

ATLAS Detector Monitoring with Jets

Presentasjon av resultater oppnådd gjennom
arbeid med mastergradsoppgave i
eksperimentell partikkelfysikk

av

Kent Olav Skjei

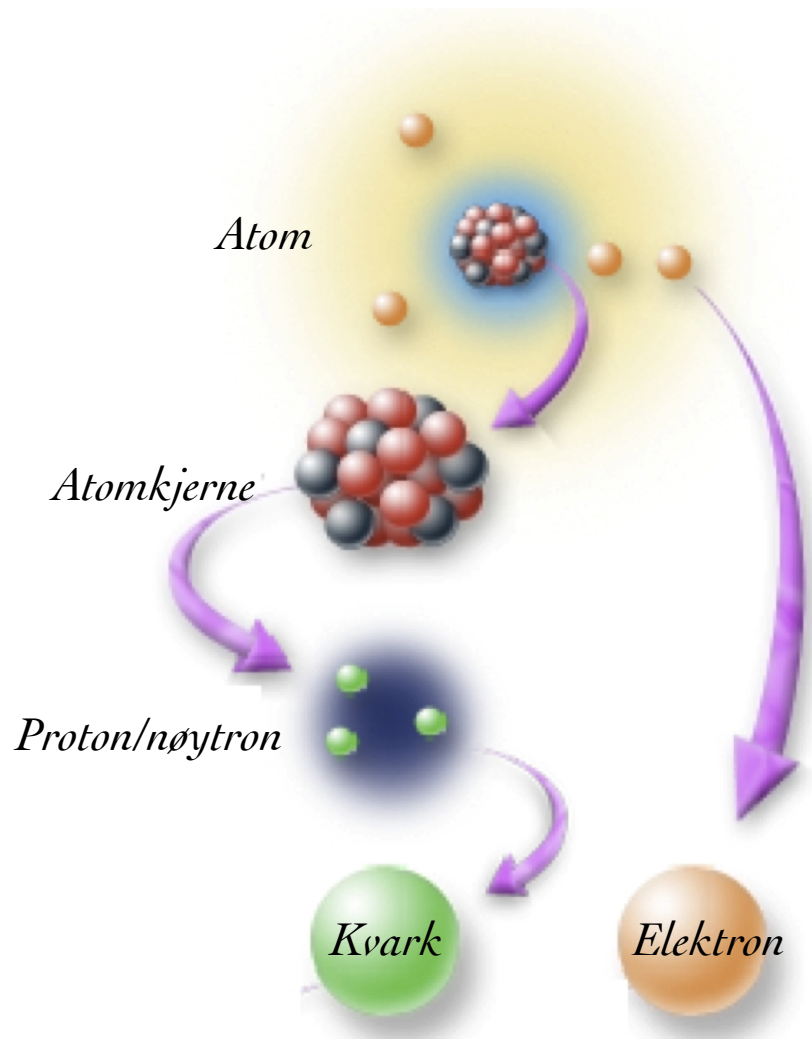


UNIVERSITETET I BERGEN

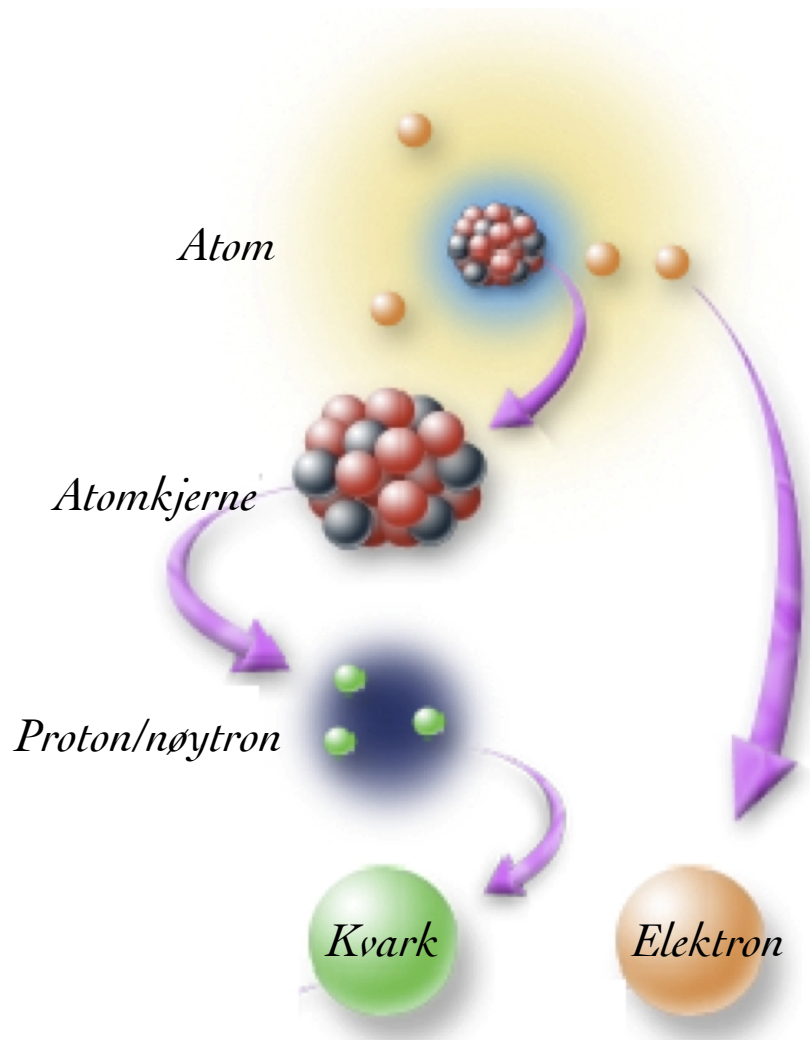
Kent Olav Skjei Masterpresentasjon

- Studere ATLAS med hjelp av hendelser med to jet'er – dijets – som vil være de vanligste hendelsene i tidlig ATLAS-data
- Vil bruke disse hendelsene til å overvåke jet-energioppløsningen i ATLAS
- Utvikle et program som finner dijet-hendelser og lager histogrammer som er relevante for energioppløsningen
- Programmet kan brukes til å oppdage eventuelle store feil med detektoren i ATLAS-overvåking
- Vi har evaluert programmet på Monte Carlo simuleringer av dijet- og top-hendelser, samt pseudodata (FDR2)

- Introduksjon til standardmodellen i partikkelfysikk
- CERN, LHC og ATLAS
- ATLAS Software
- Datasett
- Resultater og perspektiv
- Oppsummering



- Det meste rundt oss er bygd opp av atomer
- Atomene består av en positivt ladd kjerne og negativt ladde elektroner som eksisterer rundt kjernen
- Kjernen består av nøytrale nøytroner og positivt ladde protoner
- Disse partiklene består igjen av 3 valenskvarker (opp- eller nedkvark) og en sjø av gluoner og sjøkvarker (virtuelle kvark-antikvark-par)



- Antipartikkel: Partikkel med samme egenskaper, men motsatt elektromagnetisk ladning. Nøytrale bosoner er sin egen antipartikkel
- Kvarker kan ha tre ulike fargeladninger
- Ser ikke individuelle kvarker
- Kvarker bygger opp hadroner - kombinasjoner av kvarker med en nøytral fargekombinasjon
- Nøytroner og protoner er eksempler på hadroner

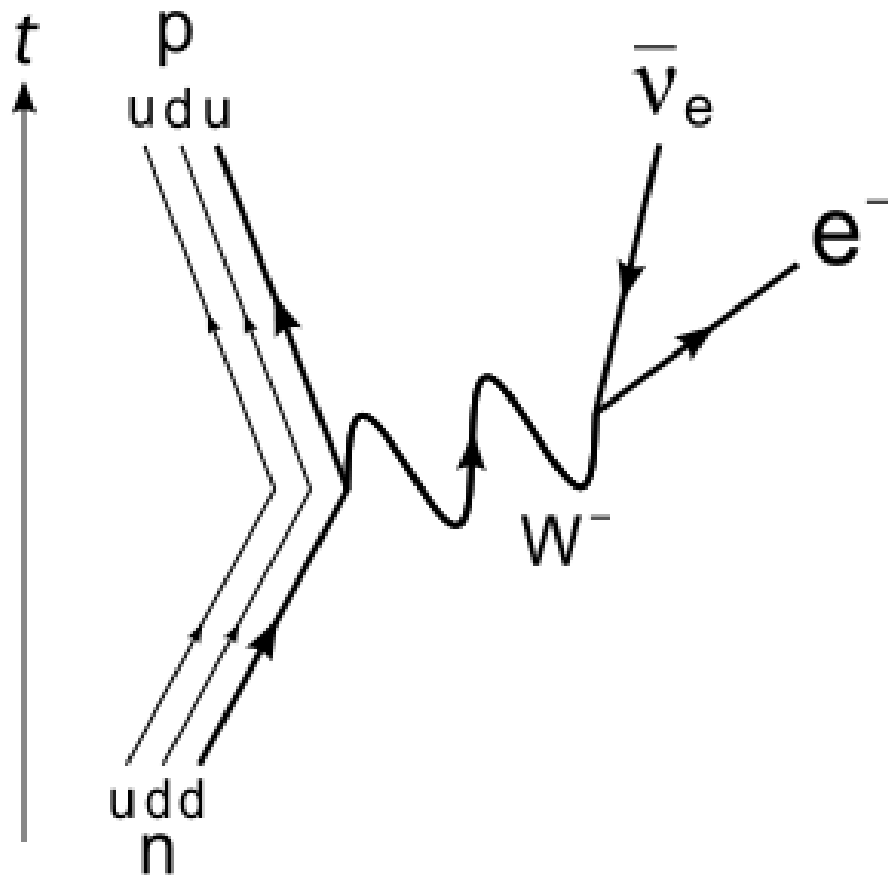
THE STANDARD MODEL

	Fermions			Bosons	
Quarks	u up	c charm	t top	γ photon	Force carriers
	d down	s strange	b bottom	Z Z boson	
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
	e electron	μ muon	τ tau	g gluon	
				H Higgs boson*	

*Yet to be confirmed

Source: AAAS

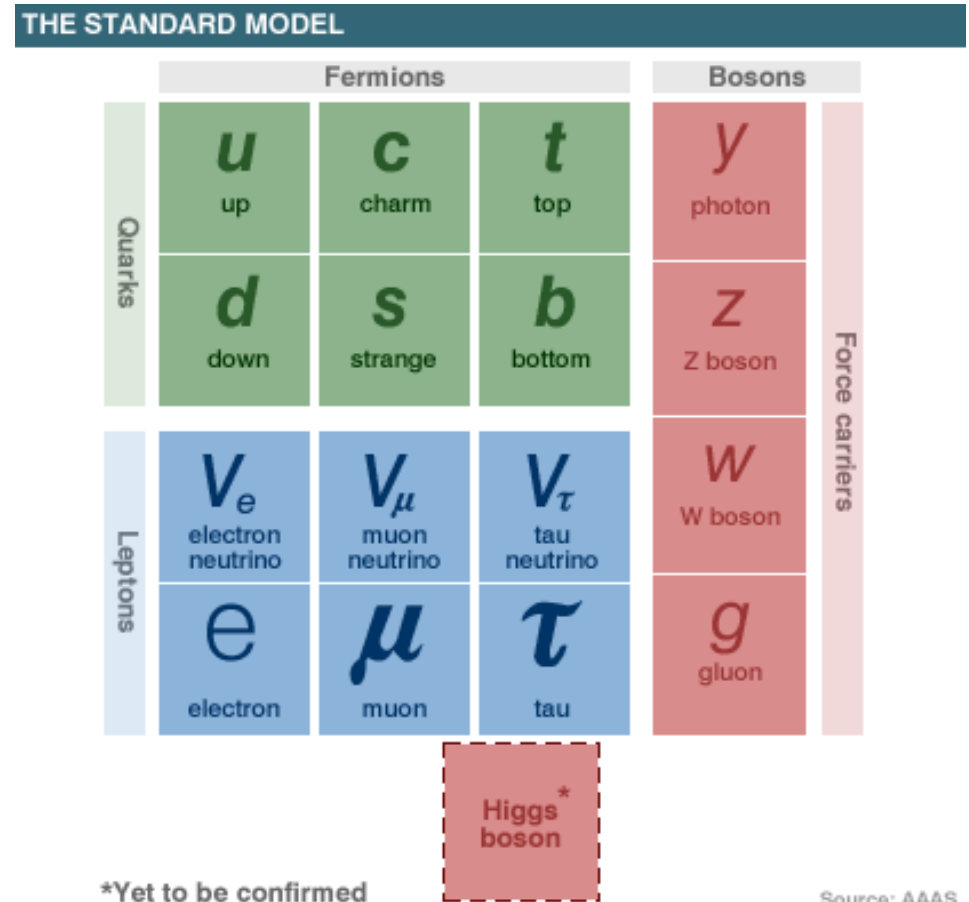
- Bosoner:
- Foton: Elektromagnetisk vekselvirkning (binder elektroner til kjernen)
- Gluon: Sterk vekselvirkning (binder sammen kvarker og kjernepartikler)
- W/Z: Svak vekselvirkning

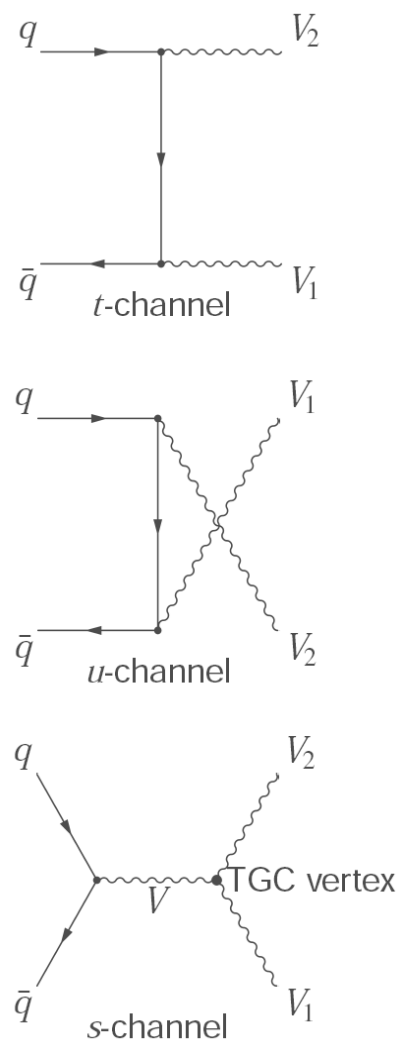


Eksempel på svak vekselvirkning

- Bosoner:
- Foton: Elektromagnetisk vekselvirkning (binder elektroner til kjernen)
- Gluon: Sterk vekselvirkning (binder sammen kvarker og kjernepartikler)
- W/Z: Svak vekselvirkning

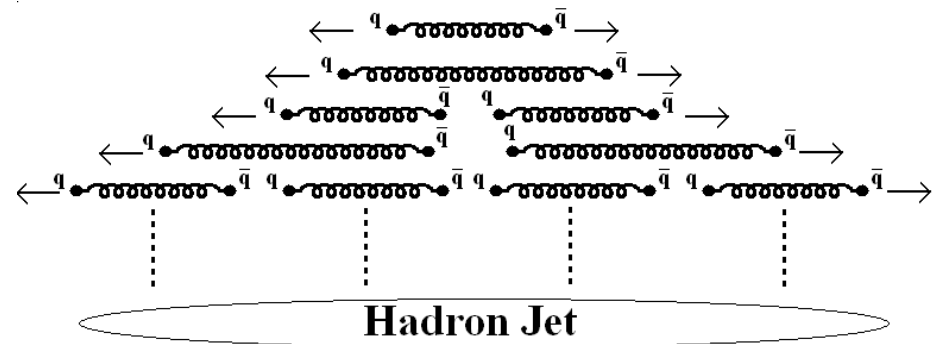
- Higgs: Mekanisme som gir partikler masse. Hittil uoppdaget
- Til sammen er dette alle partiklene i standardmodellen
- Dagens standardmodell forklarer ikke mørk materie og gravitasjon



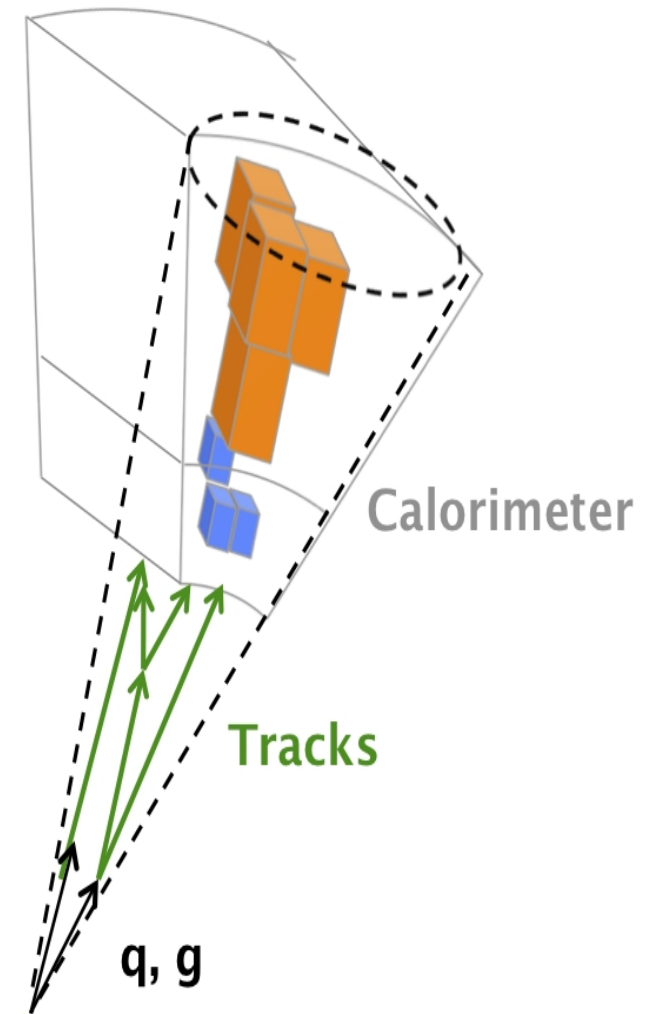


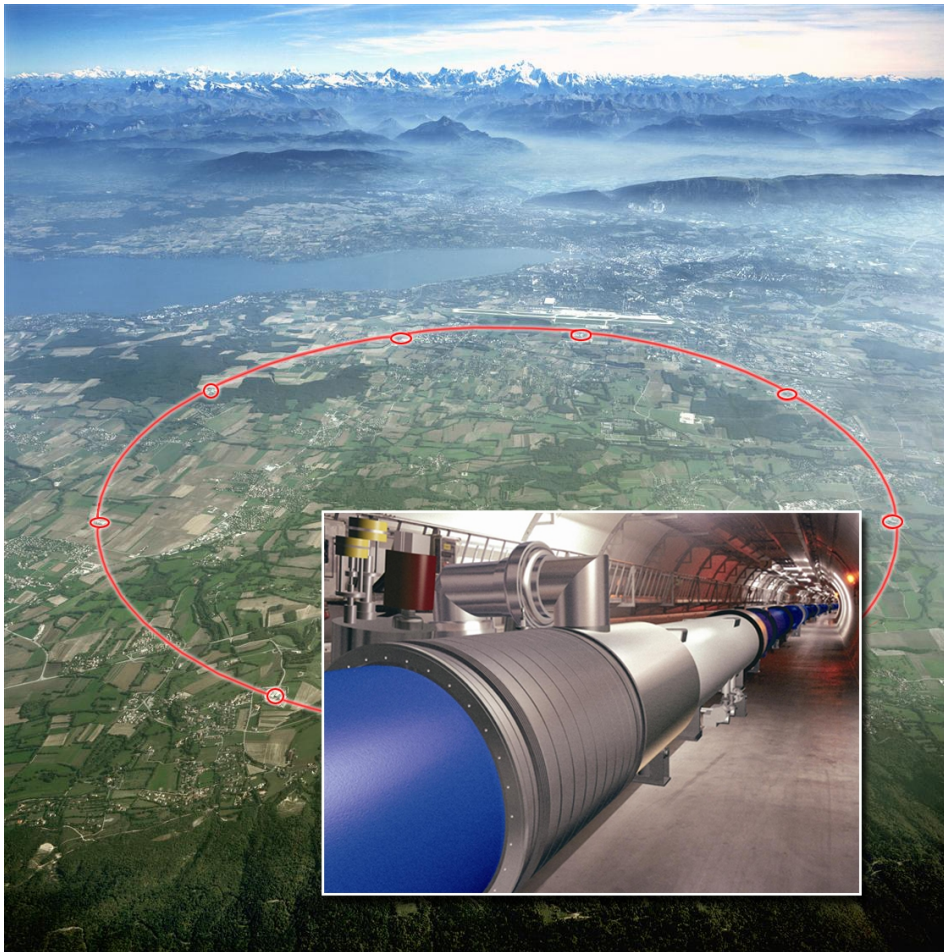
- Vekselvirkninger kan danne nye partikler.
- Partikler kan henfalle til andre partikler
- Partikler fra kollisjoner kan detekteres av en omkringliggende detektor. Vil bli forklart senere i presentasjonen

- Ved dannelse av en kvark-antikvarkpar:
- Energetisk mer fordelaktig å danne nytt kvark-antikvark-par fremfor å skille en kvark og en anti-kvark eller gluoner.
- Utsendelse av kvarker eller gluoner medfører dannelse av en jet (hadronisering).

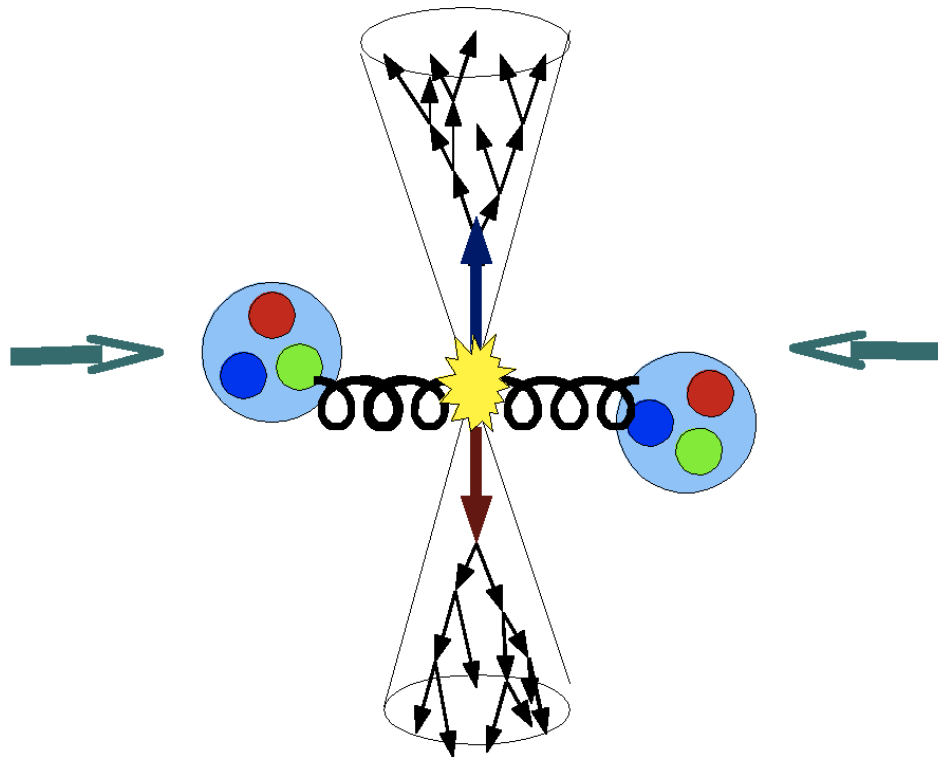


- Jet'ene sett på i oppgaven er grovt sett definert ut ifra å danne en kjegle rundt energetiske partikler. Alle partikler inne i kjeglen er en del av jet'en
- Hvis en hendelse domineres av to energetiske jet'er kalles hendelsen en dijet-hendelse
- Jet'ene antas da å ha like stor transvers energi som følge av bevaring av transvers momentum
- QCD dijetevents er de vanligste hendelsene i høyenergikollisjoner

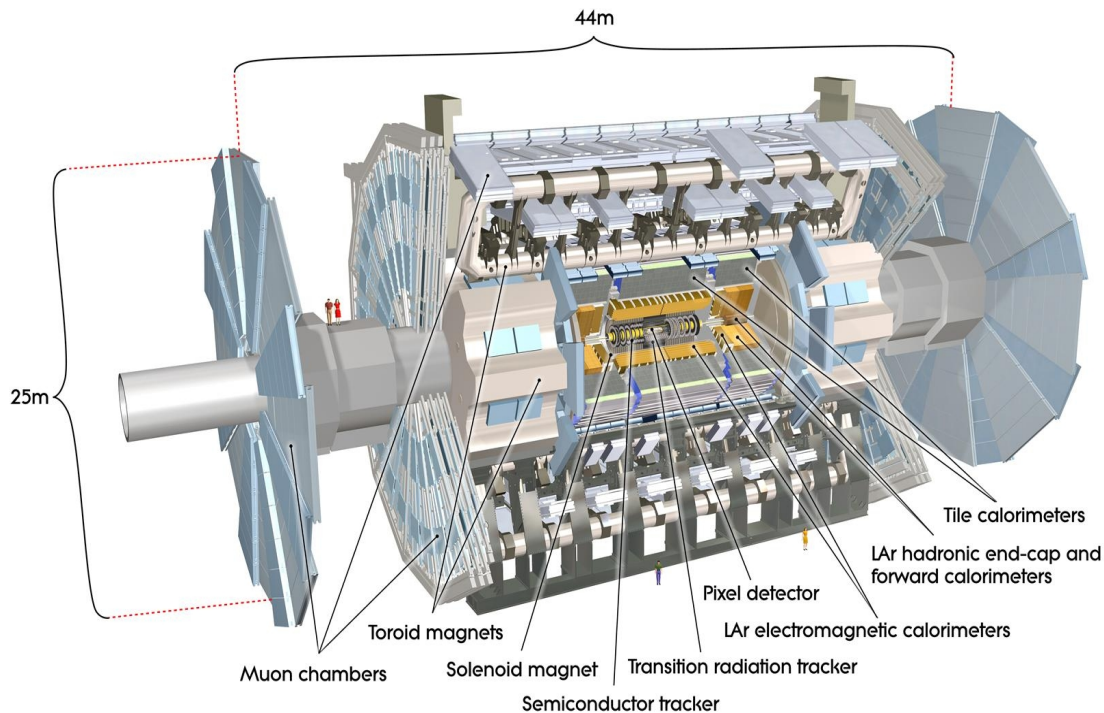




- LHC (Large Hadron Collider) ved CERN Primærmålet er å finne Higgs og fysikk utover standardmodellen
- LHC ligger ved grensen mellom Sveits og Frankrike
- Norge er en av mange medlemsland i CERN
- ATLAS, CMS, LHCb, ALICE
- I dette arbeidet har vi brukt ATLAS detektoren

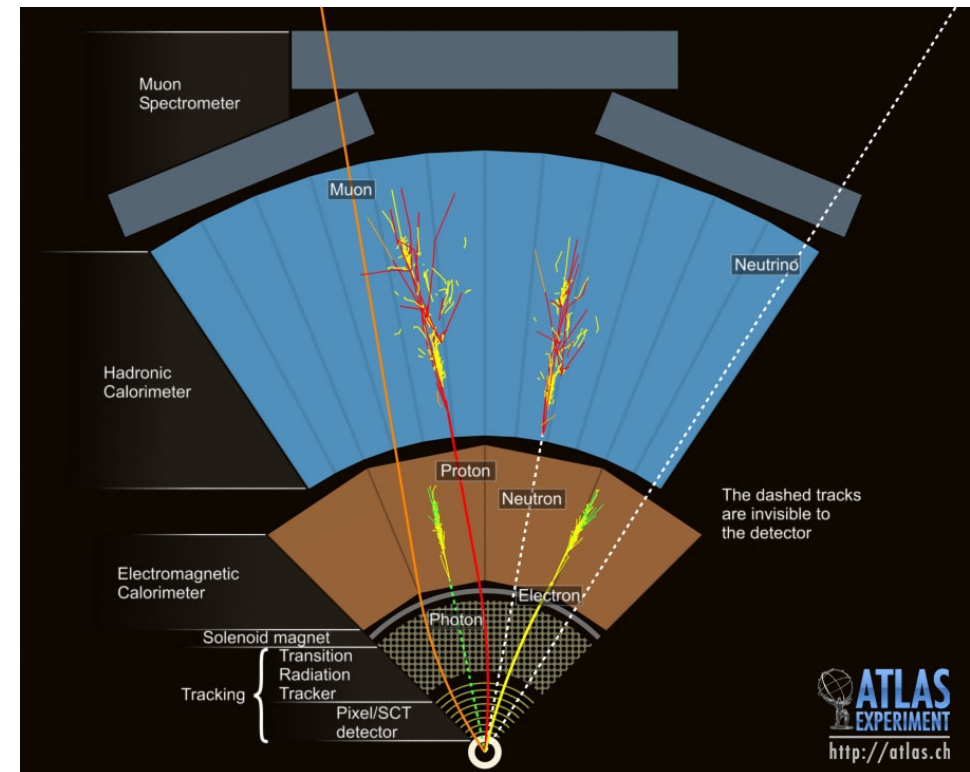


- LHC er designet for å kollidere protoner med en energi i massesenteret på energi på 14 TeV. (7 GeV / proton)
- Starter ved lavere energier i 2010 med massesenterenergi på 10 TeV
- Ved så høye energier er det gluoner og kvarker som vekselvirker, ikke protonene som helhet.

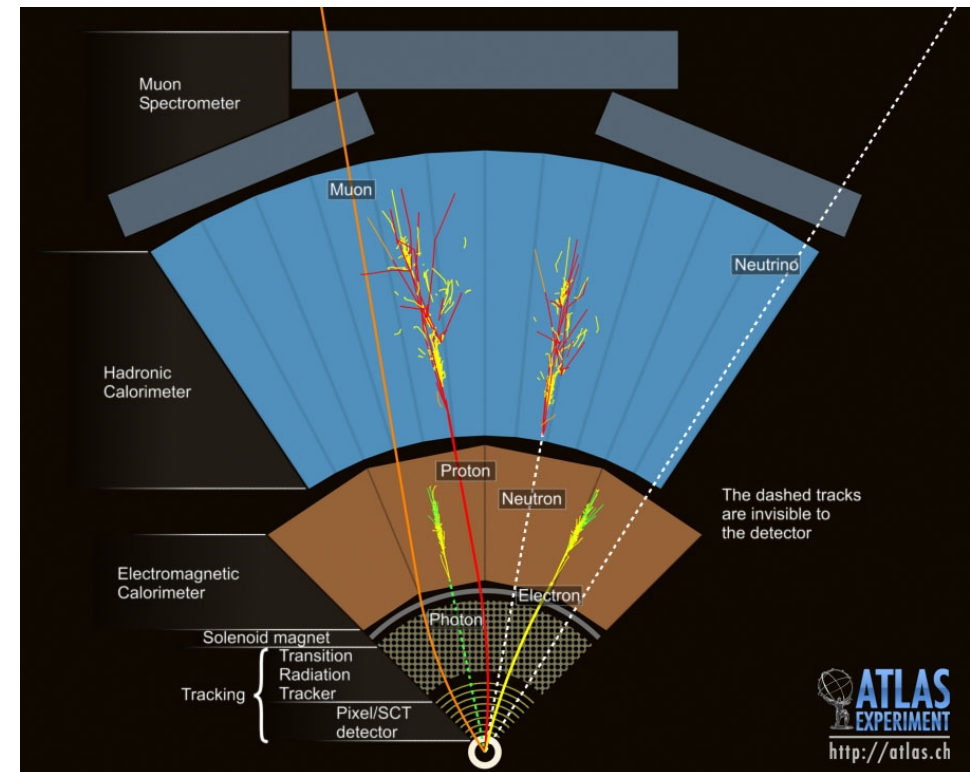


- A Toroidal LHC ApparatuS
- En av detektorene ved LHC.
- Består av sporingsdetektorer, kalorimetre, myonspektrometer og magnetsystem.
- 44 m lang og 25 m i diameter, 100 m under bakken

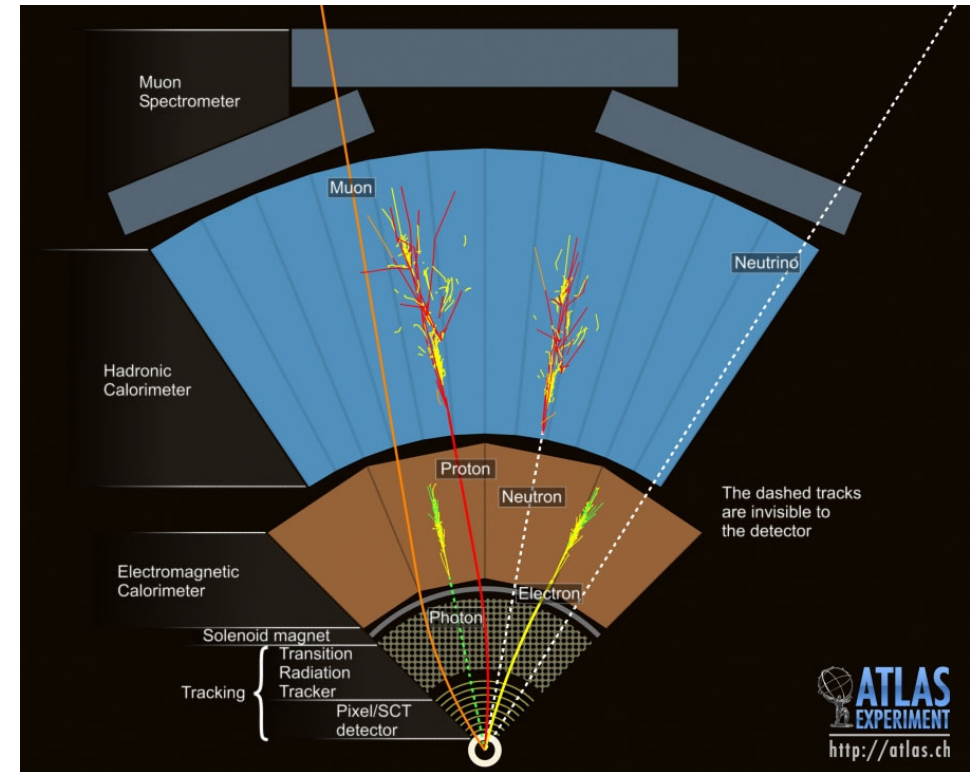
- Magnetsystemet: Bøyer sporet til elektrisk ladde partikler for å måle bevegelsesmengden
- Sporningsdetektorer (de tre detektorene nærmest strålerøret (beampipe)): Måler partikkelspor til elektrisk ladde partikler

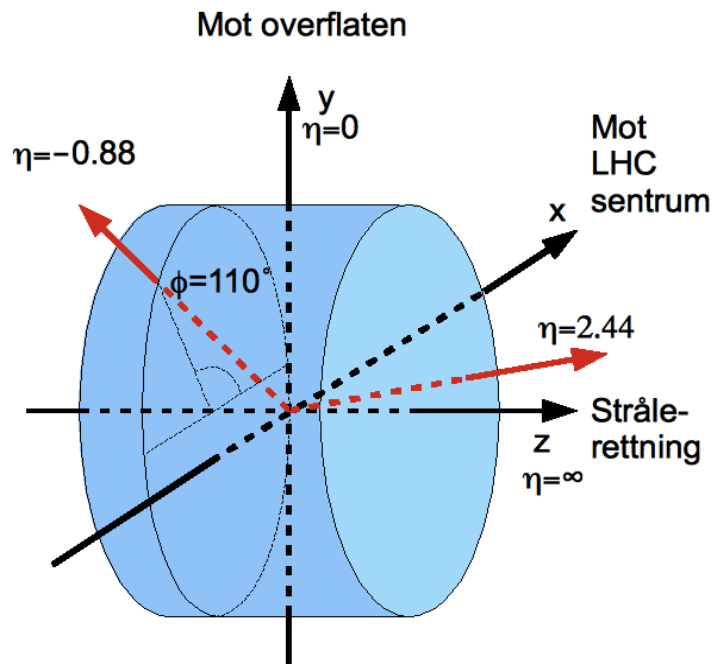


- Elektromagnetisk kalorimeter: Måler energien til elektroner og fotoner ved full absorpsjon av all energien.
- Hadronisk kalorimeter: Måler energien til partikler satt sammen av kvarker.

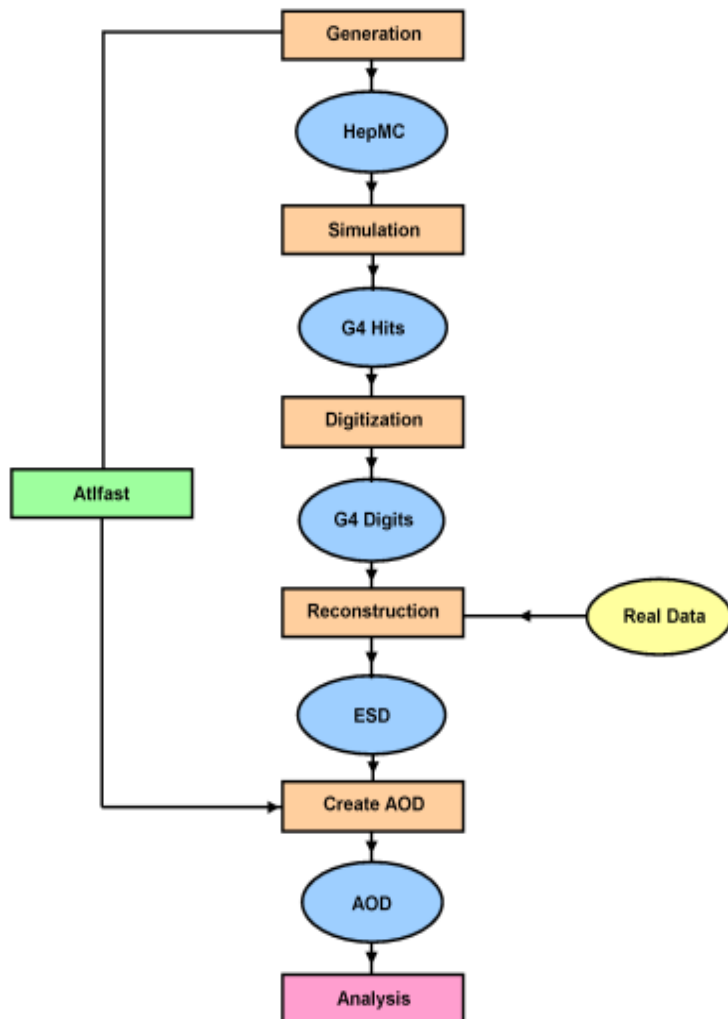


- Myonspektrometer: Påviser tilstedeværelsen av myon i hendelsen og måler bevegelsesmengden (myoner stanses normalt ikke av detektoren).
- Nøytrinoer oppdages ikke direkte i ATLAS.
- Jet'er kan sees i alle detektorer. Vår analyse bygger på informasjon fra kalorimetrene





- x-aksen peker fra kollisjonspunktet mot sentrum av LHC
- y-aksen peker vertikalt opp fra kollisjonspunktet
- z-aksen peker i stråleretningen slik at x, y og z utgjør et høyrehåndssystem.
- η er relatert til vinkelen θ fra z-aksen ved
$$\eta = -\ln\left(\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)$$
- ϕ er vinkelen i (x,y)-planet og definert ved
$$\phi = \arctan\left(\frac{p_y}{p_x}\right)$$
- Ser på variablene i det transverse (x,y)-planet, siden kollisjonene mellom kvarkene og gluonene ikke skjer i massesentersystemet i z-retning



- For å forstå hendelser i ATLAS må alt fra generering av fysikkhendelse, propagering av partikler og detektorrespons simuleres
- Simuleringen bruker tilfeldige tall fra teoretiske fordelinger (Monte Carlo-simulering)
- Simulerte data kan så rekonstrueres på samme måte som virkelig data
- Simulering og rekonstruksjon gjøres i ATLAS rammeverk ATHENA som fremdeles er under intensiv utvikling
- Rekonstruerte data kan så analyseres i ATHENA eller ROOT

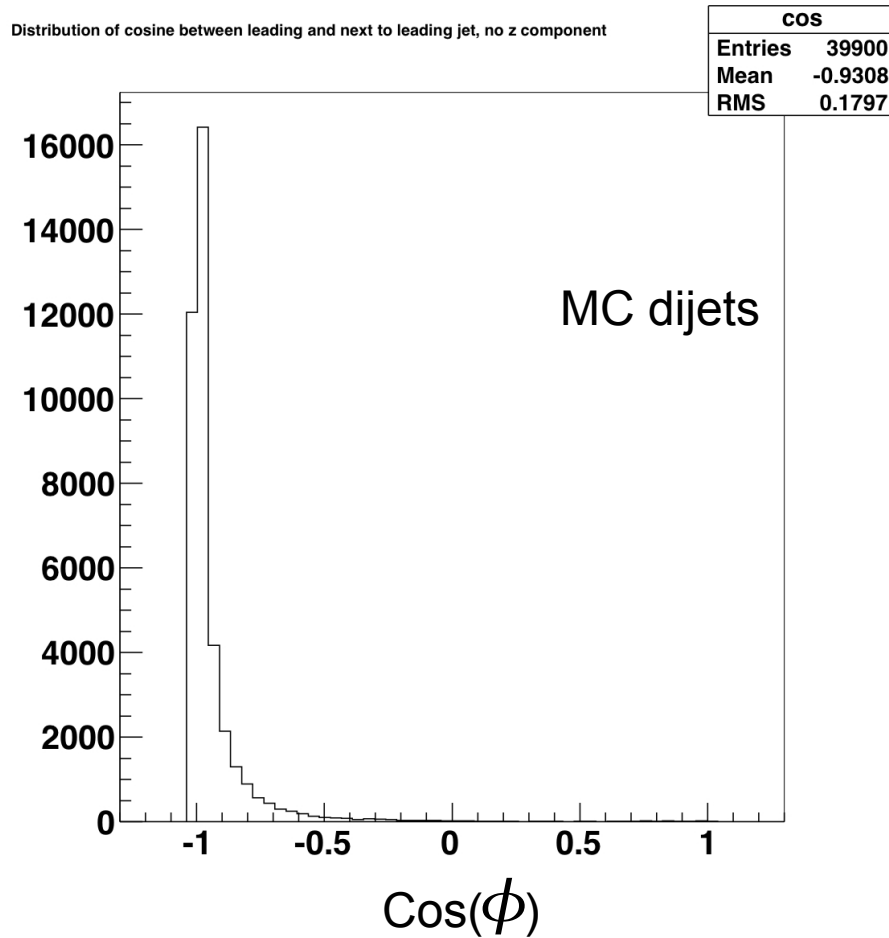
DiJet (ATHENA-algoritme for dijetanalyse)



- Verktøy som kan brukes både i ATHENA og i ROOT med ATHENA ROOT Access (ARA)
- Ved å kjøre programmet i ATHENA kan koden brukes i ATLAS-overvåkingssystemet
- Koden er skrevet i C++ over 2200 rekker med kode som er selvdokumentert med doxygen
- Algoritmen finner dijet-hendelser og lagrer statistikk for disse
- Lager ulike histogram for variabler for jet-energioppløsning og deres avhengighet av η og ϕ
- Dessuten finner algoritmen passende top-hendelser til å rekonstruere W-massen
- Vi brukte ATHENA 14.5.2 til å utvikle DiJet, men koden er testet med og virker i ATHENA 15.x
- Koden er tilgjengelig i ATLAS Bergens CERN SVN arkiv

- 39900 Monte Carlo dijet-hendelser fra 10 TeV kollisjoner (MC08): Ledende jet: 140-280 GeV. Datasettet ble valgt for å gi tilstrekkelig statistikk i et interessant område. Tverrsnitt var $3.08 \cdot 10^5$ pb og ekvivalent luminositet var 0.13 pb^{-1}
- 26922 Monte Carlo top-hendelser fra 10 TeV kollisjoner (MC08): Topkvark masse på 172.5 GeV. Tverrsnitt var $1.07 \cdot 401.60$ pb og ekvivalent luminositet var 62.65 pb^{-1}
- 20000 hendelser hentet fra 48471 hendelser fra 14 TeV FDR2-data: Tilsvarende 1 times kjøring med en luminositet på $10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Ekvivalent luminositet i vår analyse var da 0.15 pb^{-1}
- FDR2-data er en miks av ulike simulerte datasett lik det vi venter i virkelig data. Dette brukes i mangel på virkelig data
- Brukte Cone4H1-algoritmen for jet rekonstruksjon, som var standard algoritme i ATLAS da arbeidet utførtes

Kutt for utvalg av dijetthendelser

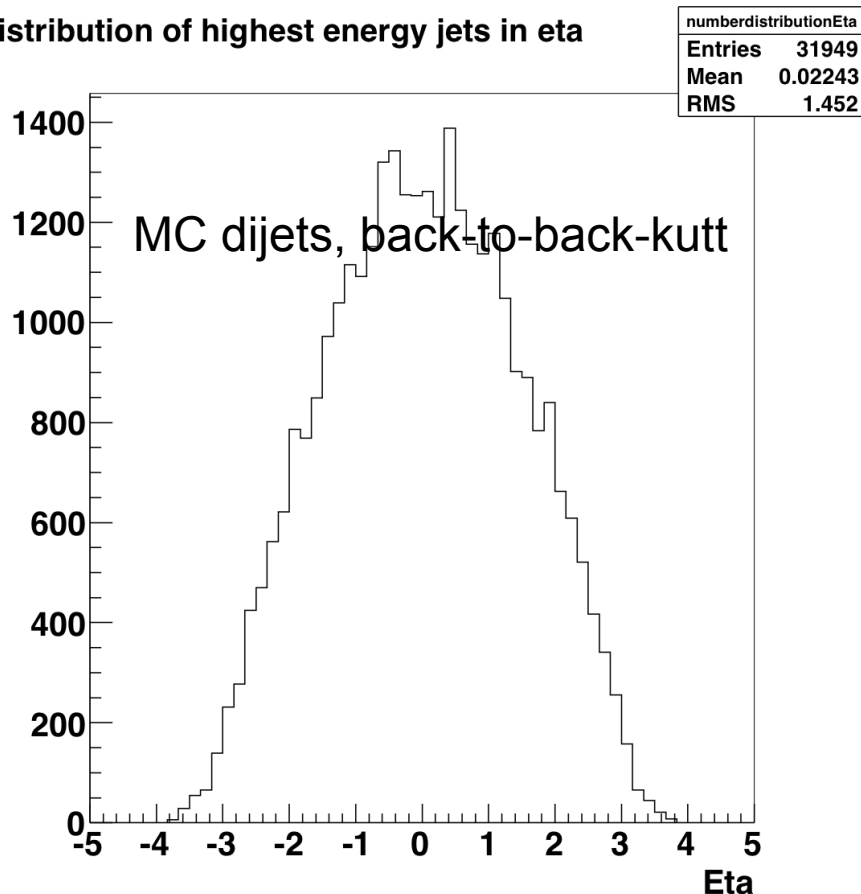


- Minst to jet'er med minst $E_T = 20$ GeV hver
- To mest energetiske jet'er: $\text{jet}_0, \text{jet}_1$
- Back to back kutt: $\text{cos}(\) (\text{jet}_0, \text{jet}_1) < -0.92$ ($> 157^\circ$)
- «Løst» kutt
- Gir tilstrekkelig statistikk
- 20 GeV kutt i ET, back-to-back-kutt
- Jet-rekonstruksjons-algortimene fungerer ikke skikkelig for lavere energier
- Gir bred fordeling

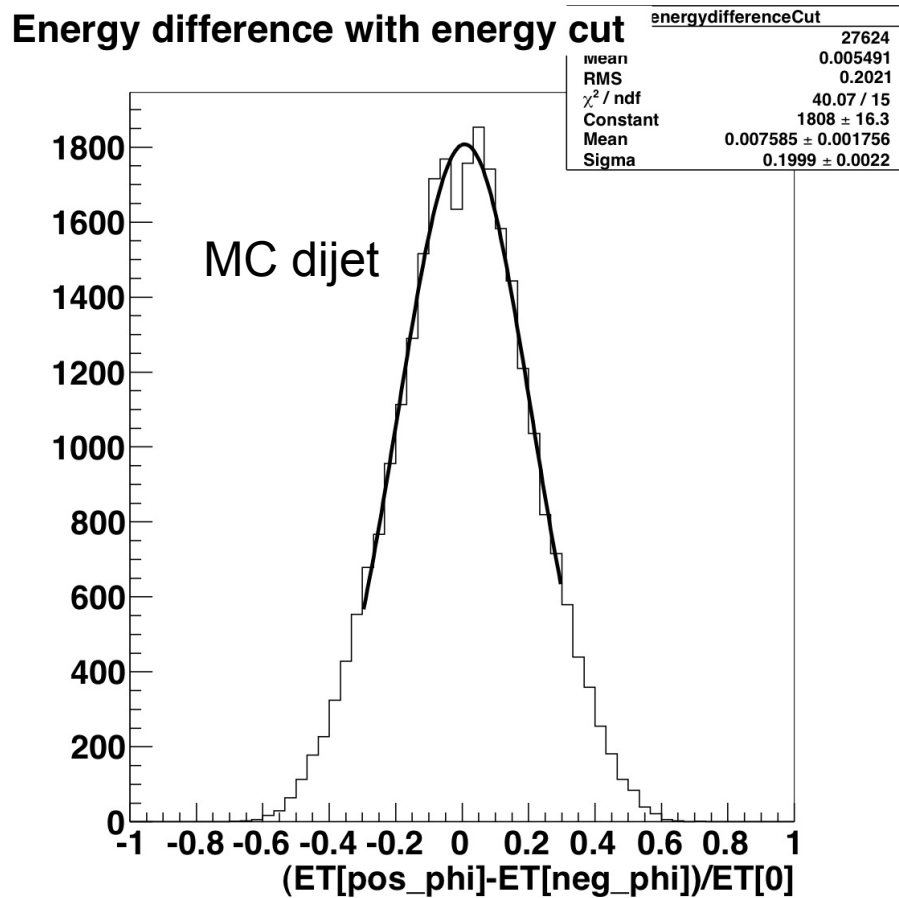
Kutt for utvalg av dijetthendelser



Distribution of highest energy jets in eta



- Antall registrerte hendelser reduseres i endedelene av ATLAS
- Kan vare fra E_T seleksjonen i MC dijets
- η mellom -3 og 3



- Ekstra kutt i ET (for hver av de to ledende jet'ene): >100 GeV
- Er bedre for defenisjonen av dijet-hendelser i regionen E_T 140-260 GeV
- Kuttet som ble brukt i analysen av dijet-hendelser

Liste av variabler

$$\frac{E_T^{reco}}{E_T^{truth}}$$

Rekonstruert transvers energi dividert med truth-verdien

$$(E_T^{\phi^+} - E_T^{\phi^-})$$

Differansen mellom transvers energi i positiv og negativ ϕ for to ledende jet'er dividert med energien til ledende jet

$$\frac{(E_T^{\phi^+} - E_T^{\phi^-})}{(\max(E_T^{\phi^+}, E_T^{\phi^-}))}$$

$$\frac{E_T^0}{E_T^1} \wedge \frac{E_T^1}{E_T^0}$$

Forholdet mellom energien til to ledende jet'er
 E_{T^0} er ledende jet

$$\frac{W_{Masse}^{Rekonstruert}}{W_{Masse}^{Tabell}}$$

Rekonstruert W-masse normert med tabellverdien

$$\frac{E_T^{Manglende}}{E_T^{Synlig}}$$

Manglende transvers energi dividert med synlig transvers energi

$$\frac{\sum P_T^{Jet}}{E_T^{Synlig}}$$

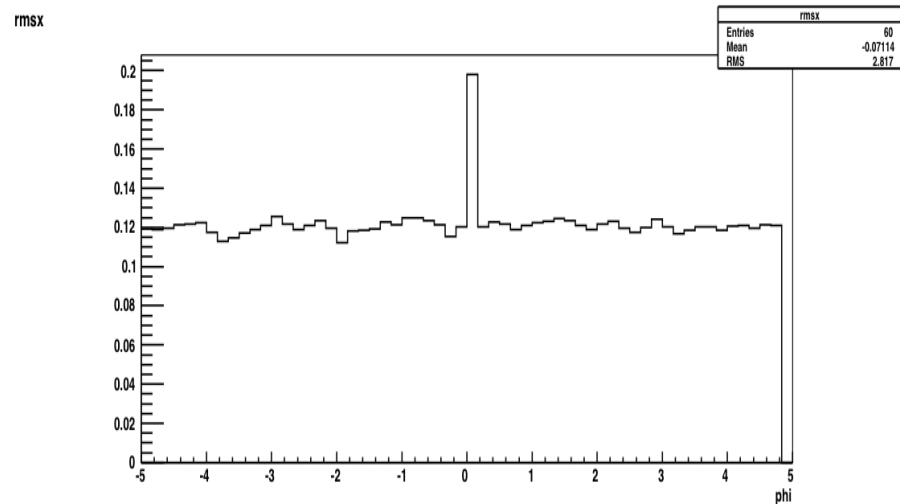
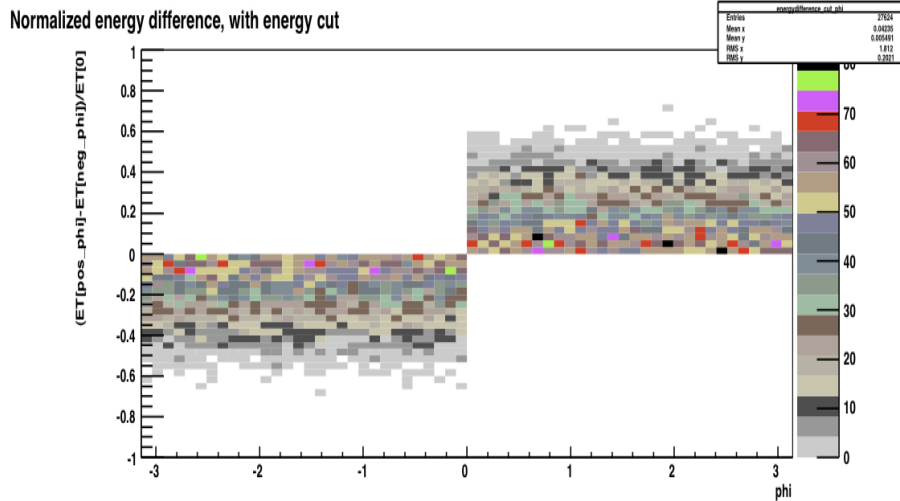
Vektorsummen over jet-momenta
 dividert med synlig transvers energi

- For transvers energi (ET) til ledende jet:

$$\frac{E_T^{reco}}{E_T^{truth}}$$

- Brukt for å optimalisere oppløsningen til jet'er i ATLAS
- Tar ikke hensyn til partikler som forlater jet'en, og er ikke påvirket av gluonstråling
- Oppløsningen til ET til partiklene i jet'en fremfor oppløsningen til ET til hele jet'en

Variablene for dijet-hendelser



- For ET til de to ledende jet'er i en hendelse:

$$\frac{(E_T^{\phi^+} - E_T^{\phi^-})}{(\max(E_T^{\phi^+}, E_T^{\phi^-}))}$$

- Eksplisitt avhengig av ϕ
- Trenger variabel som sammenligner to jet'er. Dette var en mulighet
- Polen i 0 kommer fra binning

- For transverse energi til to ledende jet'er:
- Et histogram med begge variablene

$$\frac{E_T^0}{E_T^1} \wedge \frac{E_T^1}{E_T^0}$$

- Hver jet kommer med 2 ganger i histogrammet
- Er ikke avhengig av ϕ
- Her er det en bias siden fordelingen ikke kan være < 0 . Den er gausisk nær 1

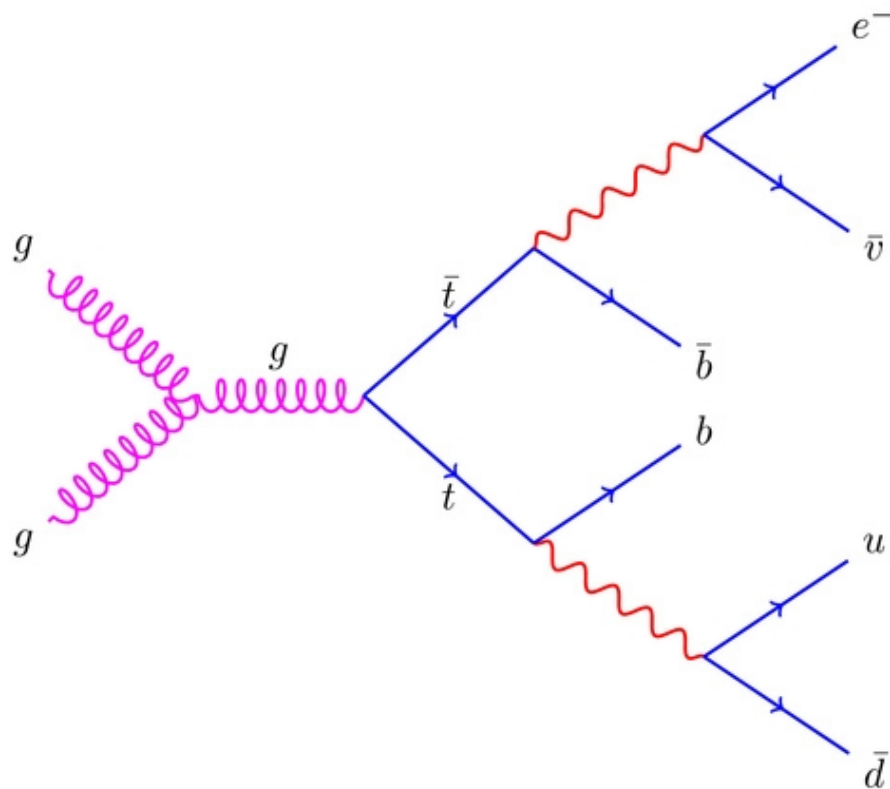
$$\frac{E_T^{Manglende}}{E_T^{Synlig}}$$

- Manglende ET som er brukt er standard MET fra release 14. Basert på energibalansen i hendelsen
- Manglende transvers energi er en svært viktig signatur for ny fysikk, men skal være veldig liten for QCD dijets

$$\frac{\sum p_T^{Jet}}{E_T^{Synlig}}$$

- Sistnevnte tar ikke hensyn til partikler som forlater jetkjeglen og myoner

Variabler: W-massen



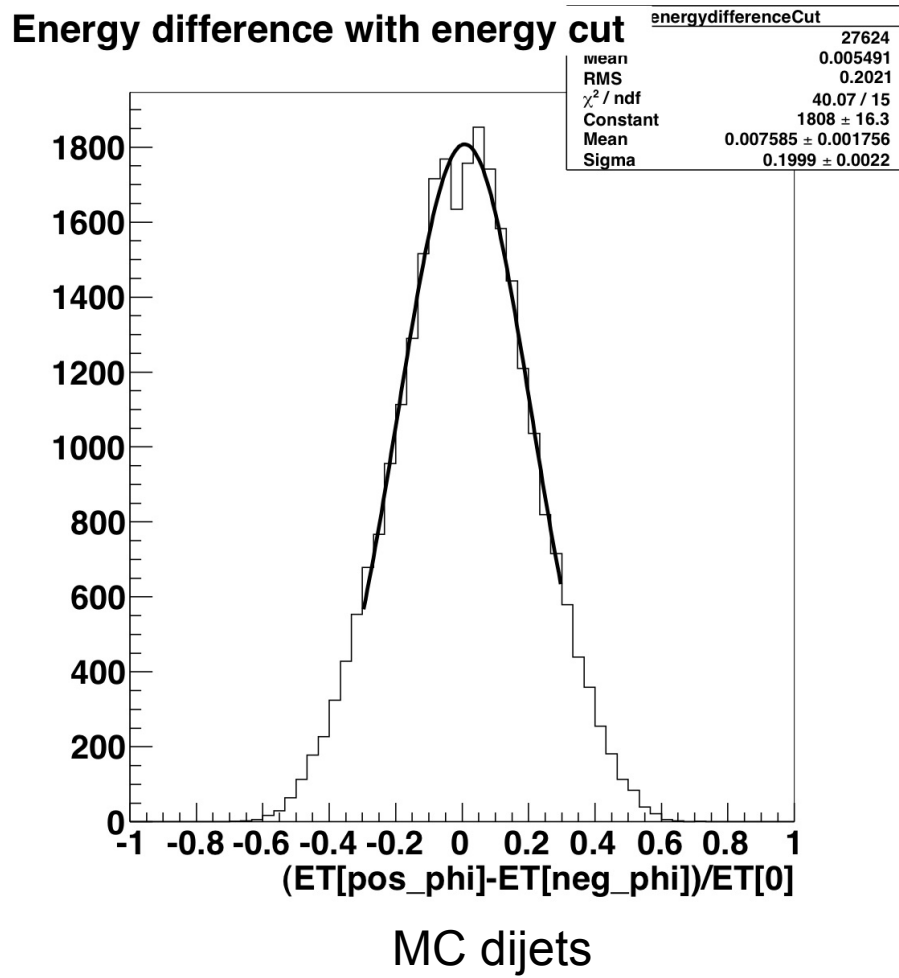
$$\frac{W_{\text{Masse}}^{\text{Rekonstruert}}}{W_{\text{Masse}}^{\text{Tabell}}}$$

- W fra top-antitop som henfaller til minst 1 lepton
- Massen rekonstruert fra jet'er som ikke kommer fra en b

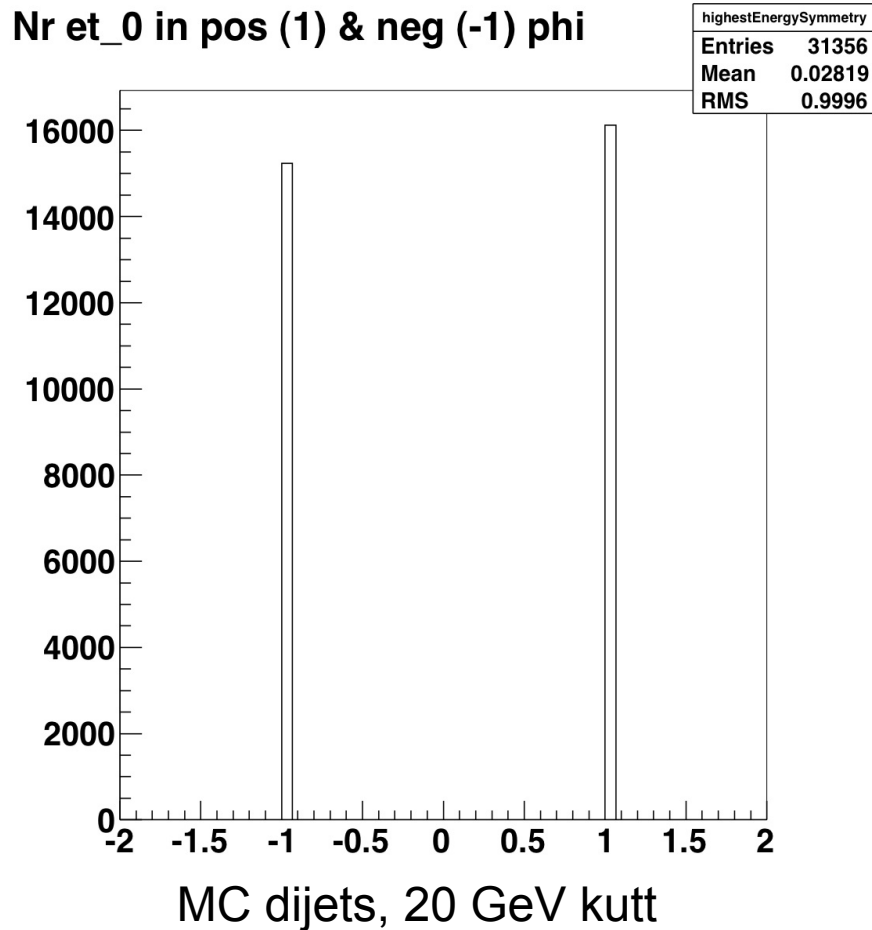
Resultater



Asymmetri i ϕ



- Uventet indikasjon av asymmetry i ϕ , siden forventet gjennomsnitt var 0
- $(0.7 \pm 0.2) \cdot 10^{-2}$ signifikant avvik



MC dijet:

16120 ledende jets i positiv ϕ

15236 ledende jets i negativ ϕ

Relativ forskjell på 0.028 +- 0.006

FDR2 pseudodata:

Relativ forskjell: 0.017+-0.003

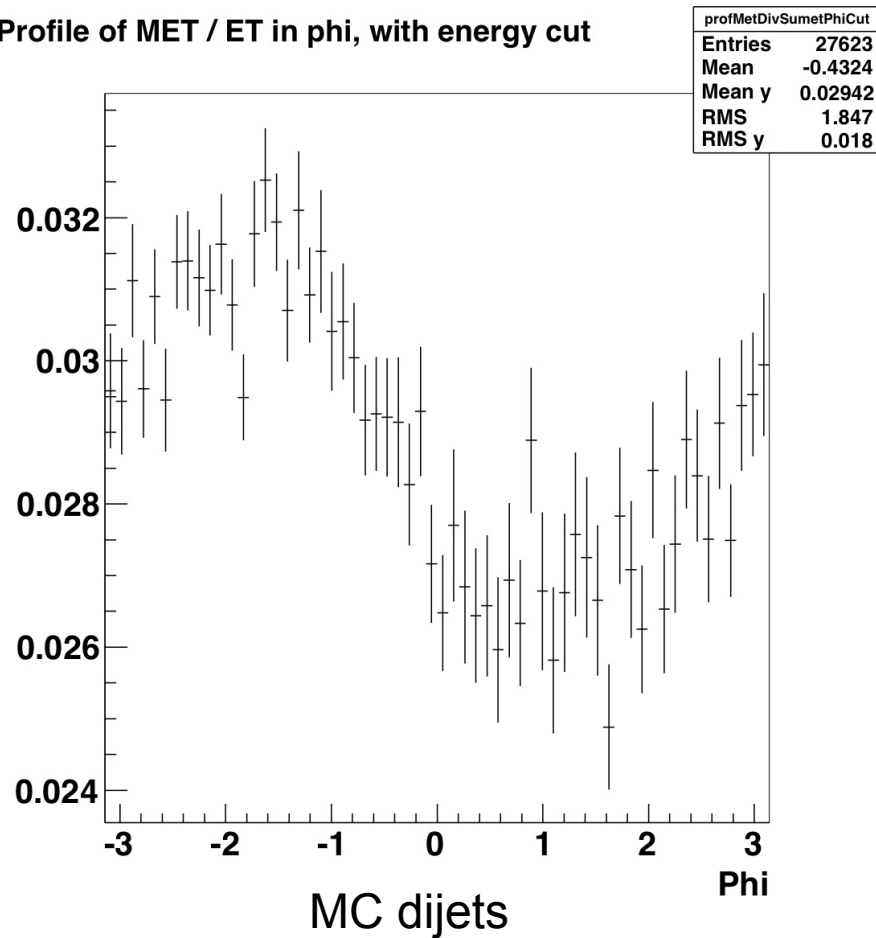
Samme som MC dijets, men litt mindre

MC top:

Relativ forskjell: -0.02+-0.01

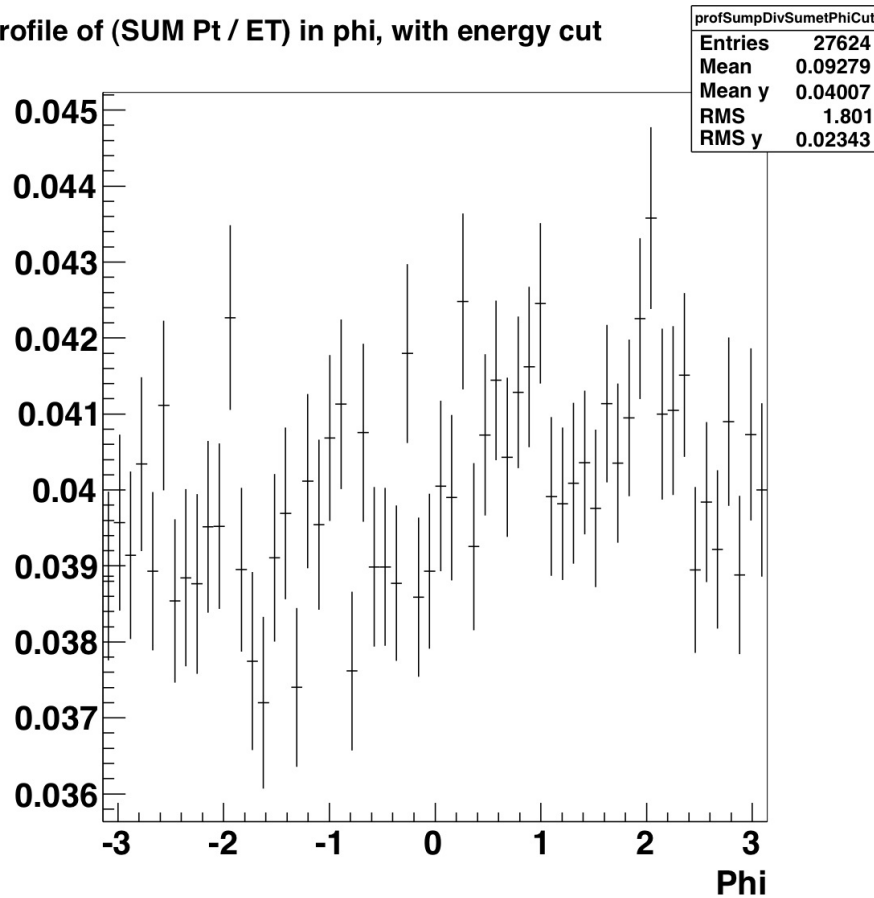
Motsatt resultat av MC dijets, men mye lavere statistisk signifikans

Profile of MET / ET in phi, with energy cut



- Mer manglende ET i negativ ϕ , altså flere ledende jets i positiv ϕ
- Vinkelen ϕ er for ledende jet
- Betydelig effekt. Må undersøkes for MET blir brukt i analyser

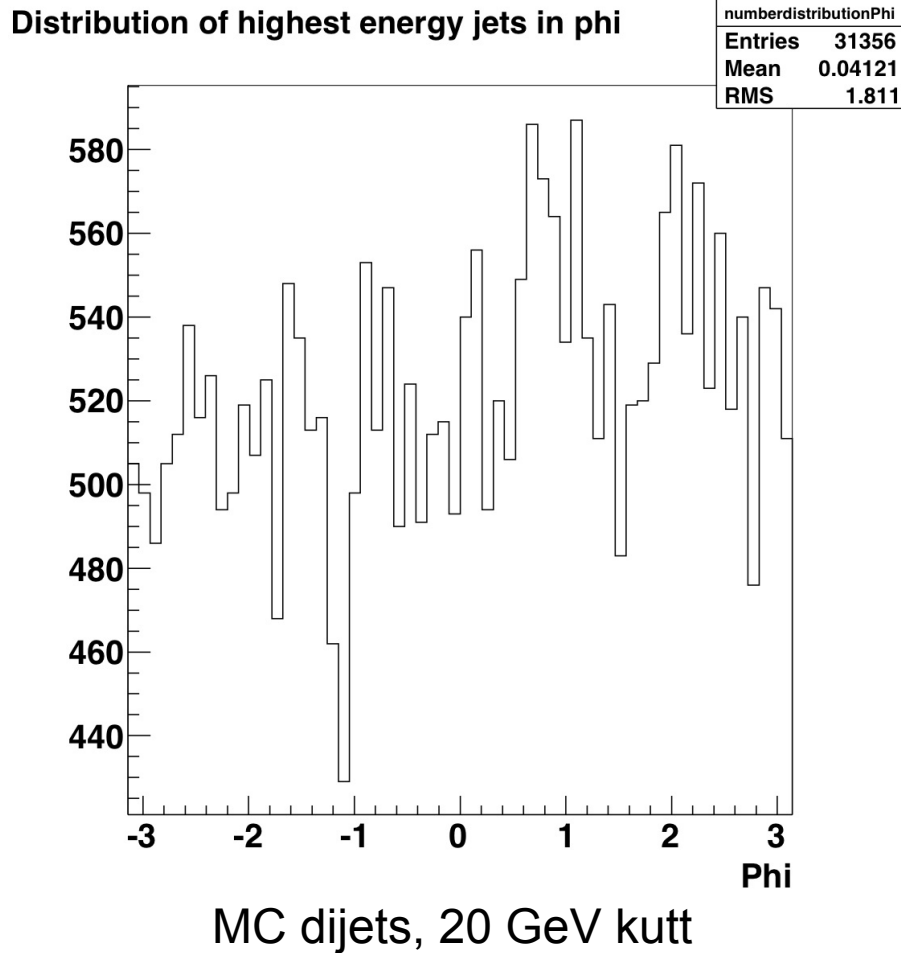
Profile of (SUM Pt / ET) in phi, with energy cut



MC dijets

- Strukturen mindre enn for manglende ET
- Partikler utelatt fra jetdefinisjonen øker asymmetrien i ϕ for ledende jet

Asymmetri i ϕ

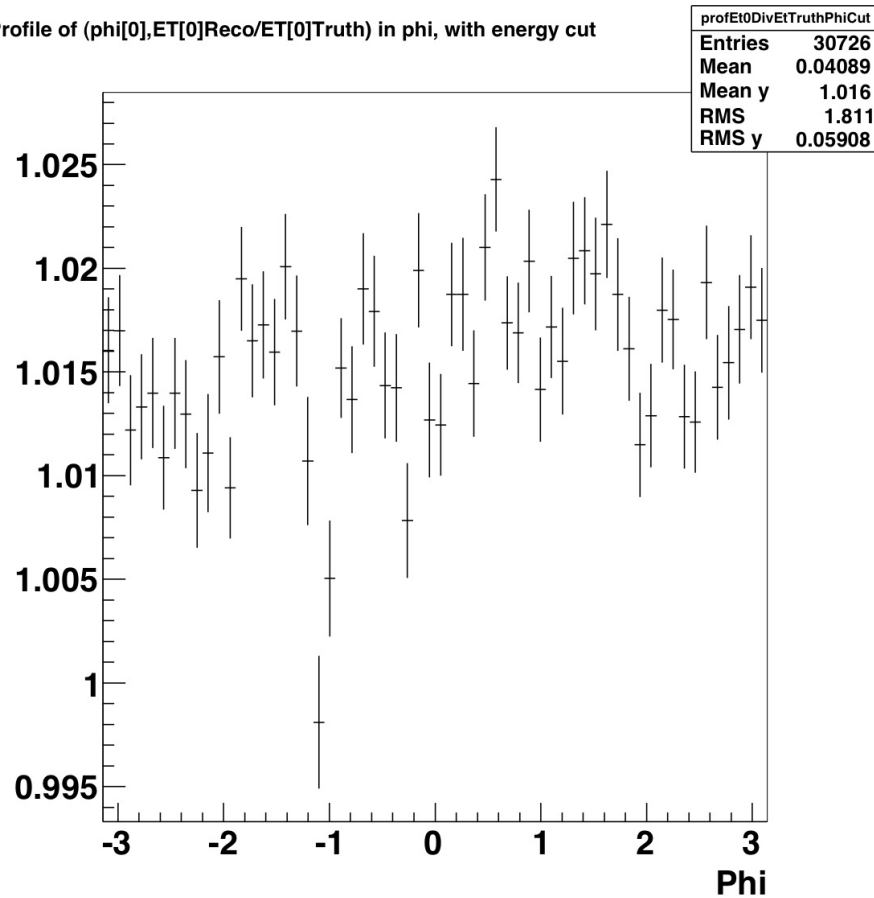


- «Hull» i detektoren?
- Allikevel flere ledende jets i positiv ϕ for ledende jet

Asymmetri i ϕ i MC dijets



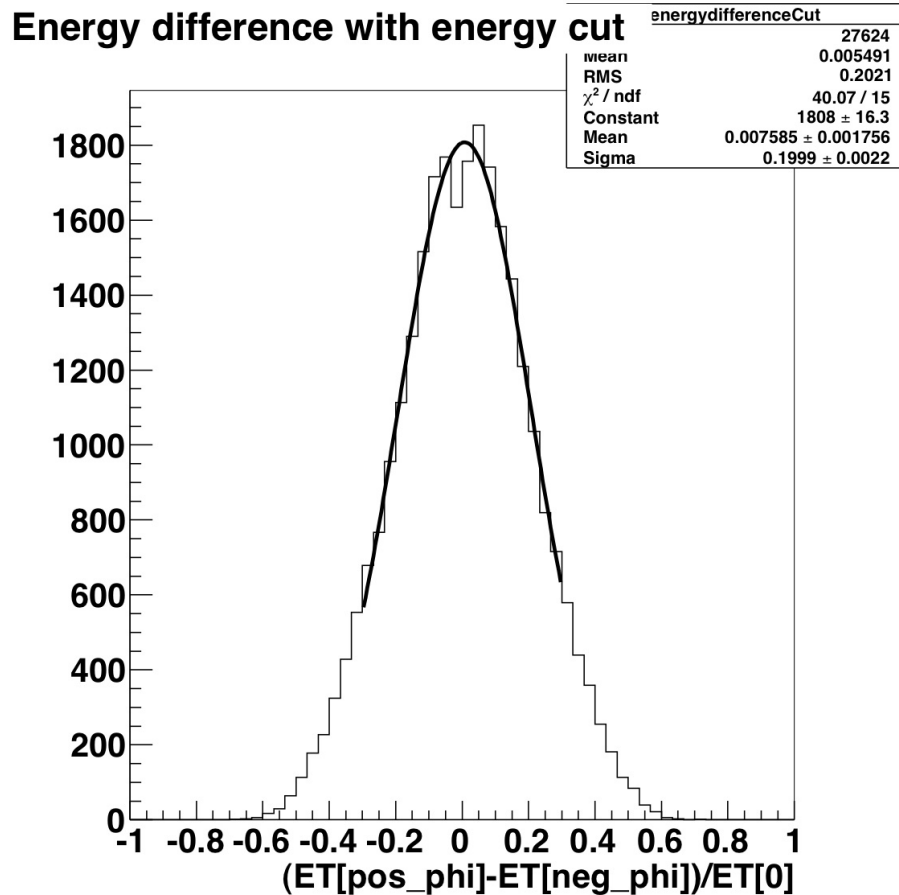
Profile of (phi[0],ET[0]Reco/ET[0]Truth) in phi, with energy cut



MC dijets

- «Hull» i detektoren?
- Allikevel flere ledende jets i positiv ϕ for ledende jet
- Energiskalaen for jet'er for høy i ϕ , og spesielt for positiv ϕ ?

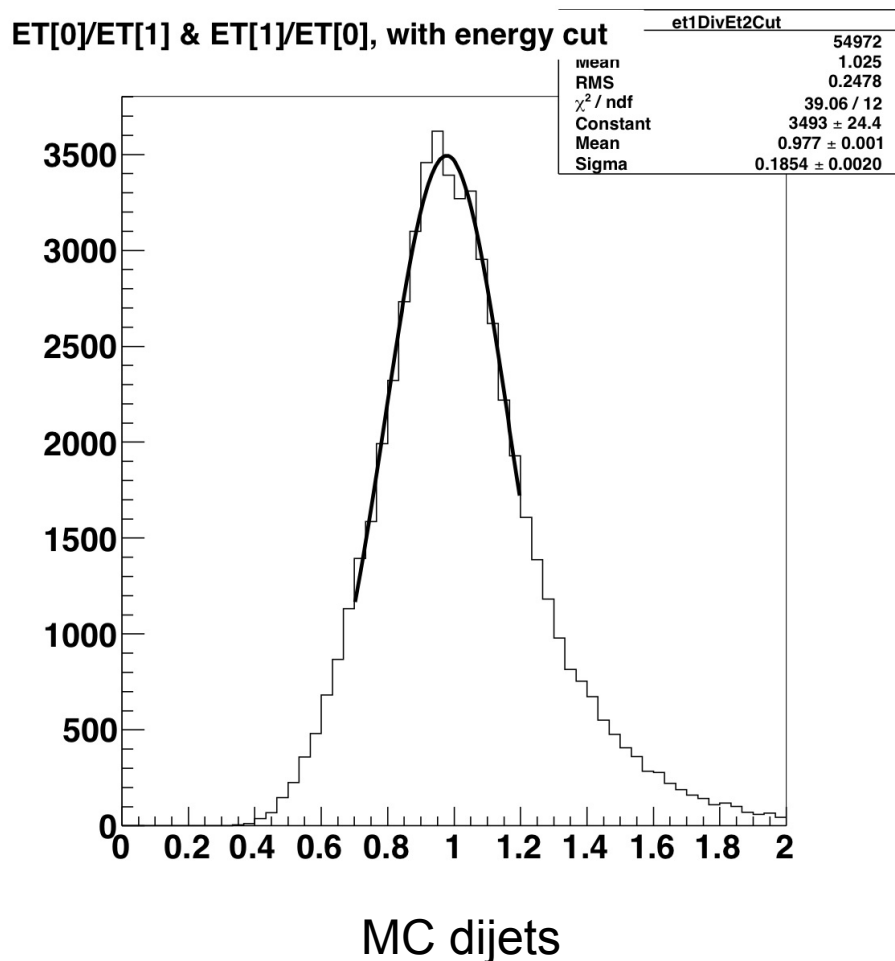
$$\frac{(E_T^{\phi^+} - E_T^{\phi^-})}{(\max(E_T^{\phi^+}, E_T^{\phi^-}))}$$



MC dijets

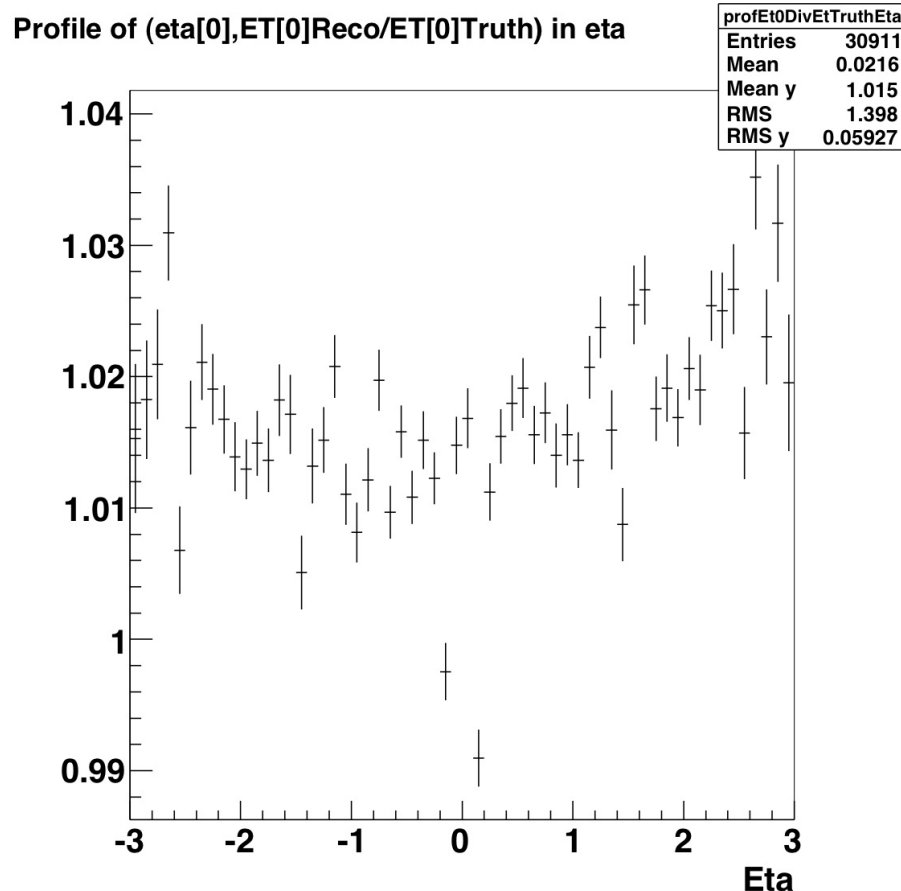
- η -avhengighet kan kanskje forklare avviket fra normalfordeling
- Kanskje også en konsekvens av ϕ -asymmetrien

$$\frac{E_T^0}{E_T^1} \wedge \frac{E_T^1}{E_T^0}$$



- Avvik fra normalfordelingen nær 1 kan være konsekvens av η -avhengighet, ϕ -asymmetri eller gluonstråling som ikke ble fjernet av dijet-kuttet.
- Assymmetri i halen er forventet

ET avhengig av η for $E_T^0/E_T^{0 \text{ truth}}$ i MC dijet



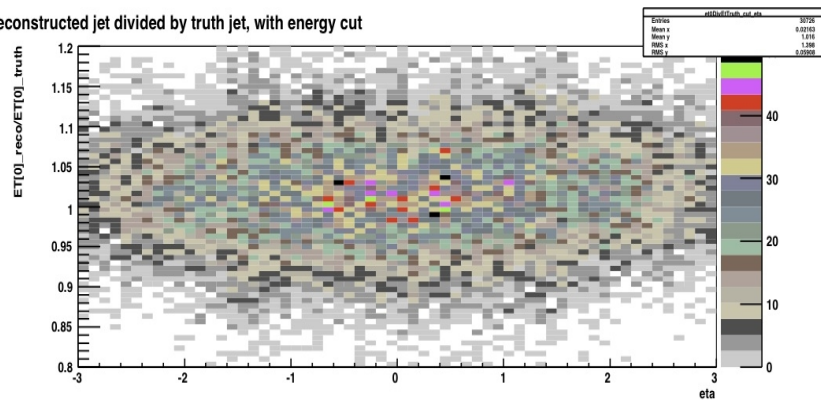
MC dijets

- Energiskala for jet'er avhengig av η til rekonstruert jet
- Ikke hensyn til gluonstråling og partikler som forlater jet'en, noe som kan medføre en sterkere η -avhengighet enn hva vi ser i histogrammene

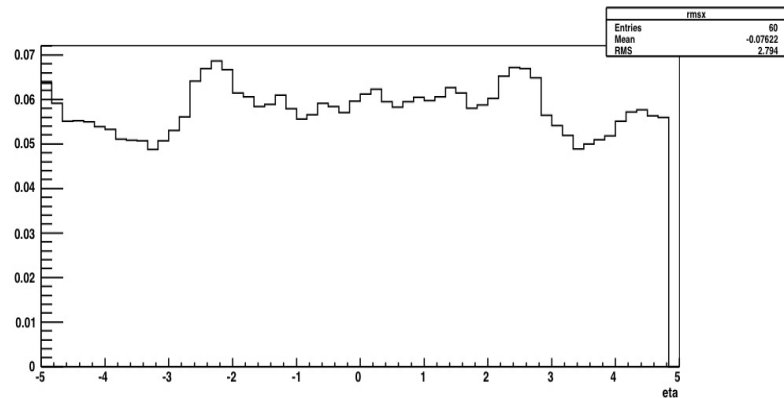
ET avhengig av η for $E_T^0/E_T^{0 \text{ truth}}$ i MC dijet



ET of reconstructed jet divided by truth jet, with energy cut



rmsx



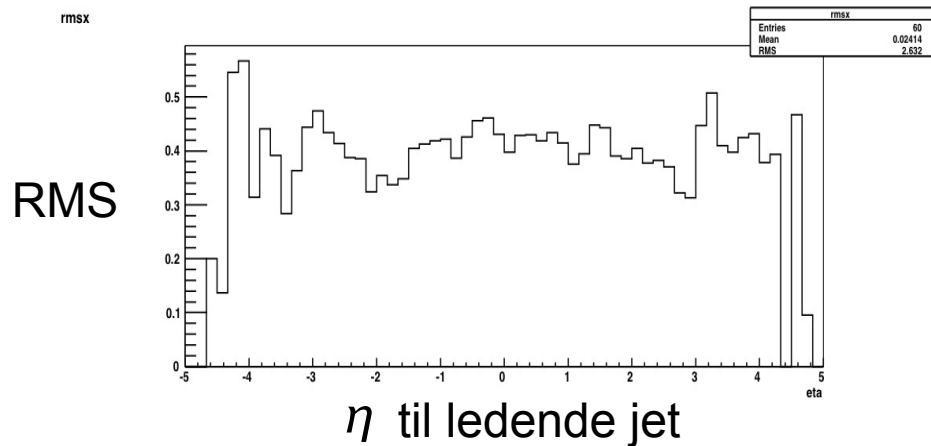
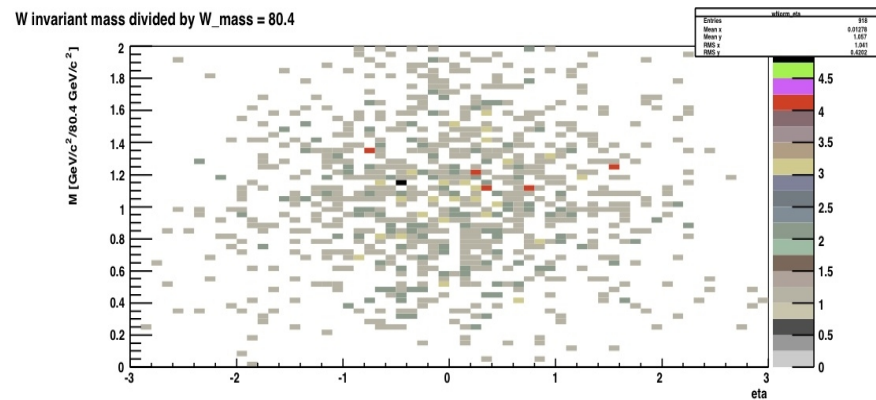
RMS

η til rekonstruert jet

MC dijets

- Oppløsningen blir dårligere der presisjonsmålingene til det elektromagnetiske kalorimeteret blir mindre nøyaktige

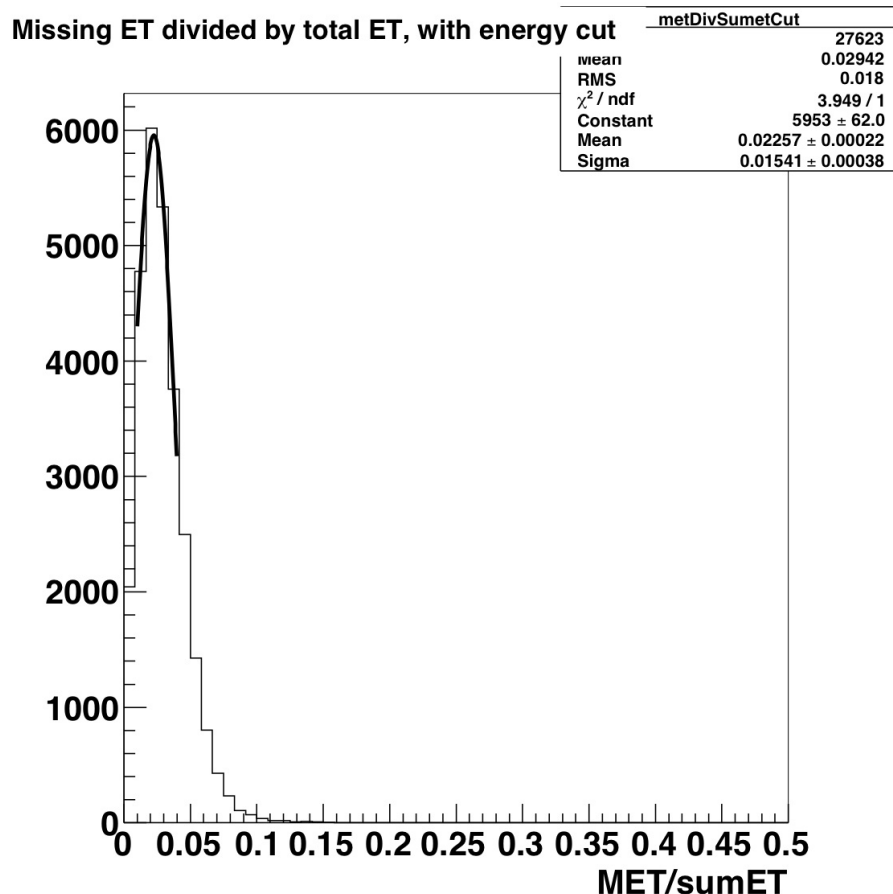
ET avhengig av η for $W_{\text{reco}}/W_{\text{Tabell}}$ i MC top



MC top

- Oppløsningen blir dårligere der presisjonsmålingene til det elektromagnetiske kalorimeteret blir mindre nøyaktige

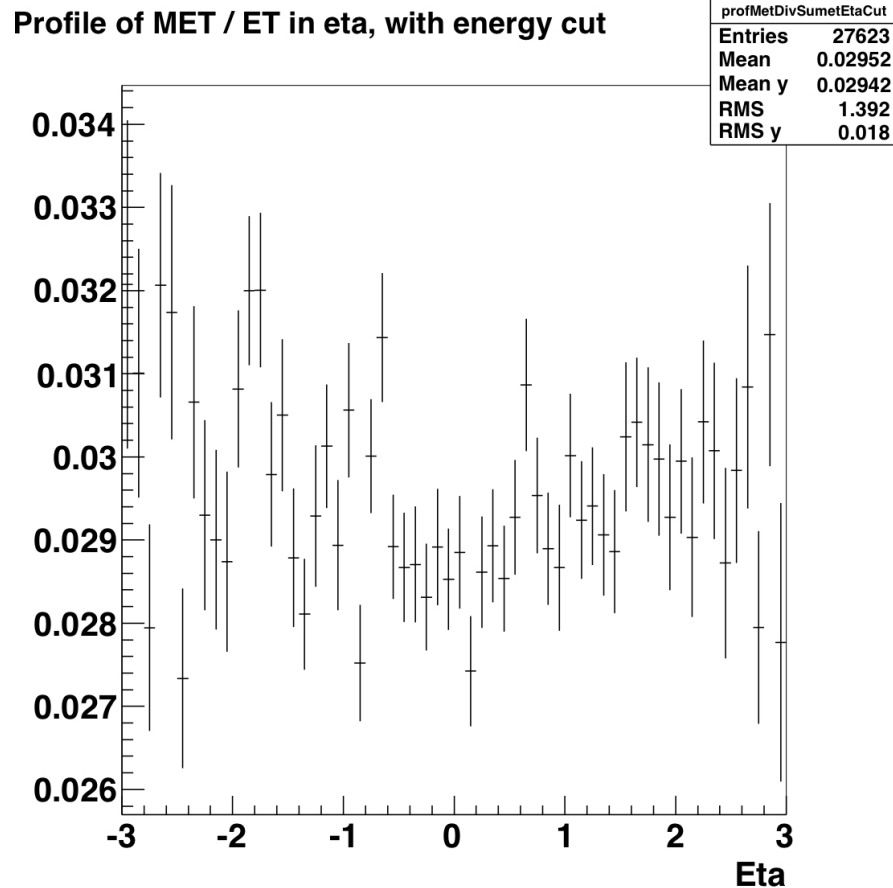
Estimat av ET-oppløsning til jet'er fra dijets ($E_T^{\text{manglende}} / E_T^{\text{synlig}}$ for MC dijets)



MC dijets

- Manglende transvers energi i dijet-hendelser er forbundet med nøytrinoer fra b- og c-jet'er. Ikke tilstede i dette datasettet.
- Mister 0.02 synlig transvers energi, sannsynligvis pga. rekonstruksjonen

Estimat av ET-oppløsning til jet'er fra dijets ($E_T^{\text{manglende}}/E_T^{\text{synlig}}$ vs η for MC dijets)

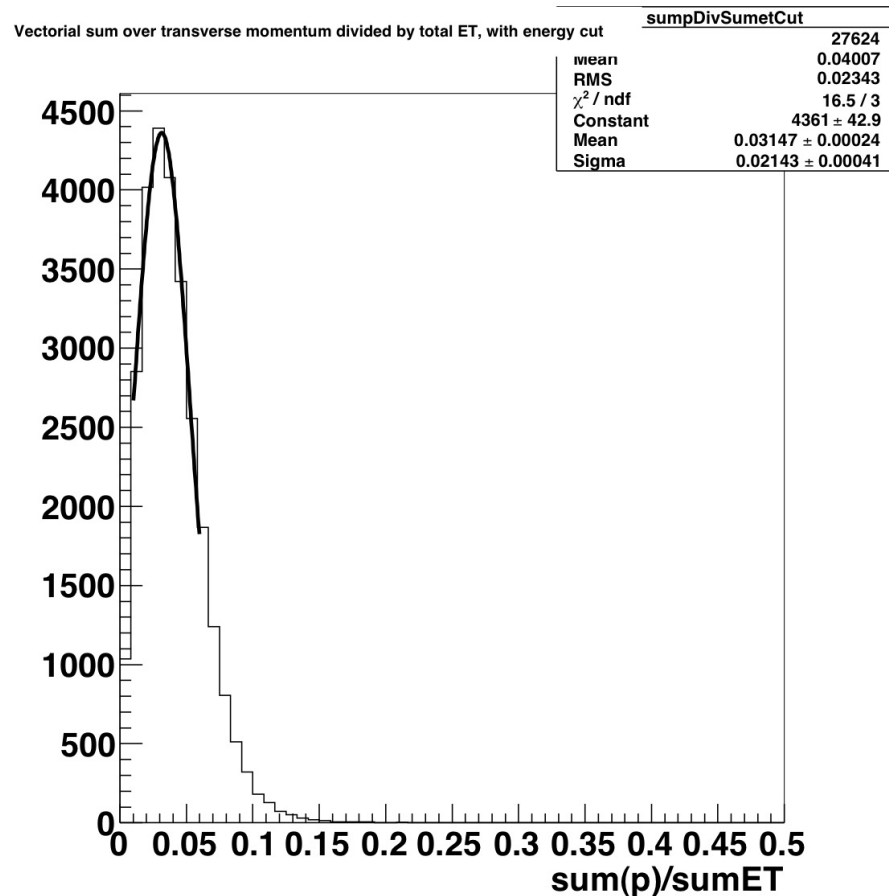


MC dijets

- Mer manglende transvers energi for store η for ledende jet

Estimat av ET-oppløsning til jet'er fra dijets

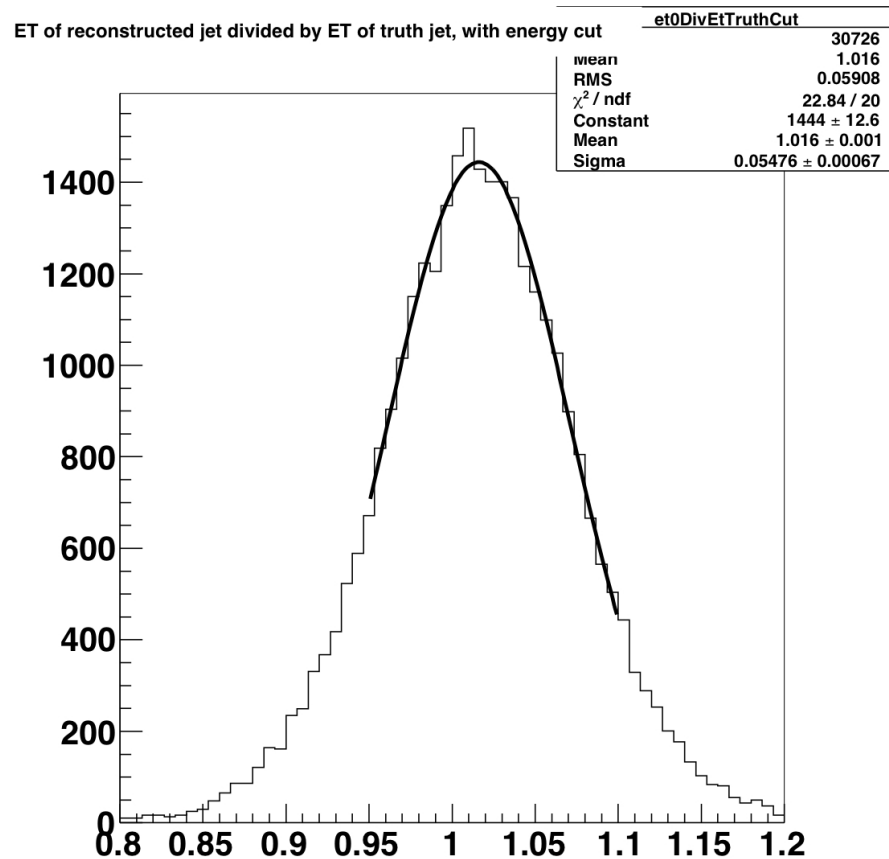
($\pi_T / E_T^{\text{synlig}}$ for MC dijet)



MC dijets

- 0.03 MET
- 0.01 mer manglende transvers energi enn for MET-oppløsningen
- Inkluderer ikke partikler som er utelatt fra jet-definisjonen

Estimat av ET-oppløsning til jet'er fra dijets ($E_T^0 / E_T^{\text{truth}}$ for MC dijets)



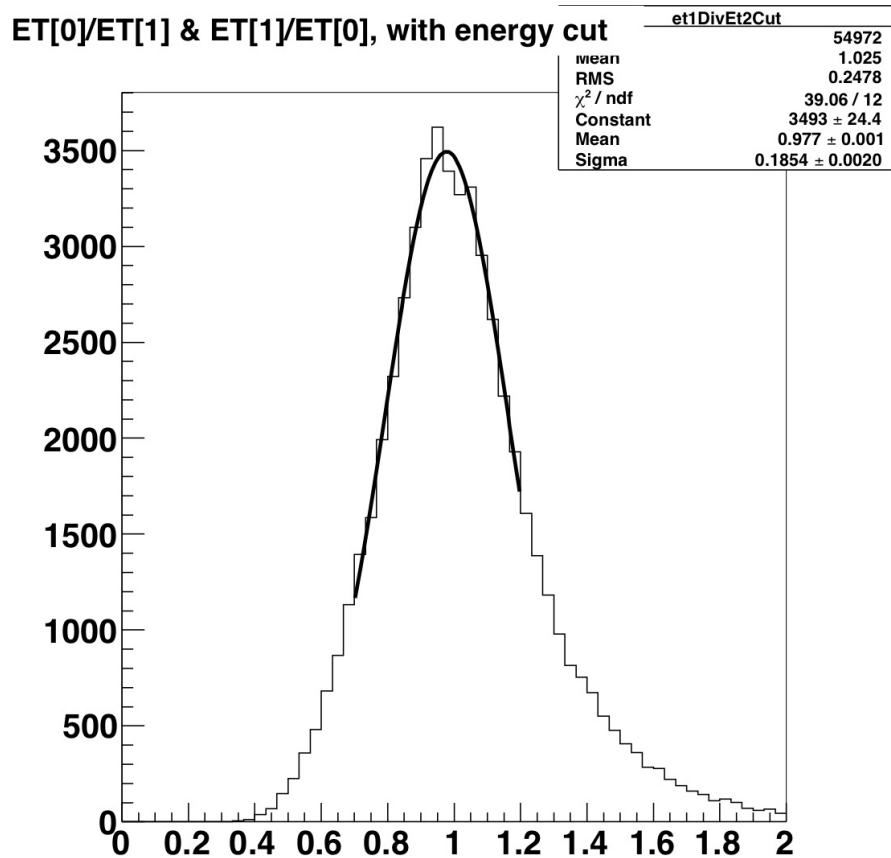
MC dijets

- Oppløsning for transverse energi til hadroniske partikler i jet'en
- Bredde på 0.0548 \pm 0.0007
- Ikke påvirket av partikler som forlater jet'en og gluonstråling.

Estimat av ET-oppløsning til jet'er fra dijets Fordeling i MC dijet



$$\frac{E_T^0}{E_T^1} \wedge \frac{E_T^1}{E_T^0}$$



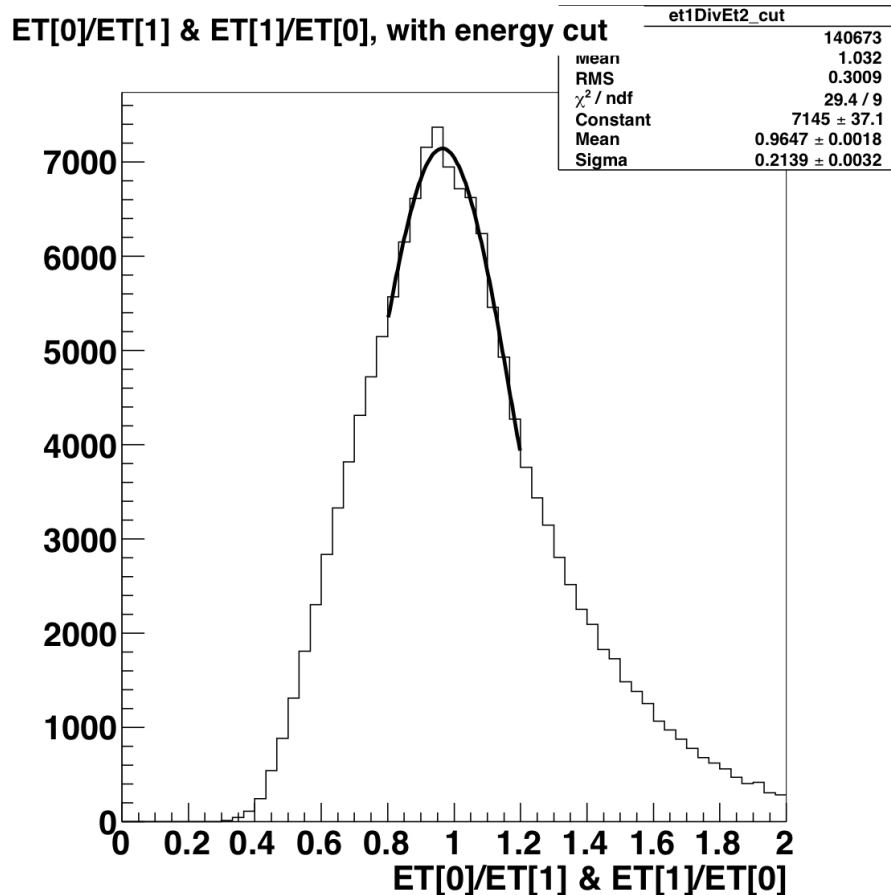
MC dijets

- Bredde på 0.185+/- 0.002
- 4 ganger bredden for forholdet mellom rekonstruert og truth-verdi for transvers energi

Estimat av ET-oppløsning til jet'er fra dijets Fordeling i MC dijet



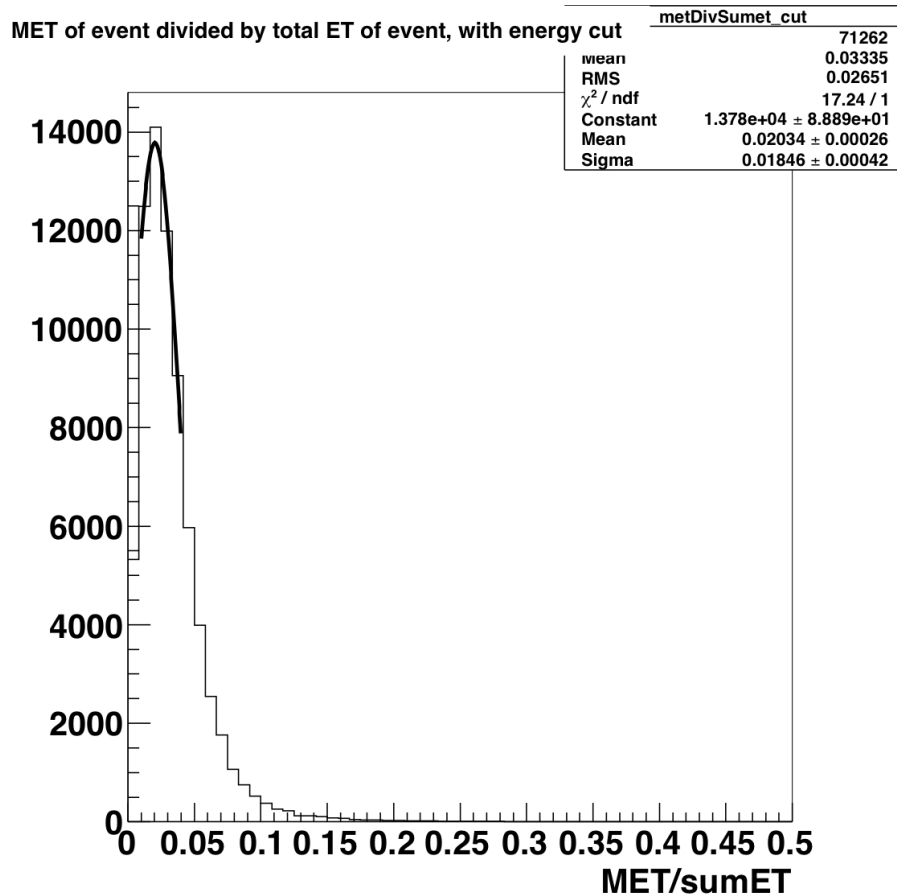
$$\frac{E_T^0}{E_T^1} \wedge \frac{E_T^1}{E_T^0}$$



FDR2

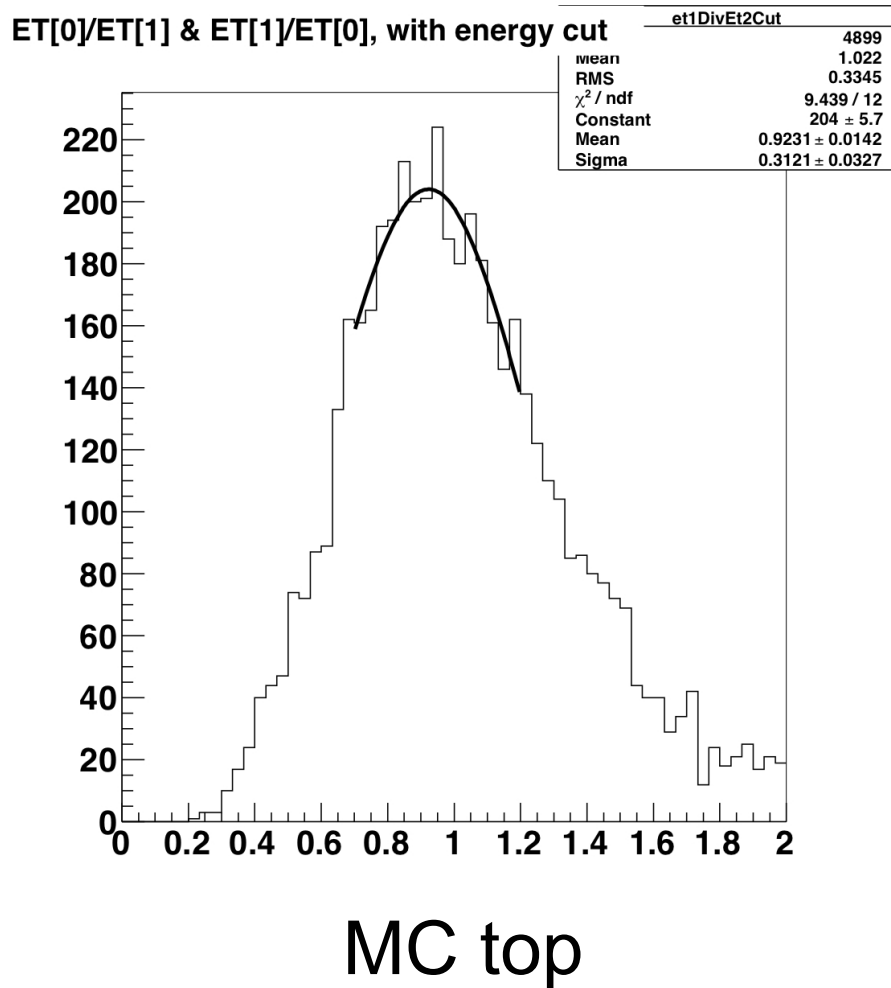
- Bredde på 0.214+/-0.003
- Breder enn for dijets (0.185+/-0.002)
- Dijet-kuttet bør revurderes

Estimat av ET-oppløsning til jet'er fra dijets ($E_T^{\text{manglende}} / E_T^{\text{synlig}}$ for FDR2)

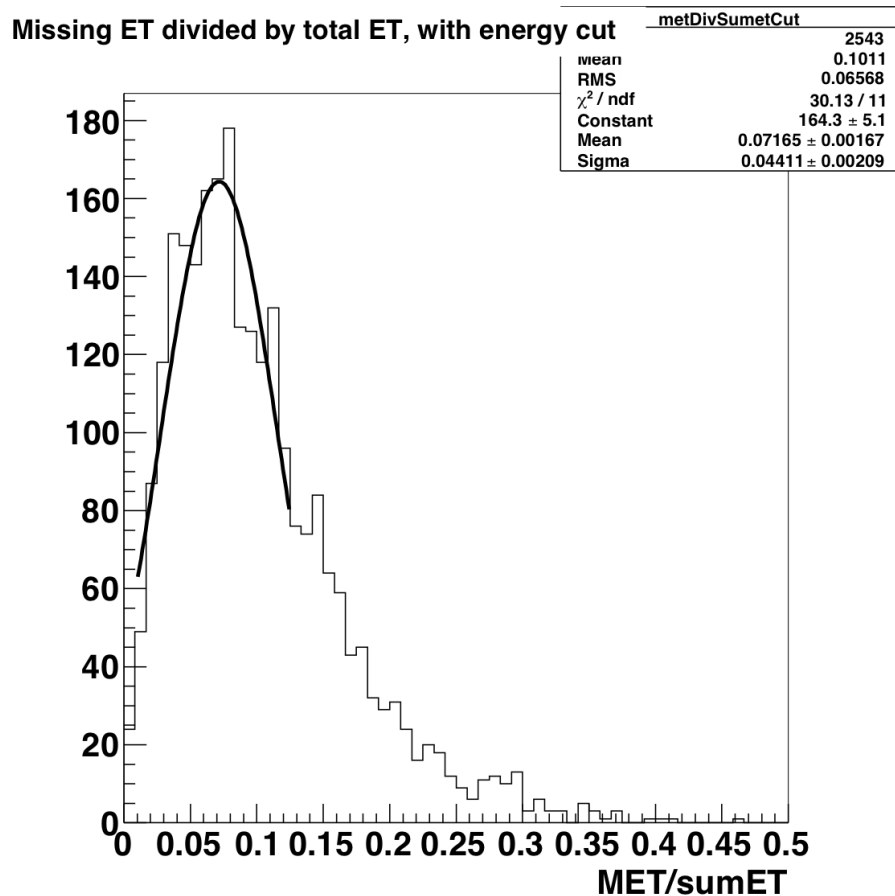


FDR2

- Omtrent like mye manglende transvers energi som for dijets (0.0226 \pm 0.0002)



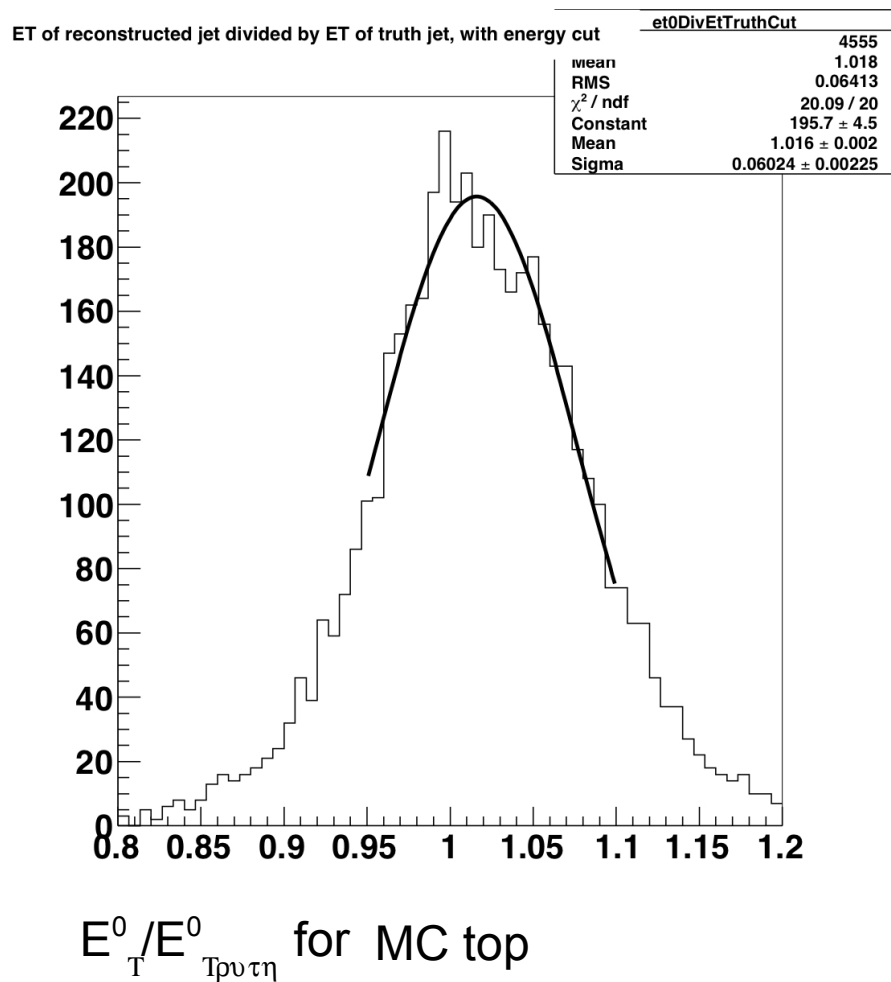
- 18 % av tophendelsene passerer dijetkuttet
- Top-hendelser inneholder nøytrinoer. Jet'ene er ikke dijets selv om de er back-to-back - bredde og gjennomsnitt er menigsløst
- Dijet-kuttet må revurderes



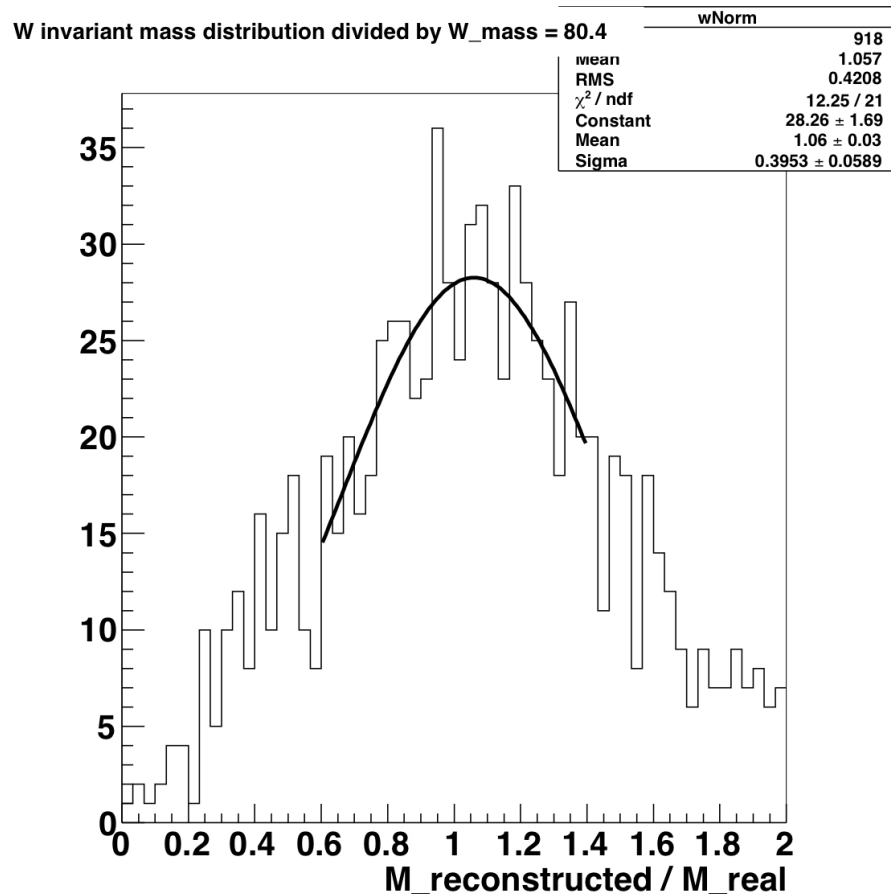
MC top

- Gjennomsnittet er 0.07, altså 0.05 høyere enn for dijets
- Skyldes nøytrinoer fra W-henfall
- Viser et eksempel på at denne variabelen er interessant for fysikk-overvakning i ATLAS

Estimat av oppløsningen til W-massen



- Energiskalaen for jet'er er kalibrert for høyt
- Gjennomsnitt på 1.016 \pm 0.002
- Forventer en rekonstruert W-masse som er høyere enn tabellverdien



MC top

- Gjennomsnitt på 1.06 ± 0.03
- Bredde på 0.40 ± 0.06
- Omtrent 2 ganger bredden for forholdet mellom to ledende jet'er for MC dijets
- Oppløsningen til W massen avhenger også av oppløsningen til massen til en jet

- MC dijet, ET-forhold mellom rekonstruert og truth transvers energi: 0.0548 ± 0.0007
- MC dijet, ET-forhold mellom to ledende jet'er: 0.185 ± 0.002
- FDR2, ET-forhold mellom to ledende jet'er: 0.214 ± 0.003
- MC top, W -massen: 0.40 ± 0.06
- Forholdet mellom rekonstruert og truth transvers energi er oppløsningen til hadroniske partikler i jet'en
- Dijet-kuttet bør revurderes
- Oppløsningen til W -massen avhengig av oppløsningen til massen til jet'er

- Forbedre dijetkuttene (maks 3 jet'er med $E_T > 100$ GeV)
- Finne årsaken til asymmetrien i ϕ
- Forklare vinkelavhengigheten til transvers energi
- Forstå effekten av gluonstråling
- Kvantisere sammenhengen mellom ulike måter å måle oppløsningen til transvers energi for jet'er
- Studere oppløsningen som funksjon av transvers energi
- Teste andre variabler for oppløsningen for transvers energi som kan være mindre biased
- Kjøre på virkelig data
- Implementere algoritmer i offisiell ATLAS overvåking

- Programmet DiJet ble utviklet for å se på oppløsningen til ATLAS-detektoren, samt lete etter store feil.
- Dijet-kuttet bør revurderes
- Asymmetri i ϕ i de dataene som ble analysert
- Betydelig effekt. Må undersøkes for MET blir brukt i analyser
- Energiskalaen til jet'er avhengig av η
- Bredden til W -massen er to ganger bredden til ET-forholdet mellom to ledende jets i en hendelse
- Energiskalaen for jet'er er kalibrert for høyt
- En faktor 4 mellom bredden på ET-forholdet mellom to ledende jets og ET-forholdet mellom rekonstruert og «truth» jet, siden sistnevnte gir estimat av oppløsning av partikler i en jet, ikke jet'en.

Takk

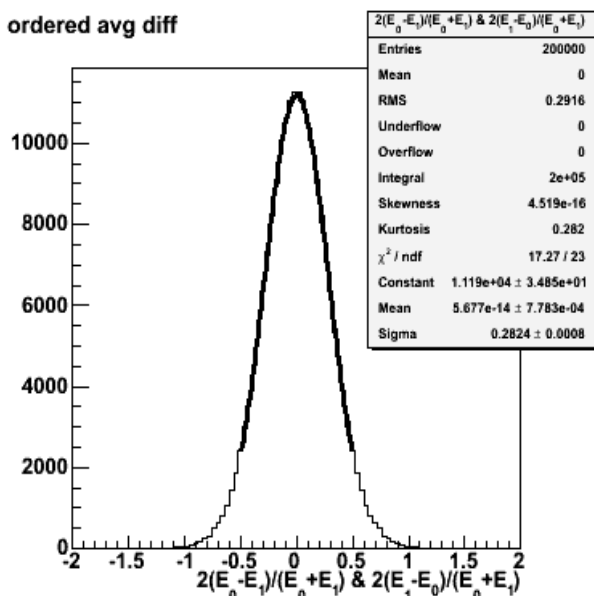


- Anna Lipniacka
- Thomas Burgess
- Alex Kastanas
- Arshak Tonoyan

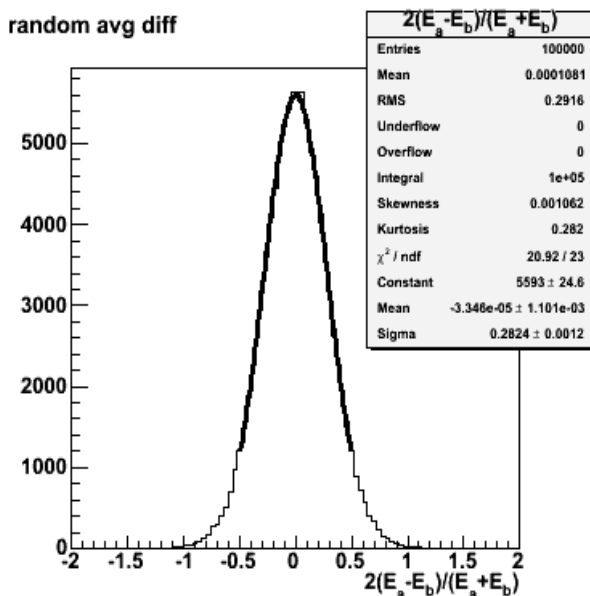
Backup slides



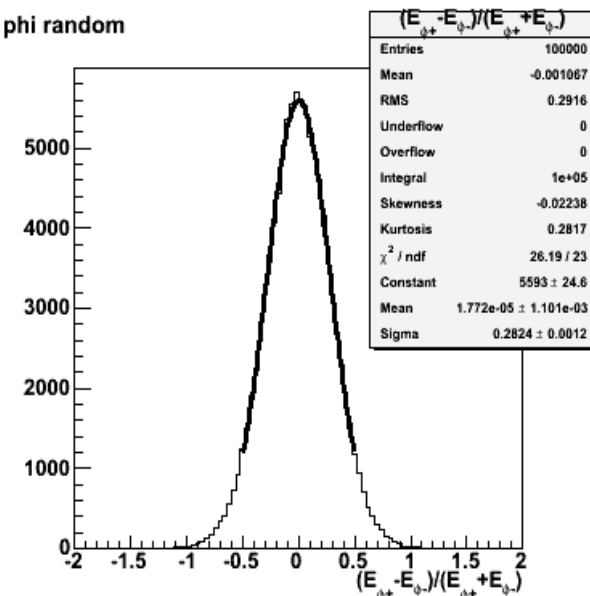
ordered avg diff



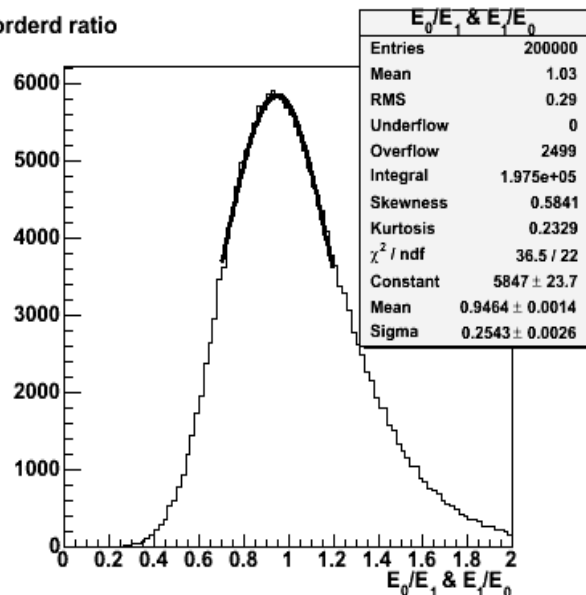
random avg diff



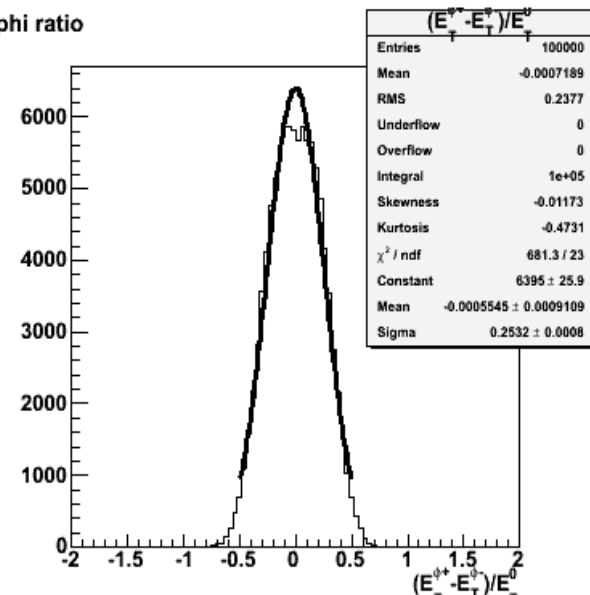
phi random



orderd ratio



phi ratio



phi ratio two E distributions

