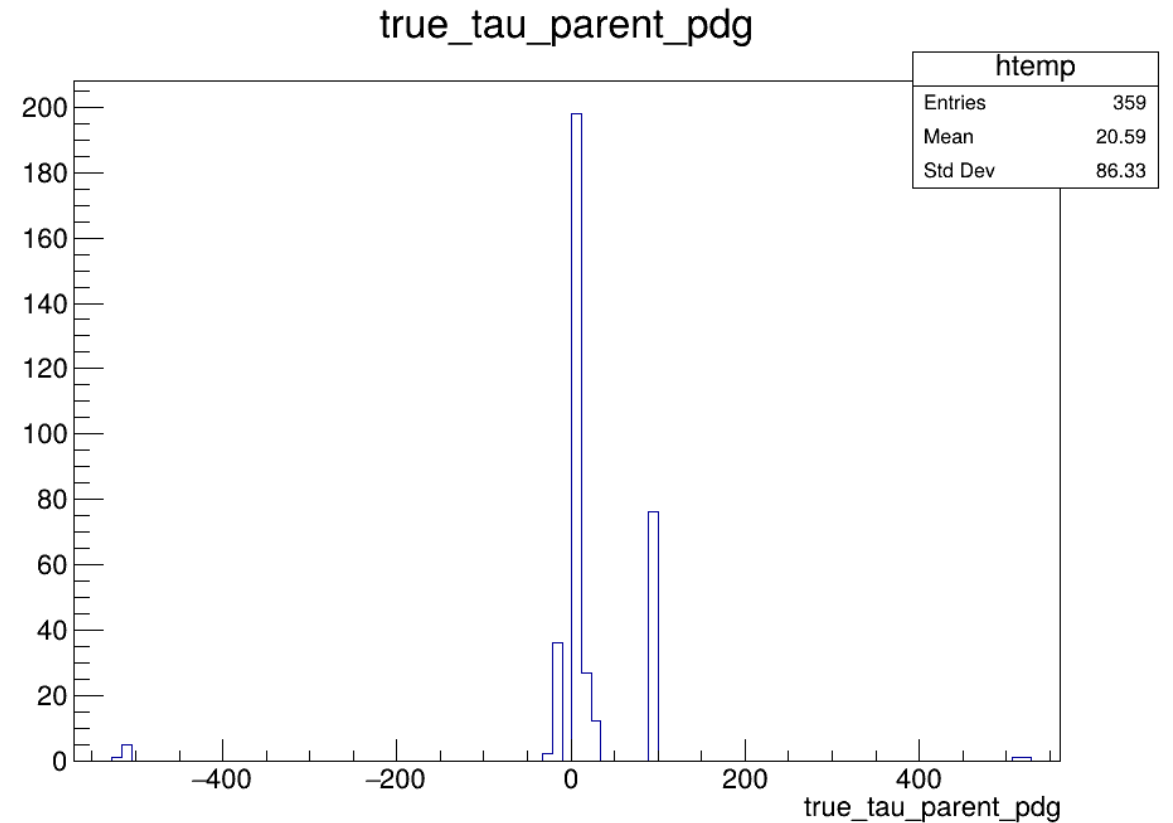
純正なタウペア ($\tau^+\tau^-$) を豊富に含む本サンプルにおけるアルゴリズムの同定効率 (Efficiency) および、孤立レプトン由来のFake-ID Rate (誤同定率) を評価するため、多重度分布の比較を行った。1回の事象の中でTauFinderがタウだと判断したタウ候補の個数(n_{tau})と、実際に1回の事象のうちで生成されたジェネレーターレベルでの真のタウの個数($n_{\text{true_tau}}$)を比較した。



Ancestry Analysis: Origin of Higgs_tauchannel

シグナルサンプル内に存在する真のタウ (Genuine Tau) を特定し、タウ同定アルゴリズムが標的とすべき物理的効果

- Primary Signal Production [PDG ID: 25 (Higgs boson)]
ヒッグスボソンから直接崩壊したタウ対 ($H \rightarrow \tau^+ \tau^-$) 確実に同定 (Tagging) すべき最も重要な標的シグナル
- Weak Boson Decays [PDG ID: 16 (W boson), 17 (Z boson)]
ウィークボソンから崩壊したタウ側の崩壊、または事象内に存在する他のタウからの崩壊
- Hard Process Remainder [PDG ID: 11 (electron)]
初期状態の電子・陽子・中性子の履歴に記録されておらず、シミュレータのハードロン化モデルによるハドロン化の励起
- Generator Artifacts [PDG ID: 11 (electron)]
タウの制動がかからない、シミュレータのハードロン化モデルによるハドロン化の励起
- Secondary Production [PDG ID: 11 (electron)]
B中間子の崩壊に由来する過程、またビームオーバーラップによる背景事象 (除去不能な背景事象) である。



改良前

プロセスの起点としてタウの親

シミュレータのハードロン化モデルによるハドロン化の励起、シミュレータのハードロン化モデルによるハドロン化の励起、シミュレータのハードロン化モデルによるハドロン化の励起

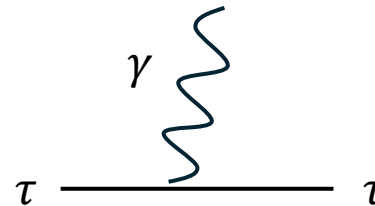
で $H \rightarrow b\bar{b}$ 事象のハードロン化による不可避な背景事象 (除去不能な背景事象) である。

Ancestry Analysis: Origin of Genuine Taus in Higgs_tauchannel

MC Truthにタウが多く記録されていたために、
タウの親粒子を調べた

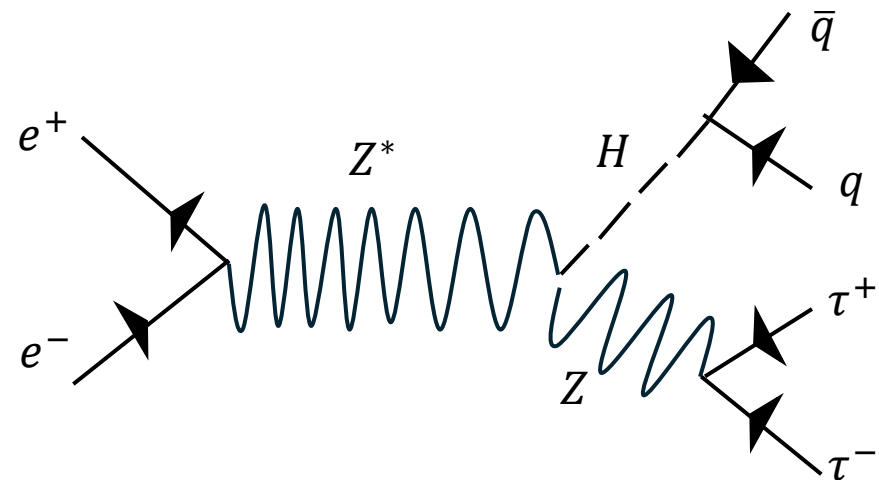
はじめの2つのタウの親粒子は絶対に電子(11)になっている。
レプトンファミリー数保存則に即していないが、これは
 $e^+e^- \rightarrow ZH \rightarrow \tau^+\tau^-q\bar{q}$ において途中にあるZボソンについて省略されているために、電子から生成されているように記録されていると考えられる。

親粒子にタウ(15)があるものもあるが、これらは
FSRなどでもともとあったタウから光子が出てきて、
その後に残ったタウをもう一度カウントしてしまっている
と考えられる。結果、同じタウを2回カウントしてしまっている。



```
*****
* Row * Instance * true_tau_parent_pdg *
*****
* 0 * 0 * 11 *
* 0 * 1 * 11 *
* 0 * 2 * 25 *
* 0 * 3 * 25 *
* 0 * 4 * 15 *
* 0 * 5 * -15 *
* 0 * 6 * 94 *
* 0 * 7 * 94 *
* 0 * 8 * -15 *
* 1 * 0 * 11 *
* 1 * 1 * 11 *
* 2 * 0 * 11 *
* 2 * 1 * 11 *
* 2 * 2 * 94 *
* 2 * 3 * 94 *
* 2 * 4 * -15 *
* 3 * 0 * 11 *
* 3 * 1 * 11 *
* 3 * 2 * 521 *
* 4 * 0 * 11 *
* 4 * 1 * 11 *
* 4 * 2 * 94 *
* 4 * 3 * 94 *
* 4 * 4 * -15 *
* 5 * 0 * 11 *
Type <CR> to continue or q to quit ==>
* 5 * 1 * 11 *
* 6 * 0 * 11 *
* 6 * 1 * 11 *
* 7 * 0 * 11 *
* 7 * 1 * 11 *
* 7 * 2 * -24 *
* 7 * 3 * 15 *
* 8 * 0 * 11 *
* 8 * 1 * 11 *
* 8 * 2 * 94 *
* 8 * 3 * 94 *
* 8 * 4 * -15 *
* 9 * 0 * 11 *
* 9 * 1 * 11 *
* 10 * 0 * 11 *
* 10 * 1 * 11 *
```

生データの中身を調査した



真のタウの親粒子が生データの段階でどのように記録されているかを確認すると共に、ZH随伴生成時の仮想粒子 Z^* が記録されているかを.slcioファイルにて確認した

タウ(± 15)の前にはZボソン(23)は存在しなかった。{22は γ }

タウ(± 15)、ヒッグス(25)の親粒子は電子(± 11)と記録されていた

$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-H$ と記録されていて、 Z^* とZボソンは省略されている。親粒子として電子しかないのは親粒子を一個だけ取得するコードになっていた

```
----- print out of MCPParticle collection -----
flag: 0x0
simulator status bits: [sbvtcls] s: created in simulation b: backscatter v: vertex is not endpoint of parent t: decayed in tracker
c: decayed in calorimeter l: has left detector s: stopped o: overlay

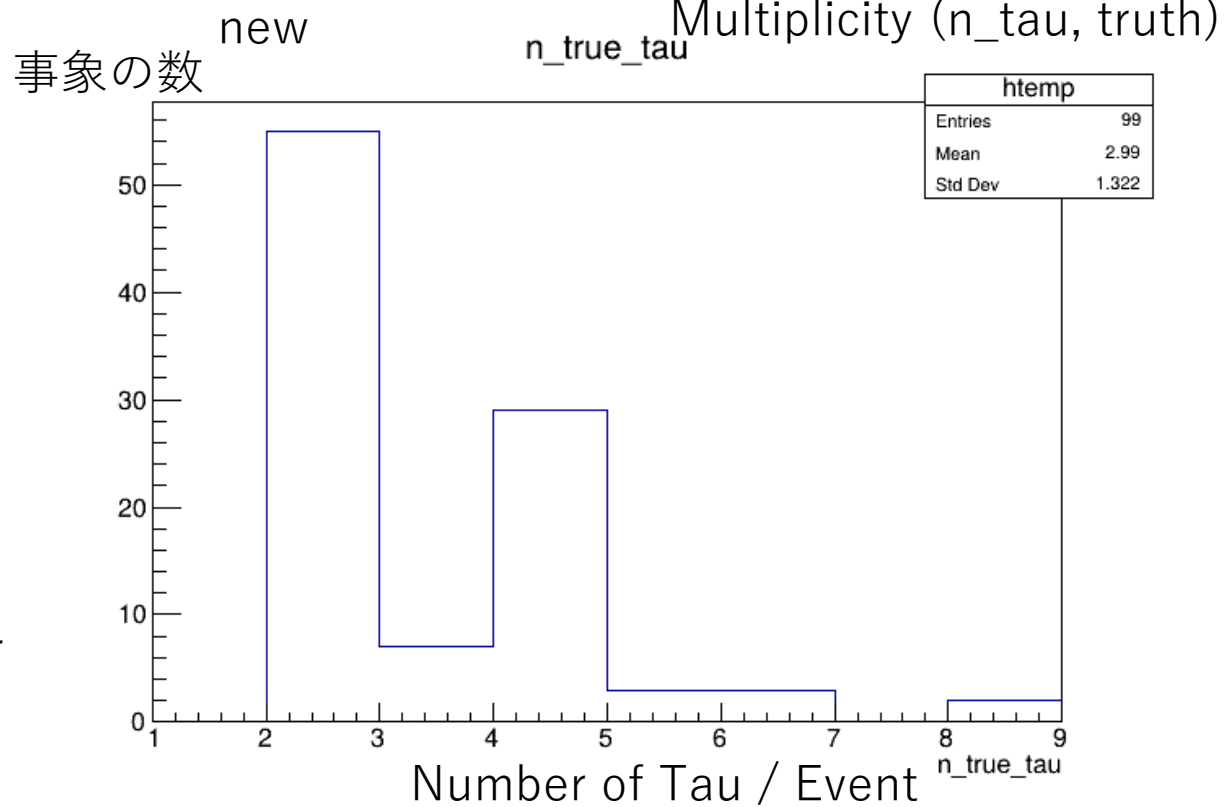
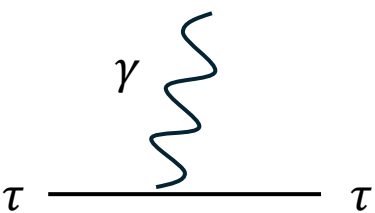
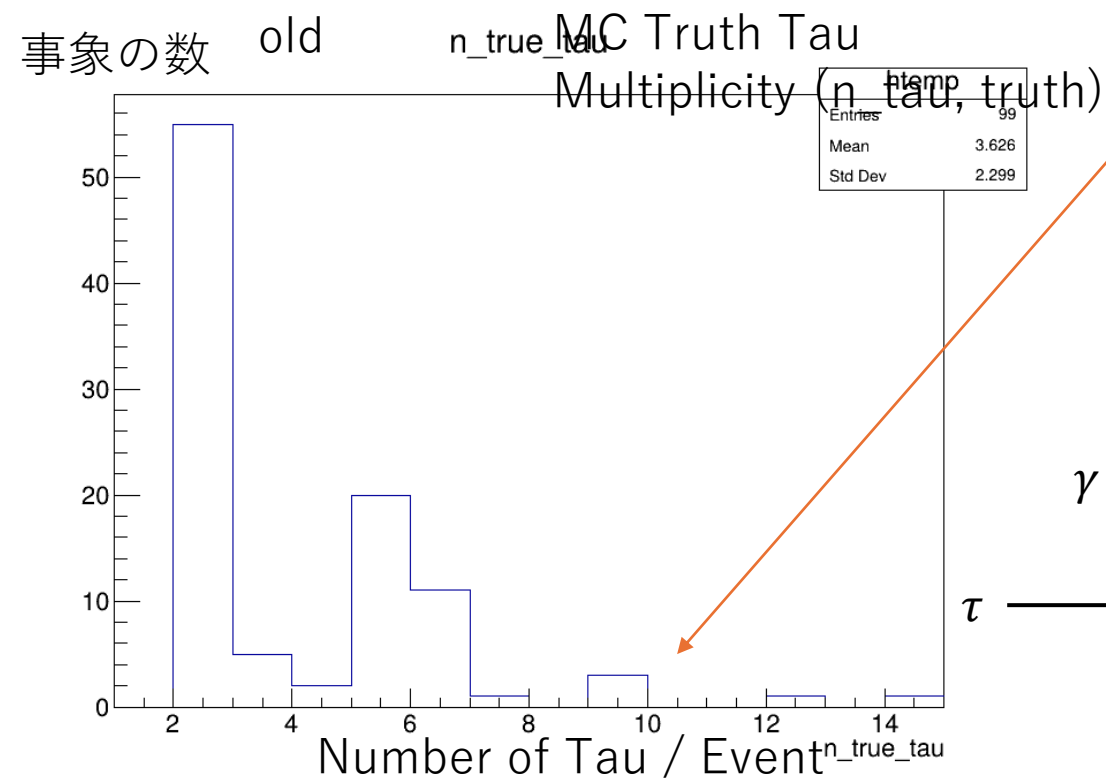
[ id ]index| PDG | px, py, pz | px_ep, py_ep, pz_ep | energy |gen|[simstat ]| vertex x, y ,
z | endpoint x, y , z | mass | charge | spin | colorflow | [parents] - [daughters]
[00000104] 0| 11| 8.75e-01, 0.00e+00, 1.25e+02| 0.00e+00, 0.00e+00, 0.00e+00| 1.25e+02| 4|[ ]| 0.00e+00, 0.00e+00,-
8.17e-02| 0.00e+00, 0.00e+00,-8.17e-02| 5.11e-04|-1.00e+00| 0.00e+00, 0.00e+00, 0.00e+00| (0, 0)| [ ] - [2,3]
[00000105] 1| -11| 8.75e-01, 0.00e+00,-1.25e+02| 0.00e+00, 0.00e+00, 0.00e+00| 1.25e+02| 4|[ ]| 0.00e+00, 0.00e+00,-
8.17e-02| 0.00e+00, 0.00e+00,-8.17e-02| 5.11e-04| 1.00e+00| 0.00e+00, 0.00e+00, 0.00e+00| (0, 0)| [ ] - [2,3]
[00000106] 2| 11| 8.76e-01, 0.00e+00, 1.25e+02| 0.00e+00, 0.00e+00, 0.00e+00| 1.25e+02| 2|[ ]| 0.00e+00, 0.00e+00,-
8.17e-02| 0.00e+00, 0.00e+00,-8.17e-02| 5.11e-04|-1.00e+00| 0.00e+00, 0.00e+00, 0.00e+00| (0, 0)| [0,1] - [4,6]
[00000107] 3| -11| 8.47e-01, 0.00e+00,-1.21e+02| 0.00e+00, 0.00e+00, 0.00e+00| 1.21e+02| 2|[ ]| 0.00e+00, 0.00e+00,-
8.17e-02| 0.00e+00, 0.00e+00,-8.17e-02| 5.11e-04| 1.00e+00| 0.00e+00, 0.00e+00, 0.00e+00| (0, 0)| [0,1] - [5,7]
[00000108] 4| 11| 8.76e-01, 8.06e-09, 1.25e+02| 0.00e+00, 0.00e+00, 0.00e+00| 1.25e+02| 3|[ ]| 0.00e+00, 0.00e+00,-
8.17e-02| 0.00e+00, 0.00e+00,-8.17e-02| 5.11e-04|-1.00e+00| 0.00e+00, 0.00e+00, 0.00e+00| (0, 0)| [2] - [8,9,10]
[00000109] 5| -11| 8.47e-01,-3.40e-05,-1.21e+02| 0.00e+00, 0.00e+00, 0.00e+00| 1.21e+02| 3|[ ]| 0.00e+00, 0.00e+00,-
8.17e-02| 0.00e+00, 0.00e+00,-8.17e-02| 5.11e-04| 1.00e+00| 0.00e+00, 0.00e+00, 0.00e+00| (0, 0)| [3] - [8,9,10]
[00000110] 6| 22|-4.85e-09,-8.06e-09,-6.68e-09|-0.00e+00,-0.00e+00,-0.00e+00| 1.15e-08| 1|[ t s ]| 0.00e+00, 0.00e+00,-
8.17e-02|-6.96e+00,-1.16e+01,-9.67e+00| 1.57e-16| 0.00e+00| 0.00e+00, 0.00e+00, 0.00e+00| (0, 0)| [2] - [ ]
[00000111] 7| 22| 3.02e-04, 3.40e-05,-4.27e-02| 3.02e-04, 3.40e-05,-4.27e-02| 4.27e-02| 1|[ l ]| 0.00e+00, 0.00e+00,-
8.17e-02| 1.06e+02, 1.19e+01,-1.50e+04| 4.66e-10| 0.00e+00| 0.00e+00, 0.00e+00, 0.00e+00| (0, 0)| [3] - [ ]
[00000112] 8| 15| 5.74e+01,-1.56e+01, 2.93e+01| 5.74e+01,-1.56e+01, 2.93e+01| 6.63e+01| 2|[ t ]| 0.00e+00, 0.00e+00,-
8.17e-02| 3.44e+00,-9.36e-01, 1.68e+00| 1.78e+00|-1.00e+00| 0.00e+00, 0.00e+00,-1.00e+00| (0, 0)| [4,5] - [20,21]
[00000113] 9| -15| 1.49e+00, 2.63e+01,-3.24e+01| 1.49e+00, 2.63e+01,-3.24e+01| 4.18e+01| 2|[ t ]| 0.00e+00, 0.00e+00,-
8.17e-02| 2.27e-02, 4.01e-01,-5.76e-01| 1.78e+00| 1.00e+00| 0.00e+00, 0.00e+00, 1.00e+00| (0, 0)| [4,5] - [25,26]
[00000114] 10| 25|-5.71e+01,-1.07e+01, 7.24e+00| 0.00e+00, 0.00e+00, 0.00e+00| 1.38e+02| 2|[ ]| 0.00e+00, 0.00e+00,-
8.17e-02| 0.00e+00, 0.00e+00,-8.17e-02| 1.25e+02| 0.00e+00| 0.00e+00, 0.00e+00, 0.00e+00| (0, 0)| [4,5] - [11,12]
```

真のタウの二重カウントを防ぐ

FSRなどでもともとあったtauから光子が出てきて、その後に残ったtauをもう一度カウントしてしまっていると考えられる。結果、同じtauを重複してカウントしてしまっている。

重複してカウントされてしまったので、異様に個数が増えていた

重複してカウントしないように娘粒子(daughter particle)による判定ロジック(tau->tauになっていないか)を加えた。結果、真のtauの個数は減った



Tauの親粒子の確認

15 と -15 (タウ自身)

FSRを放出したタウは、ジェネレータ上で $\tau_1 \rightarrow \tau_2 + \gamma$ と記録される。改良版のプログラムで最後の τ_2 だけを数える(重複カウント防止)ようにした。すると、 τ_2 の直接の親は放射前の τ_1 (PDG: 15)になる。

94 (ジェネレータの内部状態)

これは物理的な素粒子ではなく、Pythiaなどのイベントジェネレータが計算の途中で作り出すCluster(クラスター)やString(ストリング)と呼ばれる仮想的な状態(PDG 90番台)である。クォークやグルーオンがハドロン化する瞬間の処理用データ。

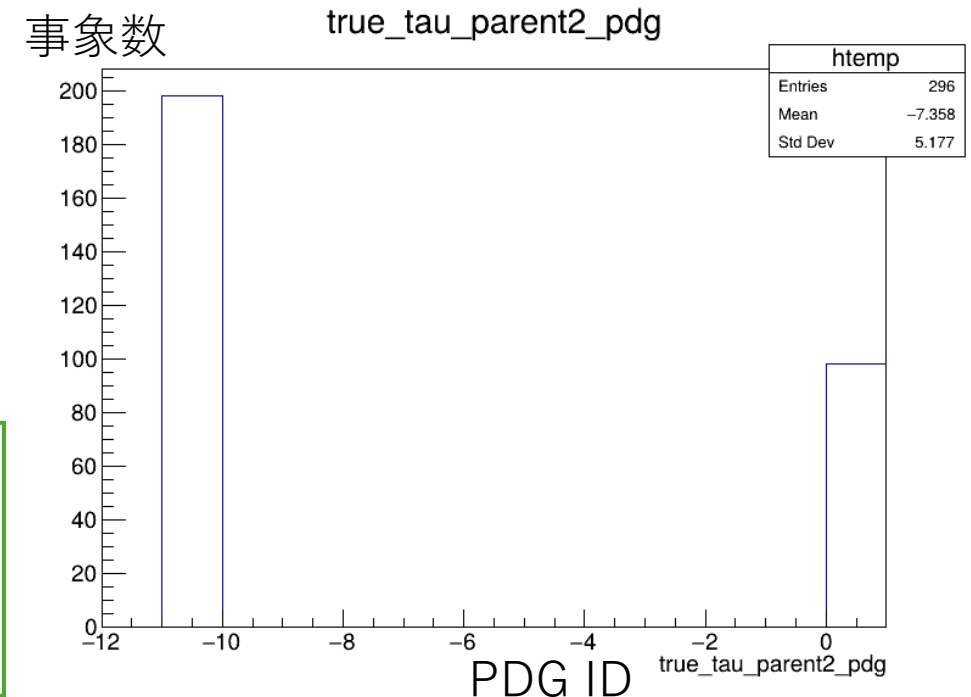
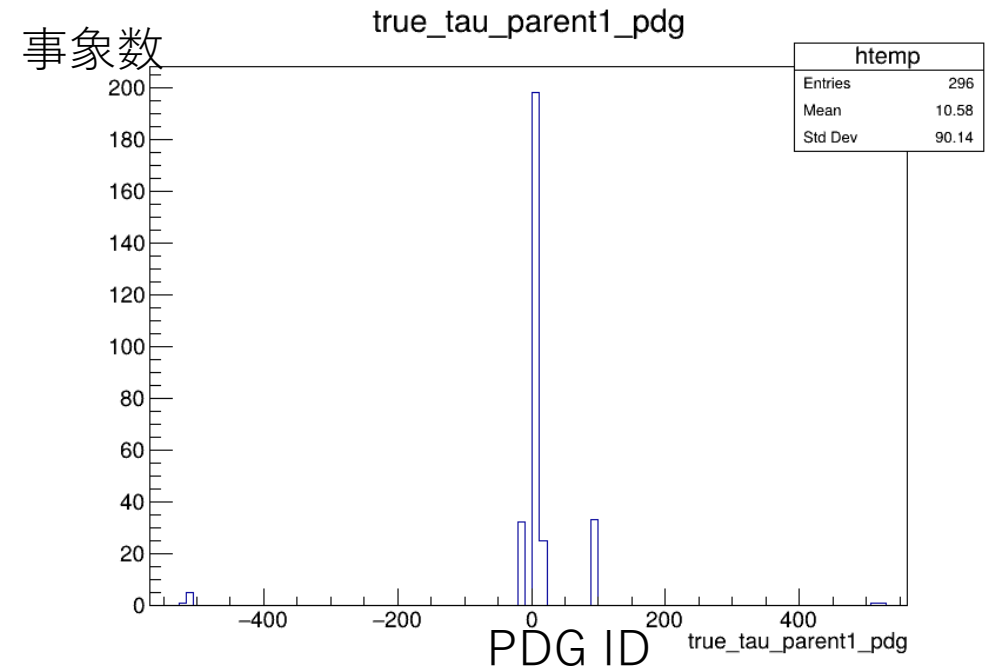
511 (B^0)と 521 (B^+)

これらはB中間子。タウはZやHからだけでなく、重いハドロンの崩壊($B \rightarrow \tau \nu D$ など)からも生まれる。

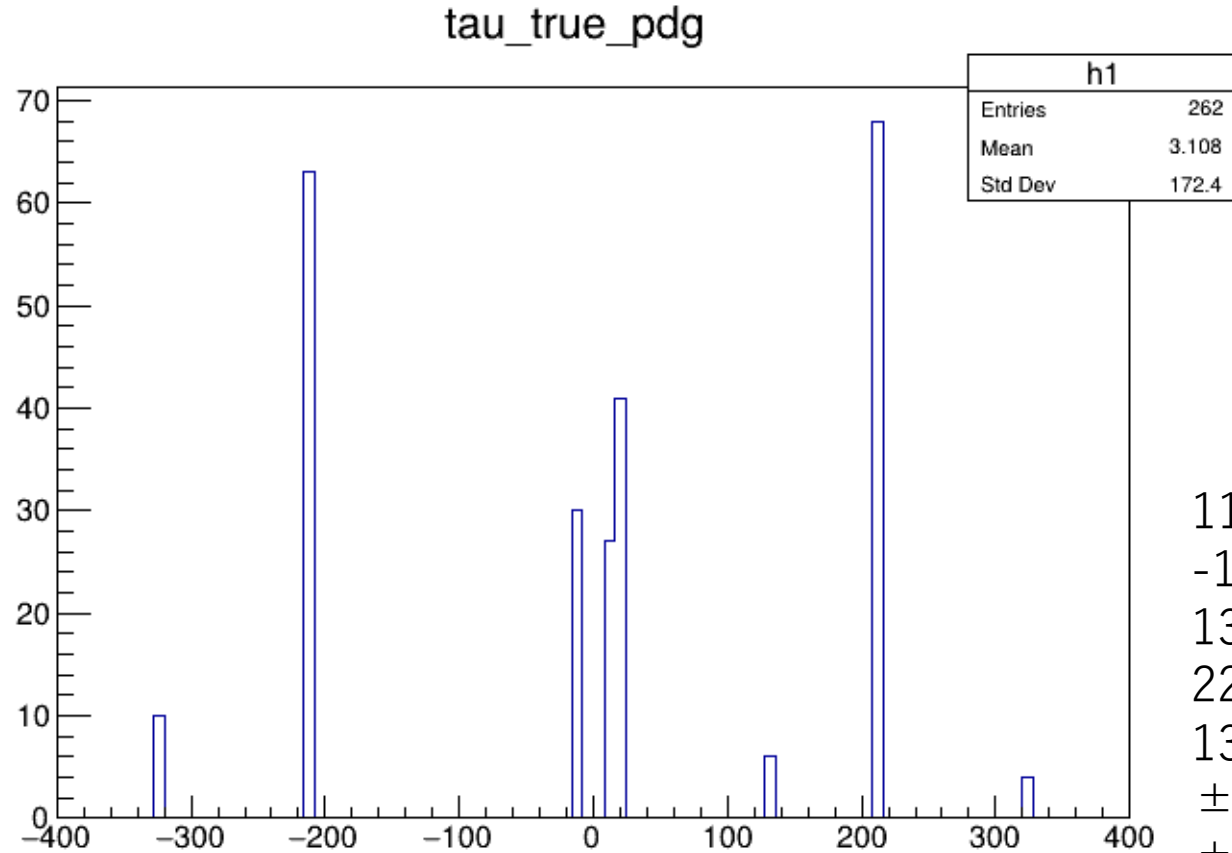
11 と -11 (電子・陽電子)

dumpevent で確認した通り、Zボソンが省略されて直接生成されたパターン。 $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-H$

現在のプログラムは直近の親(1世代前)を取得しているため、FSRのタウ(15)や仮想状態(94)に引っかかってしまっている。Z, H, 電子, B中間子などの大元の起源の方を探りたいので、MC Truthで家系図を遡る(Ancestry Tracing)処理を追加するなど改良の余地あり



Taufinder Result's PDG Code Higgs_tauchannel



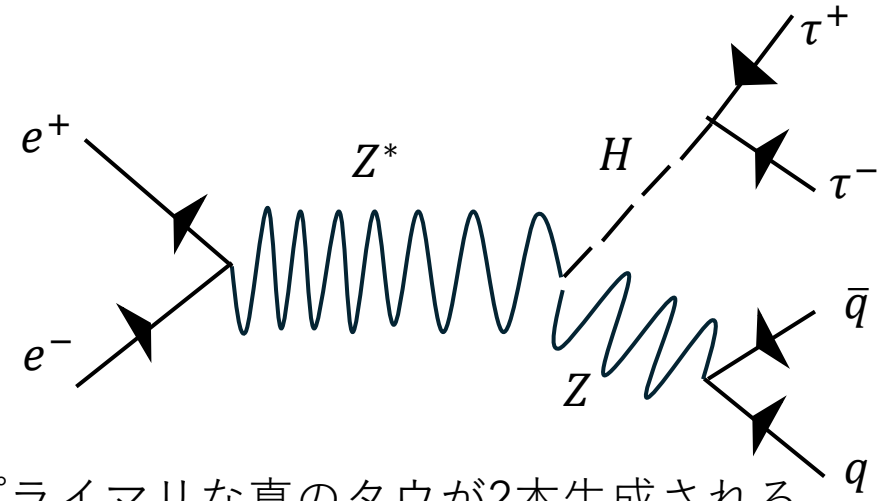
直し必要

11:電子(Electron)
-11:陽電子(Positron)
13:ミューオン(Muon)
22:光子(Photon)
130:中性K中間子 K_L^0
 ± 211 : π 中間子(π meson)
 ± 321 :K中間子(K meson)
2212:陽子(Proton)
2112:中性子(Neutron)

Background Definition: Topological Degeneracy in Higgsstrahlung

物理過程の定義

- 生成過程: sチャネルの Z/γ^* 交換によるHiggsstrahlung過程のうち、ヒッグスがタウ対に、Zボソンがクォーク対に崩壊する事象 ($e^+e^- \rightarrow ZH \rightarrow q\bar{q}\tau^+\tau^-$)
- 特徴: 終状態は2本のハドロンジェット + 2本の孤立タウとなり、目的のシグナル事象 ($Z \rightarrow \tau^+\tau^-$, $H \rightarrow q\bar{q}$) と完全に同一のトポロジー (縮退: Degeneracy) を持つ。



Hard-process Level:

ヒッグスボソンの崩壊 ($H \rightarrow \tau^+\tau^-$ 、 $BR \approx 6.3\%$) に由来するプライマリな真のタウが2本生成される ($N_{\tau,primary} = 2$)。

Reconstruction-level expectation :

TauFinderはこの「本物のタウ」を高い効率で同定する。しかし本解析 ($H \rightarrow s\bar{s}$ 測定) においては、これは回収すべきシグナルではなく、シグナル事象と見分けがつかない強烈なPeaking Background (ピークを持つ背景事象) として機能する。

Caveat :

シグナルと背景事象で「タウが存在する」という事実は完全に一致しているため、TauFinderの性能向上や単純なタウVetoでは原理的に分離できない (Irreducible Background)。

Process Definition: Higgs Production with

$\nu_e \bar{\nu}_e$

物理過程の定義

- 生成過程: 電子・陽電子衝突によるヒッグスボソン生成と、第1世代ニュートリノ対の随伴 ($e^+e^- \rightarrow ZH \rightarrow \nu_e \bar{\nu}_e q \bar{q}$)
- 支配的な寄与:
 - WW-fusion(t-channel W-exchange)
 - Higgsstrahlung(s-channel $Z \rightarrow \nu_e \bar{\nu}_e$)

Kinematic Signature:

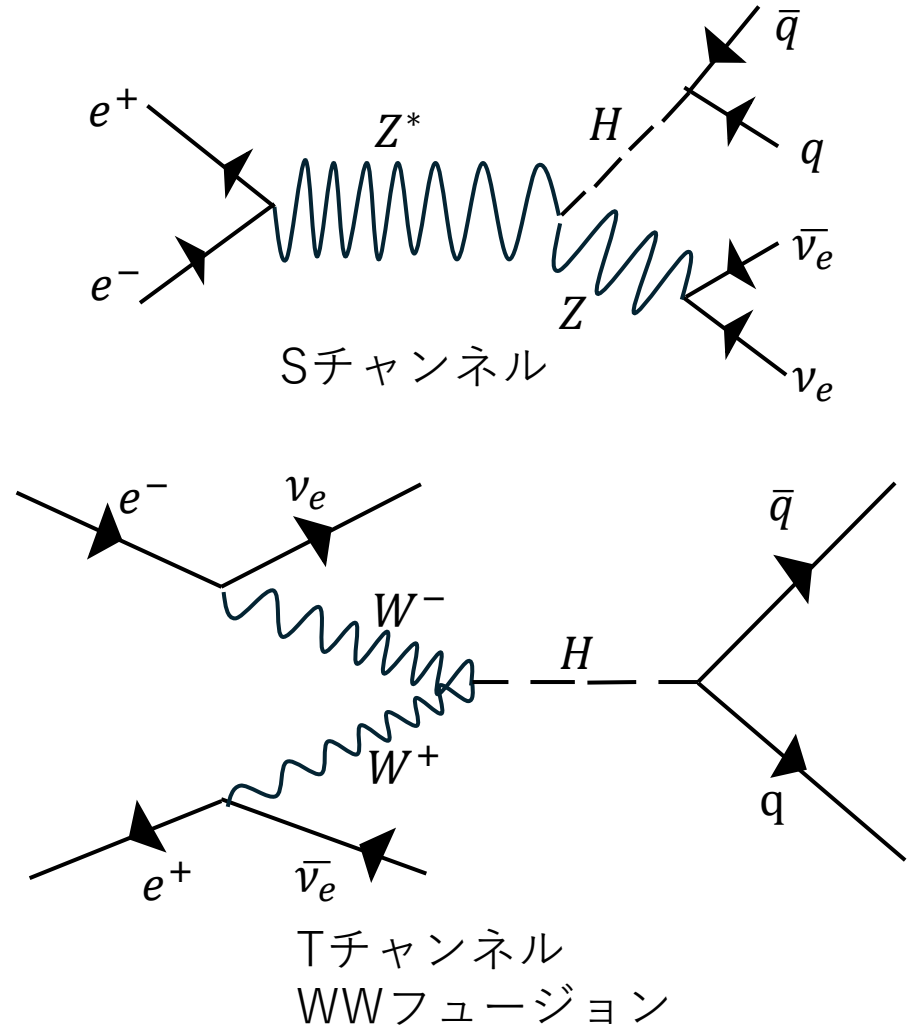
終状態に2個の電子ニュートリノを含むため、事象全体で大きな欠損運動量(\vec{p}_{miss})と欠損質量(M_{miss})を観測する。

Physical Significance of 1st Generation:

ν_μ, ν_τ チャンネルとは異なり、tチャンネルW交換(WW-fusion)が可能のため、断面積が重心系エネルギー \sqrt{s} の上昇と共に増大する性質を持ち、現在のターゲットである ILC250 の解析においても、sチャンネルとの干渉を含め無視できない重要な過程となる。

TauFinder context:

本研究の最終的な測定目標である $H \rightarrow s\bar{s}$ 解析において、この事象は孤立トラック (タウやレプトン) を持たないはずの hadronic な事象に対する TauFinder アルゴリズムの誤同定率 (Hadronic Fake Rate) を評価するための、重要なコントロールサンプルとして機能する。

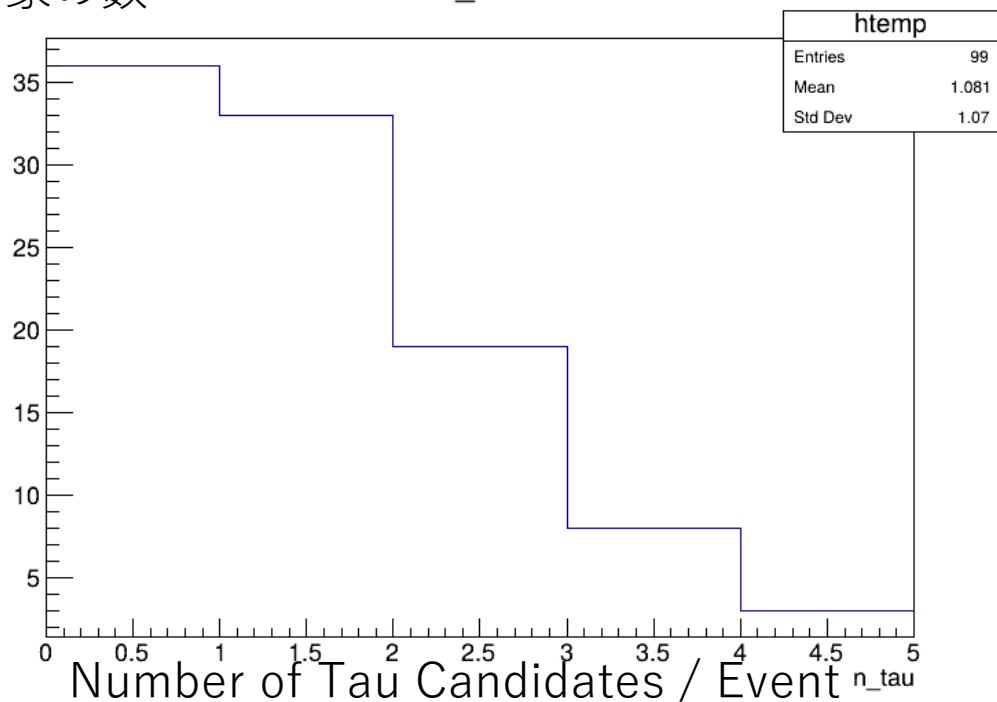


Baseline Performance: Reconstructed vs. MC Truth Multiplicity

第1世代ニュートリノ終状態における2つの主要なヒッグス生成モード。sチャンネル随伴生成 (Higgsstrahlung: $Z \rightarrow \nu_e \bar{\nu}_e$) と、tチャンネルWボソン融合(WW-fusion)の2つの独立した量子振幅が干渉 (Interference) を起こす過程を示す。これらが共存することで、事象全体に極めて大きな欠損運動量(\vec{p}_{miss})と欠損質量(M_{miss})をもたらす独自の運動学的トポロジーが形成され、ILD250解析における重要な背景事象 (または評価用サンプル) となる。

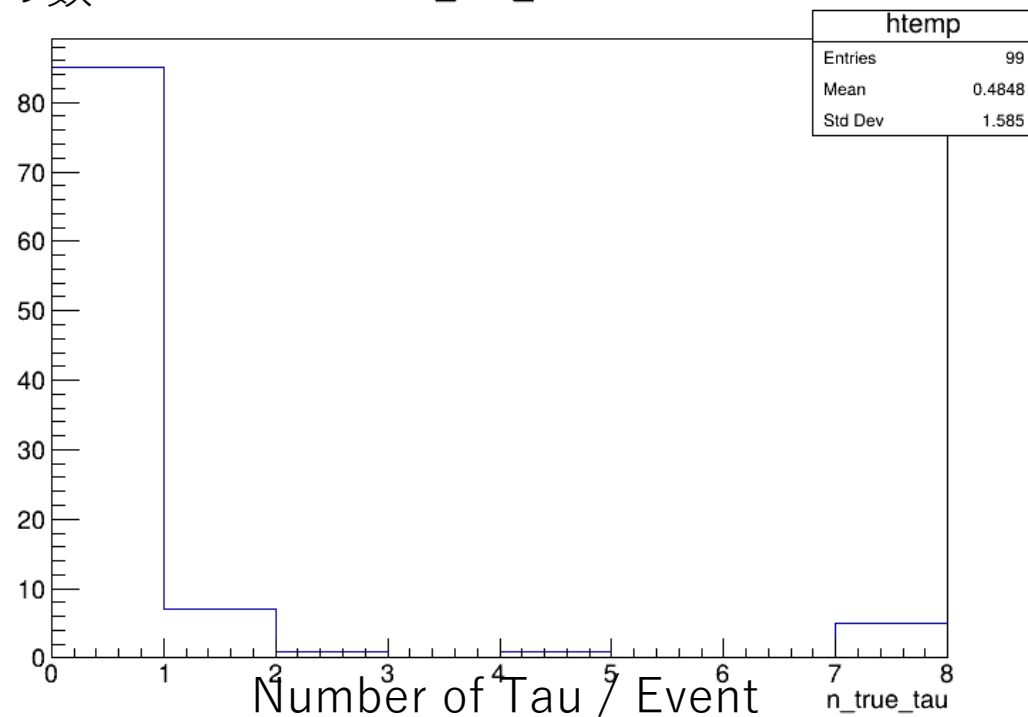
Reconstructed Tau Multiplicity (n_tau, reco)

事象の数

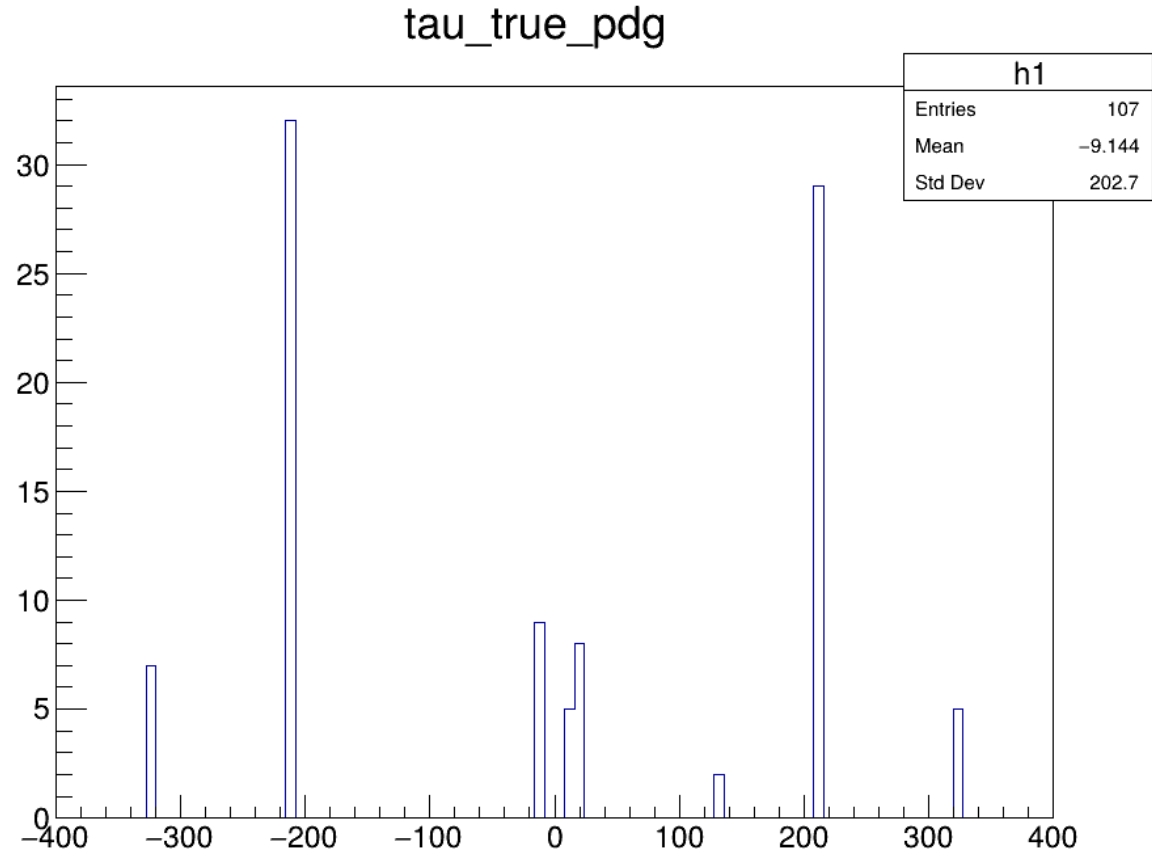


MC Truth Tau Multiplicity (n_tau, truth)

事象の数



Tau true



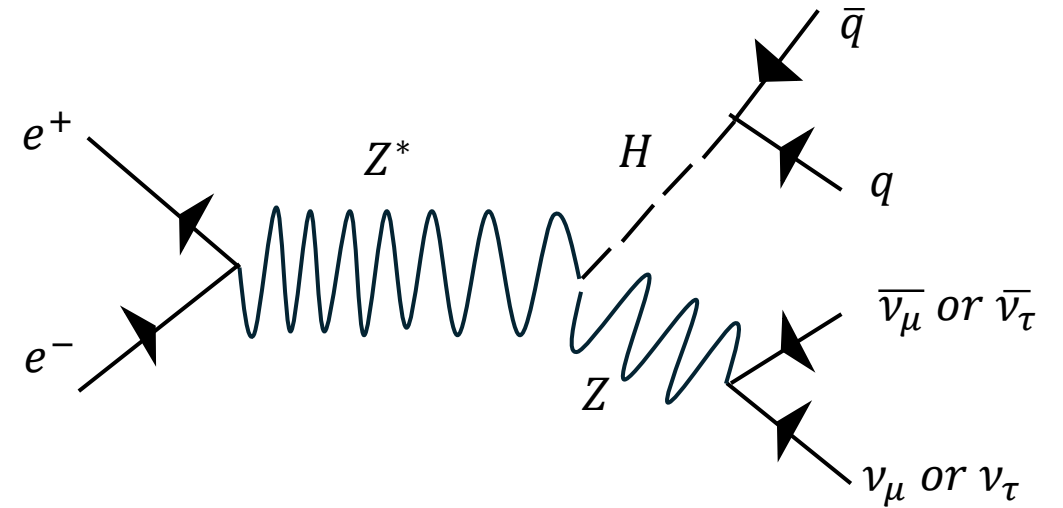
Tau parent

Process Definition: Higgs Production with

$$\nu_{\mu,\tau} \overline{\nu_{\mu,\tau}}$$

物理過程の定義

- 生成過程: 電子・陽電子衝突によるヒッグスボソン生成と、第2・第3世代ニュートリノ対の随伴 ($e^+e^- \rightarrow ZH \rightarrow \nu_{\mu,\tau} \overline{\nu_{\mu,\tau}} q \bar{q}$)
- 支配的な寄与:
 - Higgsstrahlung (s-channel $Z \rightarrow \nu_e \bar{\nu}_e$)
 - *レプトンフレーバー保存則により、WW-fusion過程は存在しない



Kinematic Signature:

終状態に見えないニュートリノを含むため、第1世代と同様に事象全体で大きな欠損運動量 (\vec{p}_{miss}) と欠損質量 (M_{miss}) を観測する。

Physical Significance of 2nd/3rd Generation:

純粋なHiggsstrahlung過程であるため、重心系エネルギー \sqrt{s} の上昇に伴い生成断面積は減少 ($\propto 1/s$) する。しかし、ピーク付近である ILC250 においては依然として主要な事象として機能する。

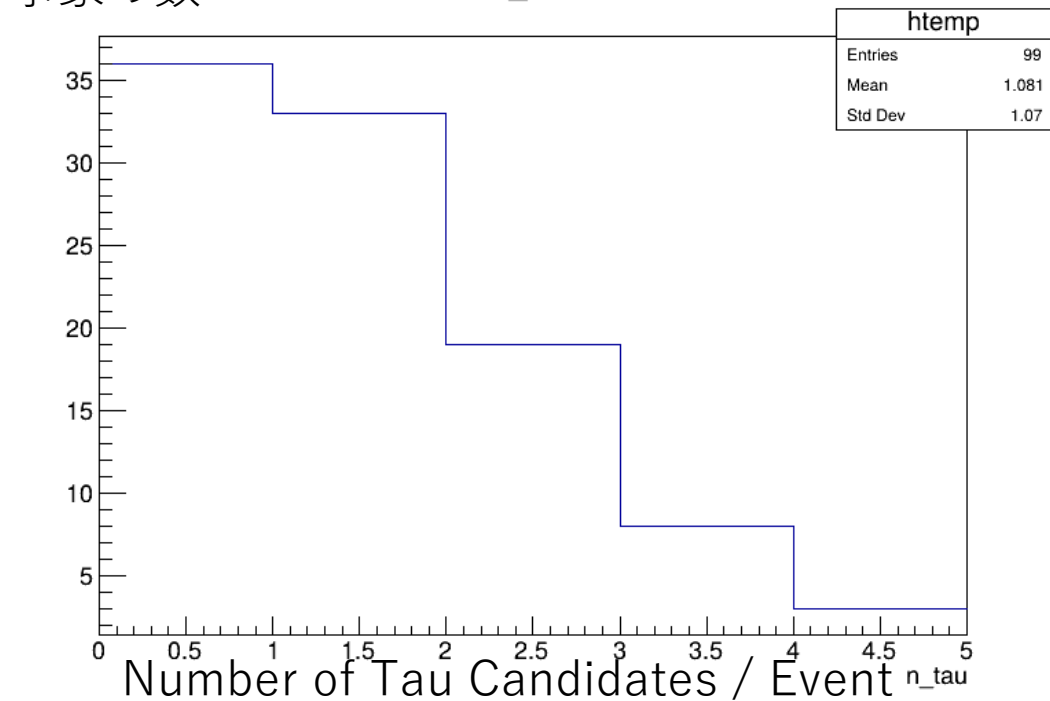
TauFinder context:

本研究の最終的な測定目標である $H \rightarrow s\bar{s}$ 解析において、この事象は孤立トラック (タウやレプトン) を持たないはずの hadronic な事象に対する TauFinder アルゴリズムの誤同定率 (Hadronic Fake Rate) を評価するための、重要なコントロールサンプルとして機能する。

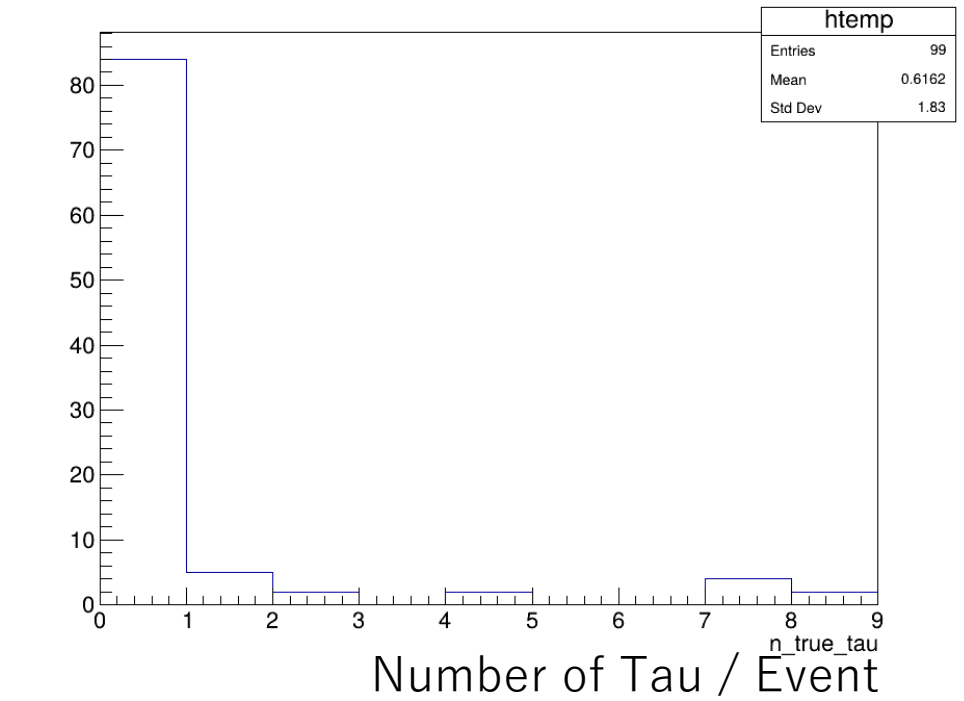
Baseline Performance: Reconstructed vs. MC Truth Multiplicity

第2・第3世代ニュートリノ終状態における純粋なヒッグス生成モード。始状態が電子・陽電子であるため、レプトンフレーバー保存則によりtチャンネルのWW-fusionは禁じられ、sチャンネルのHiggsstrahlung($Z \rightarrow \nu_{\mu,\tau} \bar{\nu}_{\mu,\tau}$)のみが単独で寄与する。干渉項が存在しない純粋なトポロジーを形成し、 $H \rightarrow s\bar{s}$ 解析において孤立トラックを持たないはずのハドロン事象に対するTauFinderアルゴリズムの誤同定率 (Hadronic Fake Rate) を評価するための重要なコントロールサンプルとなる。

Reconstructed Tau Multiplicity (n_tau, reco)



MC Truth Tau Multiplicity (n_tau, truth)



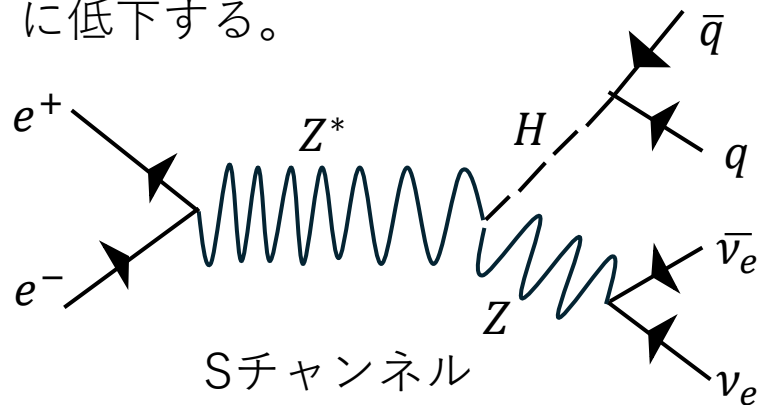
The Difference in Production Mechanisms

Higgsstrahlung(s-channel)

電子と陽電子が正面衝突し、エネルギーを1点に集中させる対消滅型反応。

$$\sigma(s) \propto 1/s$$

重心系エネルギー \sqrt{s} が上がるほど、粒子の波長が短くなり衝突確率が減少する。
ILC250でピークを迎え、その後急激に低下する。



WW-fusion (t-channel)

電子と陽電子が仮想的なWボソンを放出し、それが融合するすれ違い型反応。

