

---

# Identificación de jets usando las variables de forma del evento en el experimento ALICE.

Antonio Ortiz Velásquez

Instituto de Ciencias Nucleares-UNAM

Seminario conjunto de altas energías ICN-IF

Miércoles 29 de Abril de 2009.

---

1. Motivaciones.
2. Breve historia de las variables de forma.
3. Variables de forma en colisionadores de hadrones.
4. Física de jets en colisiones protón-protón en ALICE.
5. Descripción de ESA.
6. Implementación de ESA en colisiones p-p a  $\sqrt{s} = 10$  TeV.
7. Estudios de correlaciones acimutales a  $\sqrt{s} = 200$  GeV usando ESA.
8. Conclusiones.

# Motivaciones

En el LHC se harán chocar protones con energía en centro de masa desde 10 hasta 14 TeV. A estas energías la producción de procesos duros será muy abundante, dichos procesos se manifestarán principalmente en forma de jets en eventos de alta multiplicidad.

ALICE es uno de los cuatro experimentos del LHC, usando su sistema de disparo para seleccionar eventos de alta multiplicidad y su excelente capacidad para rastrear partículas con momento transversal desde 0.5 GeV/c hasta 100 GeV/c; es posible seleccionar eventos provenientes de procesos duros de acuerdo a su distribución de momento transversal y a su número de jets. Para dicho propósito, utilizamos las variables de forma: thrust y recoil.

# Breve historia de las variables de forma.

Las variables de forma miden las propiedades geométricas del flujo de energía en estados finales QCD. Algunas de estas observables:

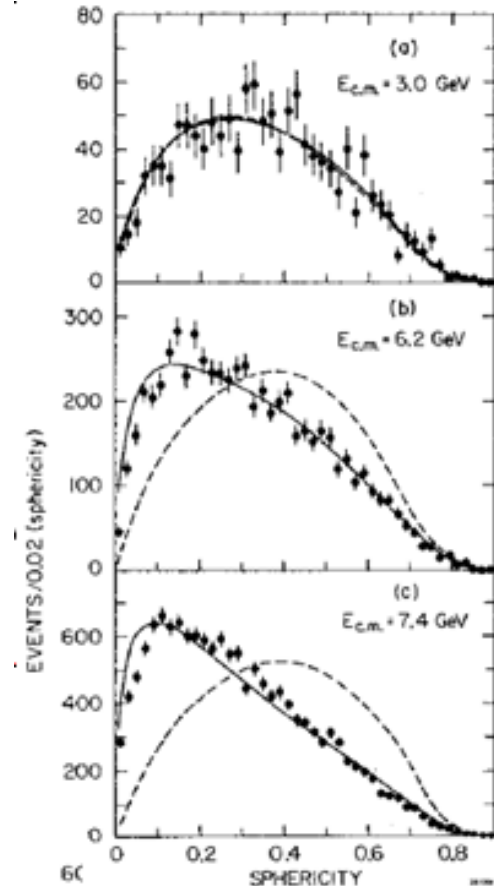
## ✓ Esfericidad

Fue usada en SLAC por la colaboración SPEAR, para demostrar la existencia de estructura de jets en  $e+e^- \rightarrow$  hadrones a energías de 6.2 y 7.4 GeV en c.m.

G. Hanson et al., *Phys. Rev. Lett.* **35** (1975) 1609.

$$T^{\alpha\beta} \equiv \sum_i (\delta^{\alpha\beta} \vec{p}_i^2 - p_i^\alpha p_i^\beta)$$

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \quad S \equiv \frac{3\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} = \frac{3(\sum_i \vec{p}_{\perp i}^2)_{min}}{2 \sum_i \vec{p}_i^2}$$

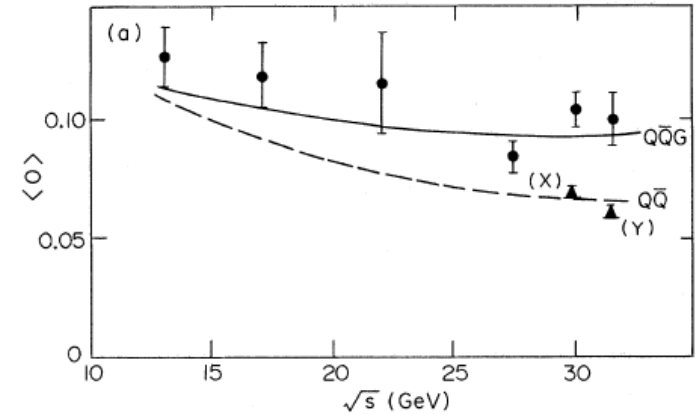


Las variables de forma miden las propiedades geométricas del flujo de energía en estados finales QCD. Algunas de estas observables:

## ✓ Oblateness

La colaboración MARK-J en PETRA utilizó esta variable para describir eventos de tres jets en  $e^+e^- \rightarrow$  hadrones a energías de 31.5 GeV en c.m.

(MARK-J Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **43**, 830 (1979).



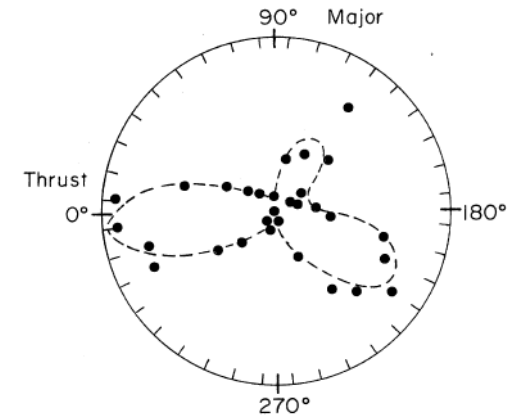
$$T \equiv \underbrace{\max}_{\vec{e}_1} \frac{\sum_i |\vec{E}_i \cdot \vec{e}_1|}{\sum_i |\vec{E}_i|}$$

$$\vec{e}_1 \perp \vec{e}_2$$

$$M_a \equiv \underbrace{\max}_{\vec{e}_2} \frac{\sum_i |\vec{E}_i \cdot \vec{e}_2|}{\sum_i |\vec{E}_i|}$$

$$M_i \equiv \underbrace{\min}_{\vec{e}_3} \frac{\sum_i |\vec{E}_i \cdot \vec{e}_3|}{\sum_i |\vec{E}_i|}$$

$$O \equiv M_a - M_i$$

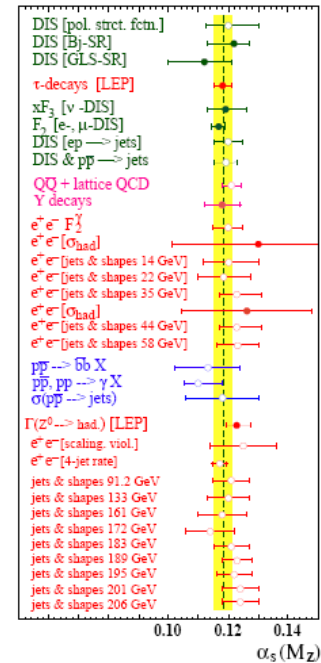


En colisiones  $e^+ e^-$  y en DIS, las variables de forma han sido las observables QCD más estudiadas en ambos frentes: teórico y experimental. Estas se calculan teóricamente en términos de los momentos de los quarks y gluones salientes; y se miden en términos del momento de los hadrones. Entre los estudios que se han hecho se encuentran:

## ✓ Mediciones de la constante de acoplamiento

fuerte

S. Bethke, *Nucl. Phys.* **121** (2003)



En colisiones  $e^+ e^-$  y en DIS, las variables de forma han sido las observables QCD más estudiadas en ambos frentes: teórico y experimental. Estas se calculan teóricamente en términos de los momentos de los quarks y gluones salientes; y se miden en términos del momento de los hadrones. Entre los estudios que se han hecho se encuentran:

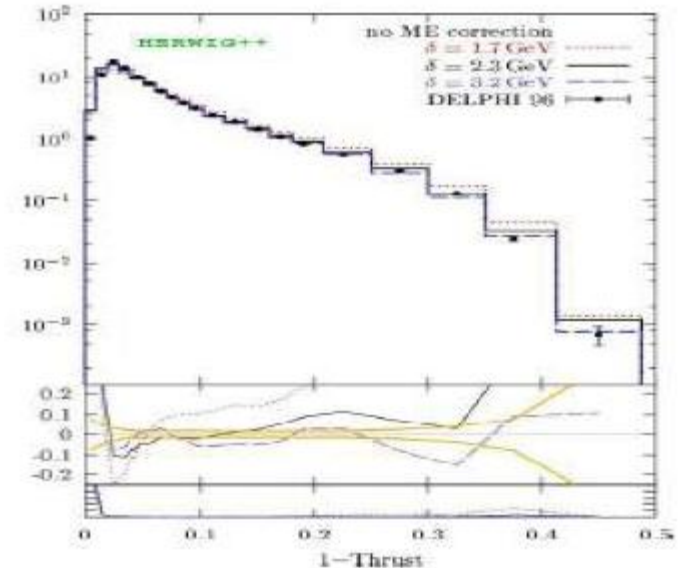
## ✓ Mediciones de la constante de acoplamiento fuerte

S. Bethke, *Nucl. Phys.* **121** (2003)

## ✓ Validación detallada de generadores MC

G. Marchesini et al., *Comput. Phys. Commun.* **67**(1992) 465.

T. Sjostrand, *Comput. Phys. Commun.* **82**(1994) 74.



En colisiones  $e^+ e^-$  y en DIS, las variables de forma han sido las observables QCD más estudiadas en ambos frentes: teórico y experimental. Estas se calculan teóricamente en términos de los momentos de los quarks y gluones salientes; y se miden en términos del momento de los hadrones. Entre los estudios que se han hecho se encuentran:

✓ Mediciones de la constante de acoplamiento fuerte

S. Bethke, *Nucl. Phys.* **121** (2003)

✓ Validación detallada de generadores MC

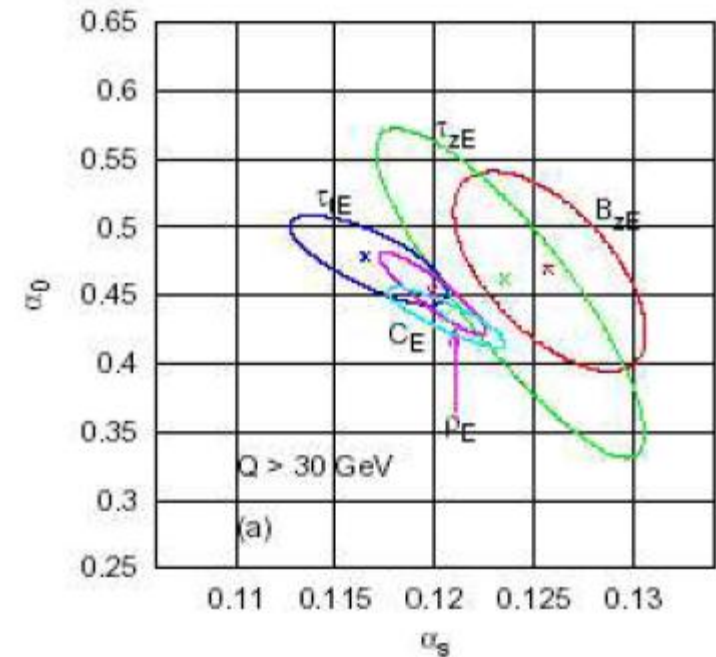
G. Marchesini et al., *Comput. Phys. Commun.* **67**(1992) 465.

T. Sjostrand, *Comput. Phys. Commun.* **82**(1994) 74.

✓ Estudios de correcciones por hadronización

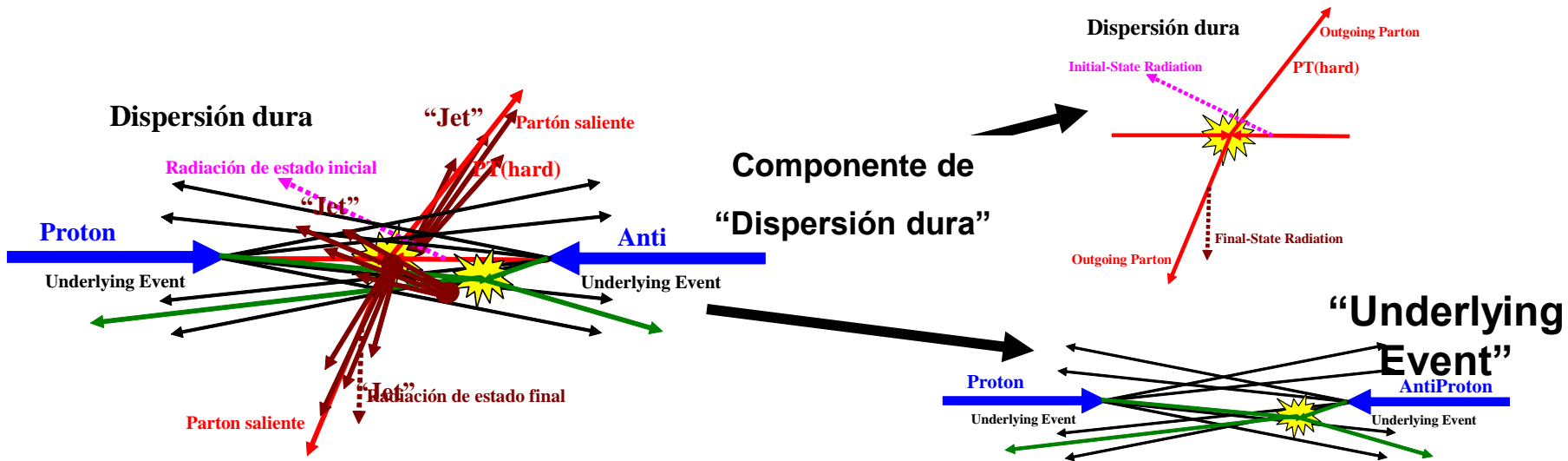
M. Beneke, *Phys. Rept.* **317**(1999) 1.

M. Dasgupta and G. P. Salam, *J. Phys.* **G 30**(2004) R 143.



# Variables de forma en colisionadores de hadrones.

En colisionadores de hadrones, las variables de forma no han sido muy explotadas, a pesar de que en este tipo de eventos hay una rica producción de eventos multi-jet, de jets de gluones primarios y de que es una herramienta potencial para el estudio de los eventos underlying.

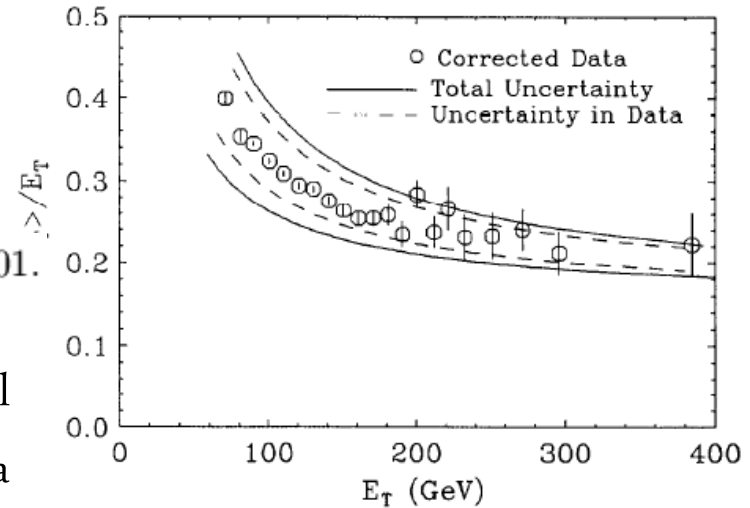


En Tevatron hay sólo algunas mediciones experimentales reportadas.

✓ La colaboración CDF reporta la medición del parámetro QCD “Jet broadening”

F. Abe et al. [CDF Collaboration], *Phys. Rev. D* **44** (1991) 601.

Se midió el valor promedio del parámetro global del evento,  $Q_T$ , como función de  $E_T$  (energía transversa total) en colisiones p-pbar a 1.8 TeV.  $Q_T$  es la suma escalar del momento transverso perpendicular al eje thrust transverso. Los datos son bien descrito por las predicciones QCD a nivel partónico (1er orden).



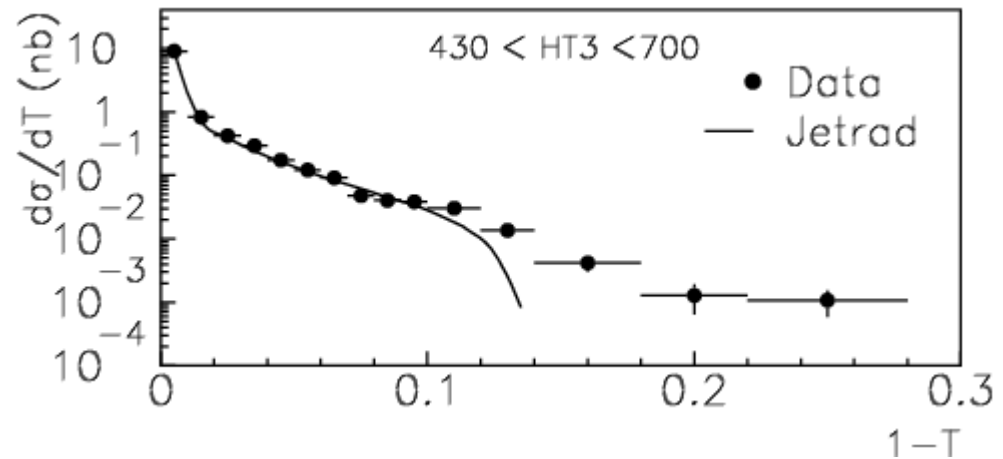
$$T_t = \text{MAX} \sum_{i=1}^n \frac{|\vec{E}_T^i \cdot \vec{n}_t|}{E_T}$$

$$Q_T = \sum_{i=1}^n |\vec{E}_T^i \times \vec{n}_t|$$

✓ La colaboración D0 reporta la medición del parámetro “thrust transverso”

J. A. Bertram [D0 Collaboration], *Acta Phys. Polon. B* **33** (2002) 31 41.

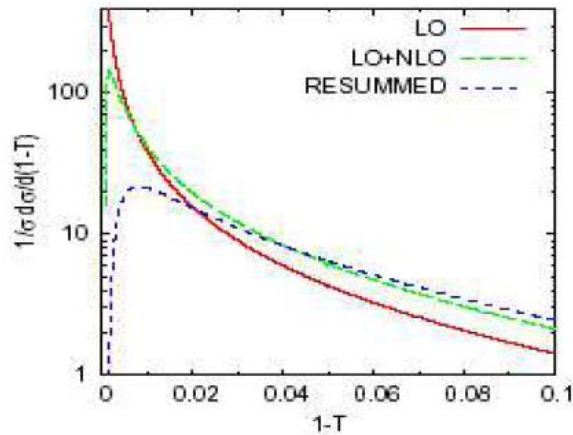
Se midió la variable thrust transversa usando jets en lugar de partículas. Para calcular thrust se usan los dos jets de más alto  $p_T$  y se pone en función de la suma escalar de los tres jets mas energéticos, HT3. Estos resultados se comparan con las predicciones a nivel partonico NLO (JETRAD).



$$T^T = \max_{\hat{n}} \frac{\sum |\vec{p}_{t_i} \cdot \hat{n}|}{\sum |\vec{p}_{t_i}|}$$

- Recientemente se han investigado una serie de variables de forma para colisionadores de hadrones.

A. Banfi, G. Salam, G. Zanderighi, *JHEP* **0408** (2004).



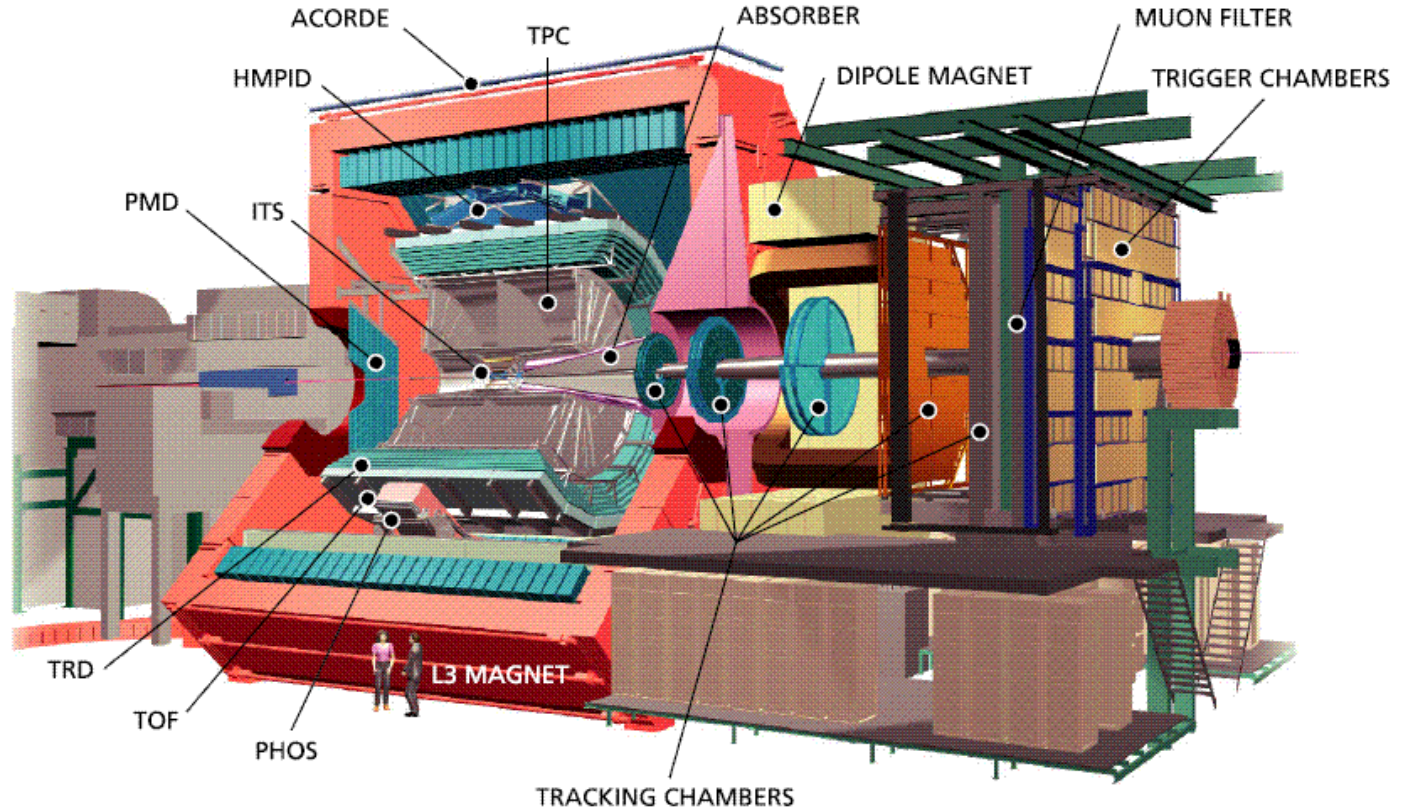
- Para llevar a cabo estudios a través de las variables son necesarias las predicciones tanto a orden fijo como resumas perturbativas.

- Además se ha desarrollado el programa CAESAR (Computer Automated Expert Semi-Analytical Resummation) que ha permitido un avance en el frente de las resumas. La restricción que se tiene es que las resumas se aplican solo a formas de eventos globales (i. e. sensibles a la radiación en todas direcciones).

A. Banfi, G. P. Salam, G. Zanderighi, *Phys. Lett.* **B584** (2004) 298.

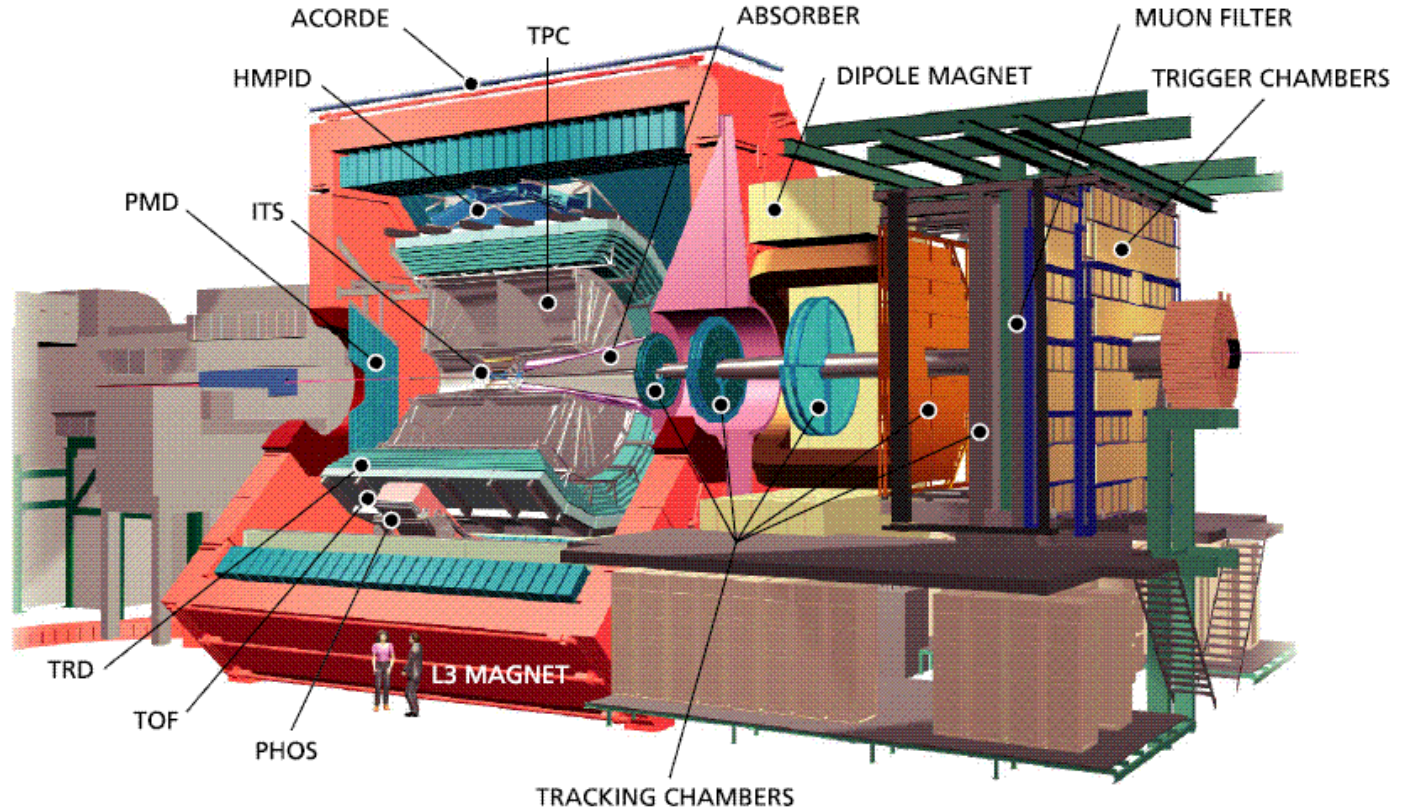
# Física de jets en colisiones p-p en ALICE.

ALICE (A Large Hadron Collider Experiment) es un experimento diseñado para hacer física de iones pesados. Diseño: eventos con multiplicidades hasta de 8000 CH por unidad de rapidez.



ALICE (A Large Hadron Collider Experiment) es un experimento diseñado para hacer física de iones pesados. Diseño: eventos con multiplicidades hasta de 8000 CH por unidad de rapidez.

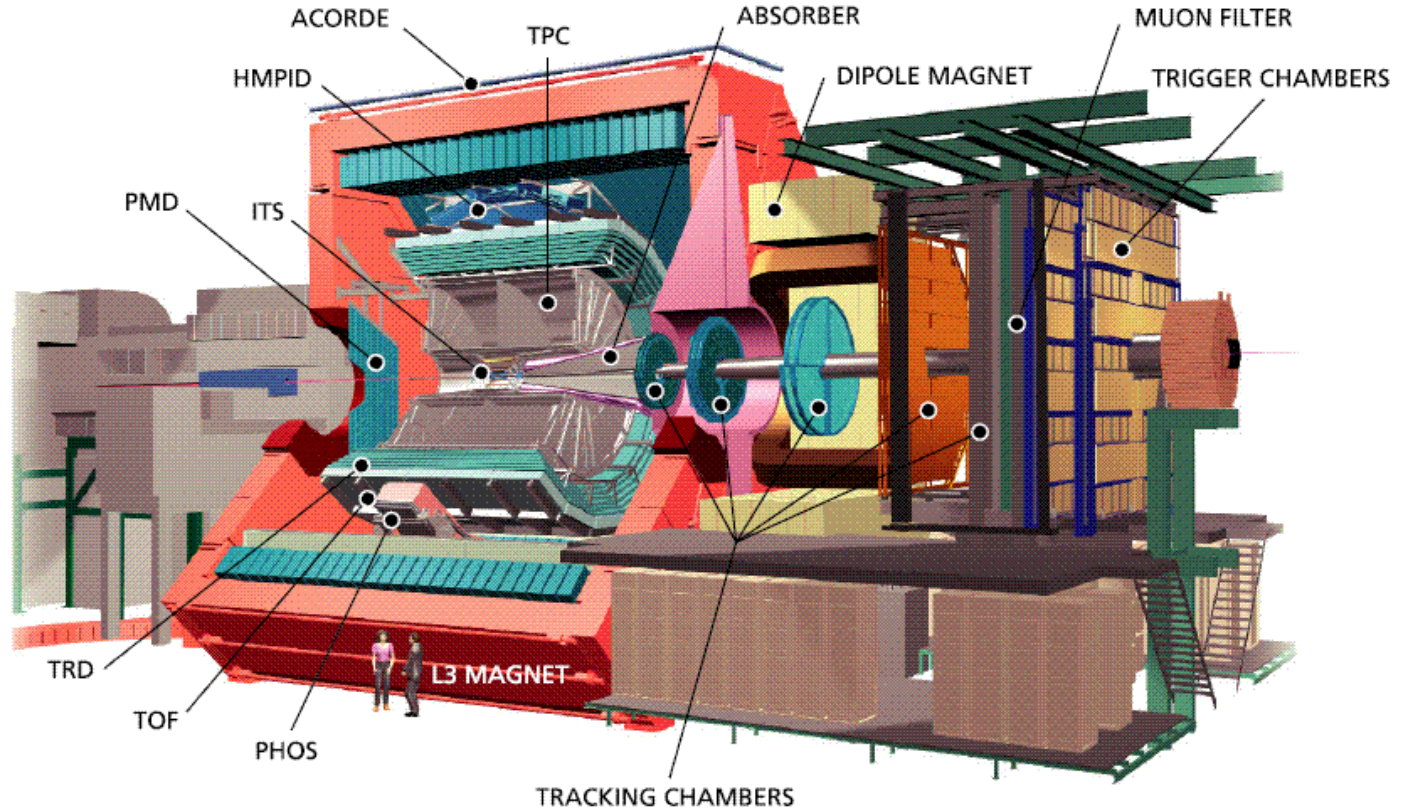
- ✓ Resolución de  $p_t$  desde 100 MeV/c (1-2%) hasta 100 GeV/c (10%).



ALICE (A Large Hadron Collider Experiment) es un experimento diseñado para hacer física de iones pesados. Diseño: eventos con multiplicidades hasta de 8000 CH por unidad de rapidez.

✓ Resolución de  $p_t$  desde 100 MeV/c (1-2%) hasta 100 GeV/c (10%).

✓ PID para un amplio rango de  $p_t$  (hasta de 5 GeV/c para p).

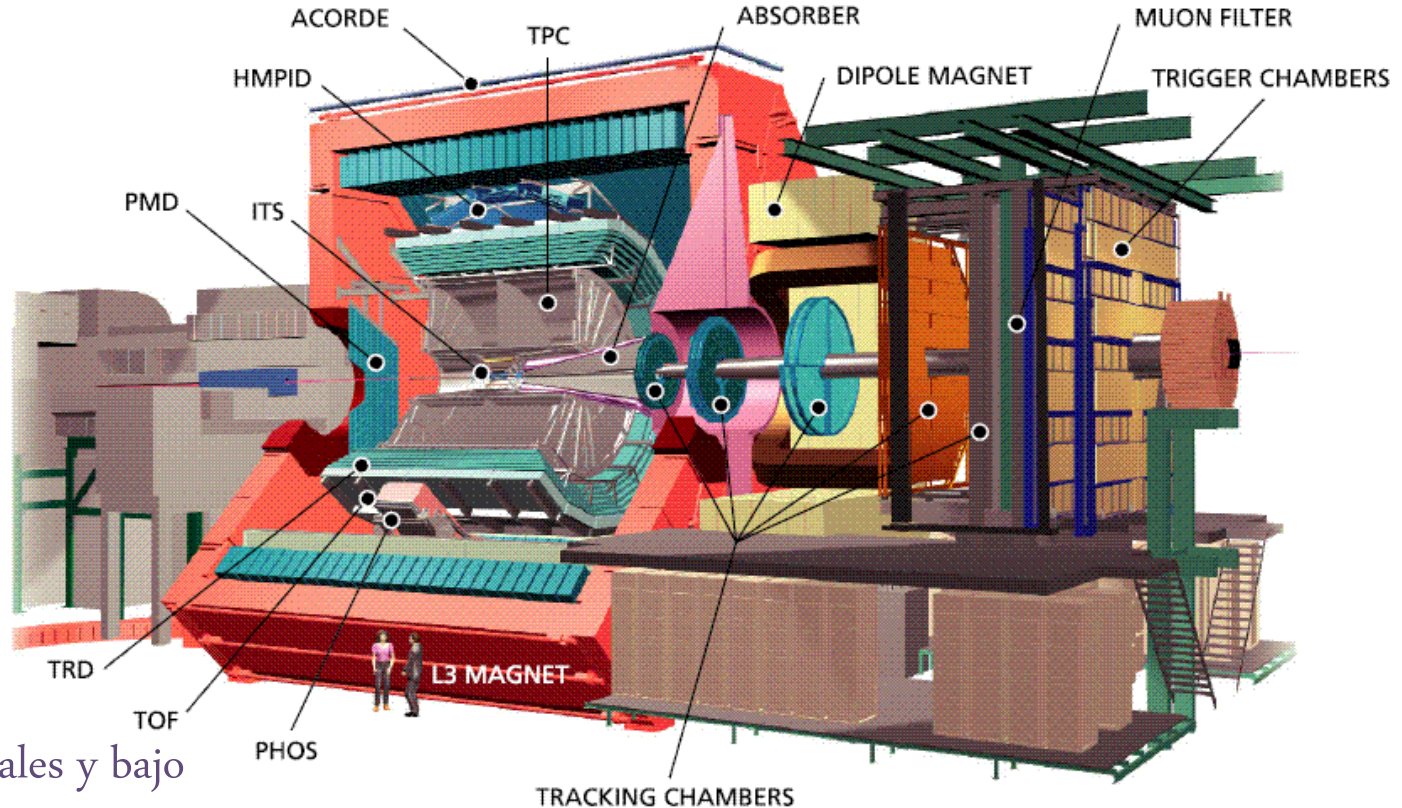


ALICE (A Large Hadron Collider Experiment) es un experimento diseñado para hacer física de iones pesados. Diseño: eventos con multiplicidades hasta de 8000 CH por unidad de rapidez.

✓ Resolución de  $p_t$  desde 100 MeV/c (1-2%) hasta 100 GeV/c (10%).

✓ PID para un amplio rango de  $p_t$  (hasta de 5 GeV/c para p).

✓ Bajo grosor de materiales y bajo campo magnético (0.5 T).

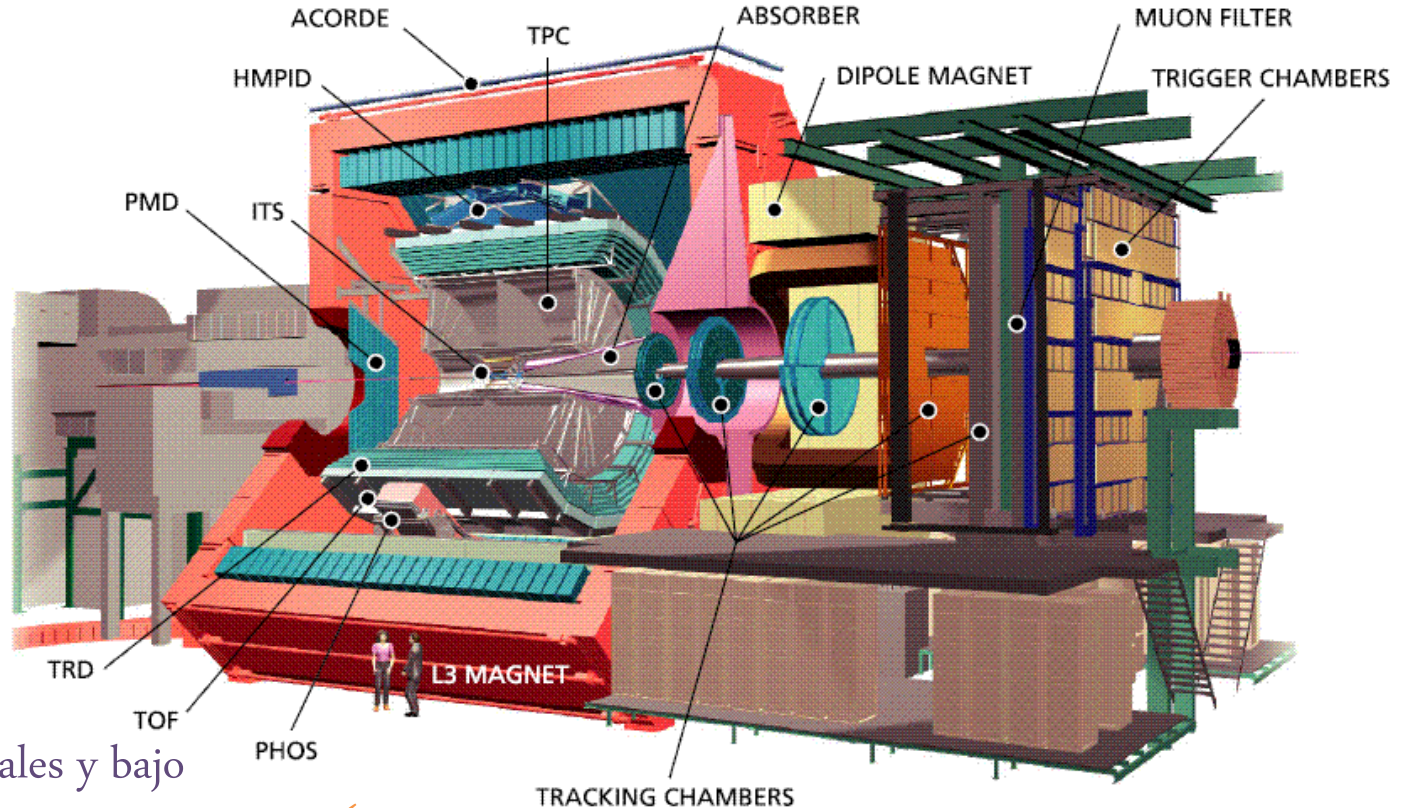


ALICE (A Large Hadron Collider Experiment) es un experimento diseñado para hacer física de iones pesados. Diseño: eventos con multiplicidades hasta de 8000 CH por unidad de rapidez.

✓ Resolución de  $p_t$  desde 100 MeV/c (1-2%) hasta 100 GeV/c (10%).

✓ PID para un amplio rango de  $p_t$  (hasta de 5 GeV/c para p).

✓ Bajo grosor de materiales y bajo campo magnético (0.5 T).



✓ Excelente determinación de vértices secundarios.

Las mediciones de producción de jets en p-p son importantes para entender las colisiones núcleo-núcleo. Pero además el programa plantea caracterizar eventos con varios jets de baja energía en p-p. Entre las observables que se planea medir están:

- ✓ Sección eficaz semi-dura, contando todos los eventos con al menos un jet producido arriba de cierta  $E_t$  dada. Esto puede ser relacionado con la probabilidad de no tener alguna interacción dura en todos los eventos inelásticos.
- ✓ Los rates relativos de producción de 1, 2 y 3 jets como función del corte bajo  $E_t$  *cutoff*.
- ✓ Medición de colisiones dobles de partones y su distinción del proceso principal QCD  $2 \rightarrow 4$

También se espera que ALICE sea capaz de estudiar fragmentación de jets en una forma única gracias a su habilidad para identificar partículas y medir sus propiedades en un ambiente de muy alta densidad que es relevante para las topologías de jets.

(ALICE Collaboration) *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 32 (2006)

# Event Shape Analysis (ESA).

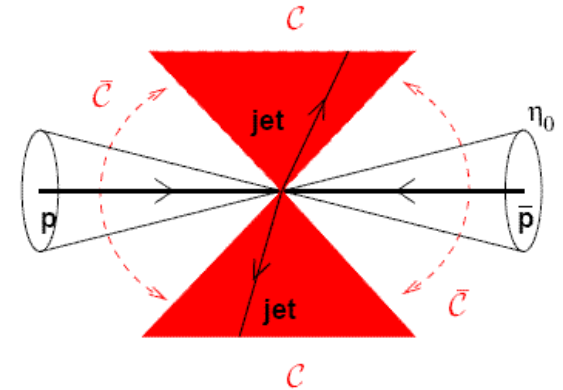


ESA es un método que utiliza las siguientes variables que están definidas en la aceptación  $C$ .

- ✓ En colisionadores de hadrones, **thrust** esta definida en el plano transverso de acuerdo a:

$$T \equiv \underbrace{\max}_{\vec{n}_t} \frac{\sum_i |\vec{p}_{t,i} \cdot \vec{n}_t|}{\sum_i |\vec{p}_{t,i}|}$$

$$\tau \equiv 1 - T$$



Para eventos de dos jets colineales en el plano transverso  $1-T \rightarrow 0$ , mientras que para eventos con una distribución de momento más uniforme:  $1-T \rightarrow 0.5$

ESA es un método que utiliza las siguientes variables que están definidas en la aceptación  $C$ .

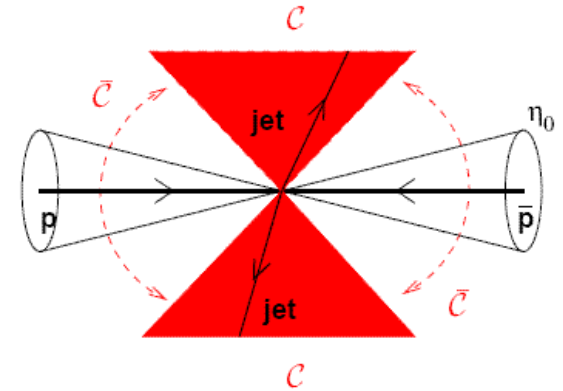
- ✓ En colisionadores de hadrones, **thrust** esta definida en el plano transverso de acuerdo a:

$$T \equiv \underbrace{\max}_{\vec{n}_t} \frac{\sum_i |\vec{p}_{t,i} \cdot \vec{n}_t|}{\sum_i |\vec{p}_{t,i}|} \quad \tau \equiv 1 - T$$

- ✓ **Recoil** es la suma vectorial del momento transverso en la aceptación  $C$ .

$$R \equiv \frac{1}{\sum_i |\vec{p}_{t,i}|} \left| \sum_i \vec{p}_{t,i} \right|$$

Por conservación del momento transverso,  $R$  es una cantidad sensible al momento transverso indetectable por efectos de aceptación. Valores de  $R$  bajos se relacionan con eventos que ocurren completamente en la aceptación.



Para eventos de dos jets colineales en el plano transverso  $1-T \rightarrow 0$ , mientras que para eventos con una distribución de momento más uniforme:  $1-T \rightarrow 0.5$

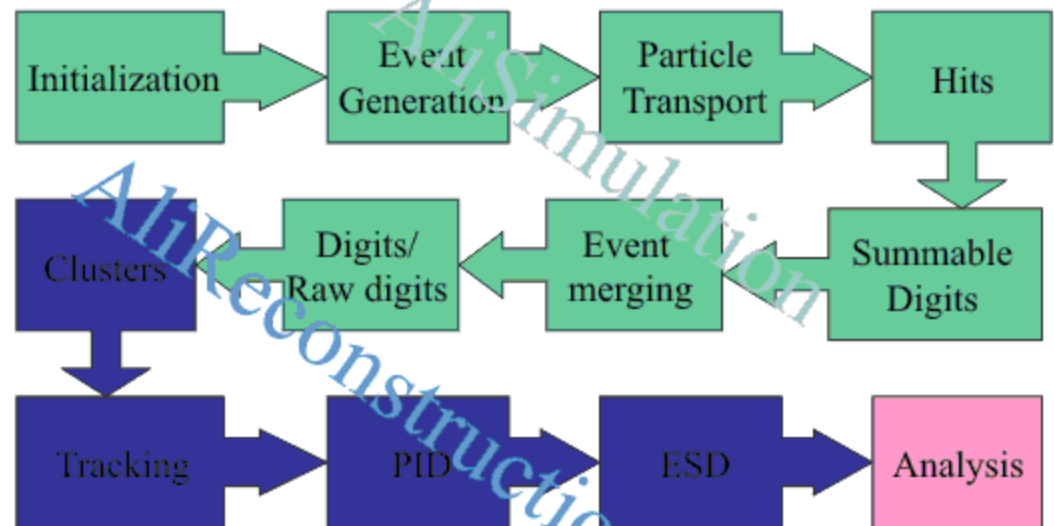
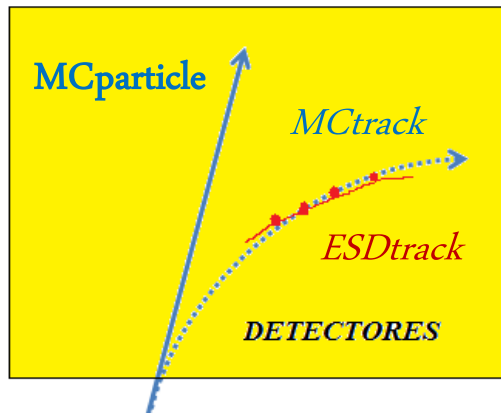
Como discutimos anteriormente, por lo general para identificar y construir un jet se utiliza información del calorímetro del detector. Con ello se reconstruye toda la energía visible y por lo regular se hace el disparo para seleccionar dichos eventos. Dado que ALICE no posee un calorímetro extendido en  $\phi$ , la identificación de jets la basamos en la información del rastreo (partículas cargadas).

El análisis de formas de eventos se basa en:

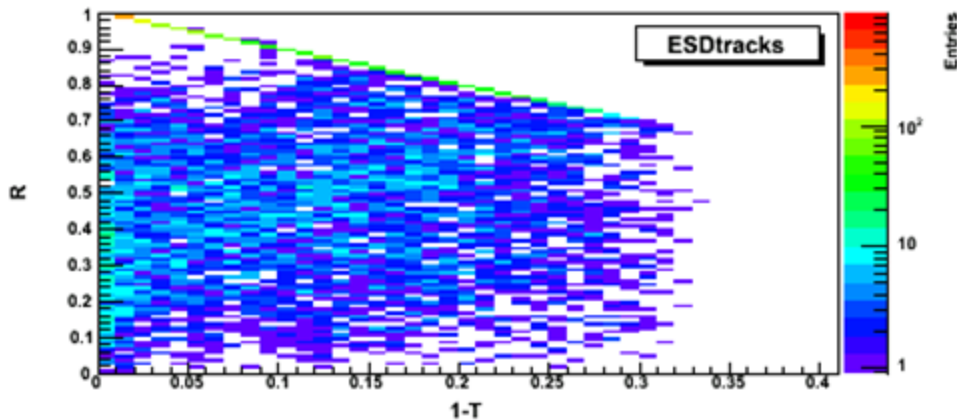
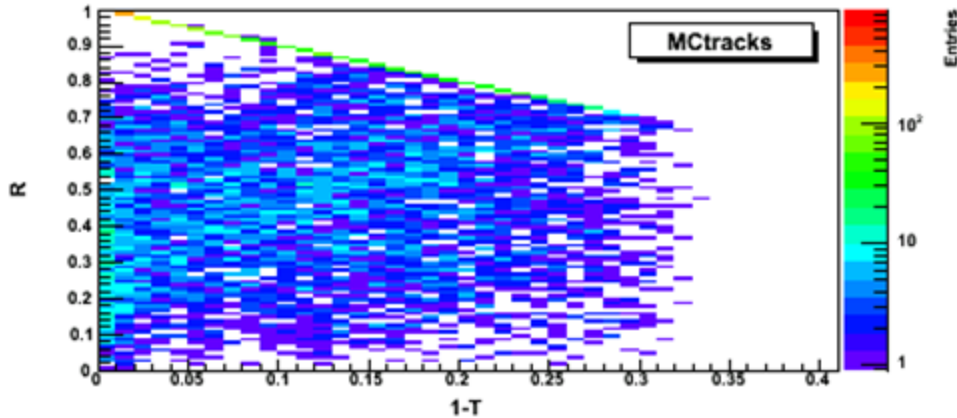
- ✓ Identificamos eventos cuya partícula de más alto momento transversal en el intervalo:  $|\eta| \leq 0.5$
- ✓ Se pide que el evento posea al menos una partícula con  $p_T \geq 3 \text{ GeV}/c$ .
- ✓ Para estos eventos se calculan las variables T y R. Para ello se consideran partículas en la aceptación de ALICE:  $|\eta| \leq 1$  y con  $p_T \geq 1.5 \text{ GeV}/c$ . Esto nos permite reducir el efecto de los underlying events.
- ✓ Se hace la selección de eventos a partir de sus valores T y R.

# Implementación de ESA en colisiones p-p a $\sqrt{s}=10$ TeV.

Este análisis fue hecho utilizando simulaciones (oficiales de la colaboración) minimum-bias de colisiones protón-protón con energía en centro de masa de **10 TeV**. Se utilizó el generador de eventos MC **Pythia**. Analizamos **400K eventos**. La simulación del detector incluye un campo magnético de 0.5 T.



Después de los cortes impuestos a cada evento ...



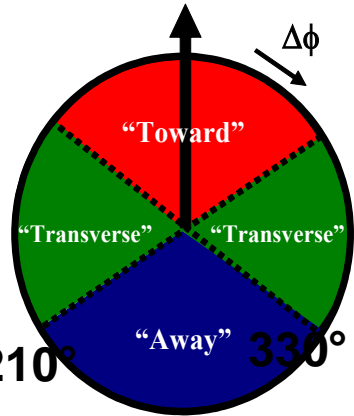
Analizamos eventos localizados en diferentes regiones de esta distribución.

Region	Variables
A	$R \leq 0.35, \tau \leq 0.03$
B	$R \geq 0.9, \tau \leq 0.03$
C	$R \leq 0.4, \tau \geq 0.25$

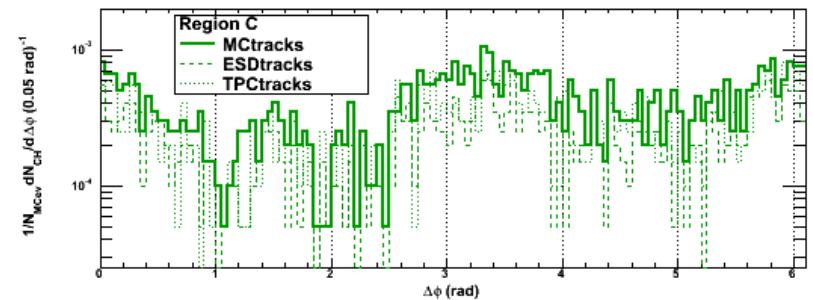
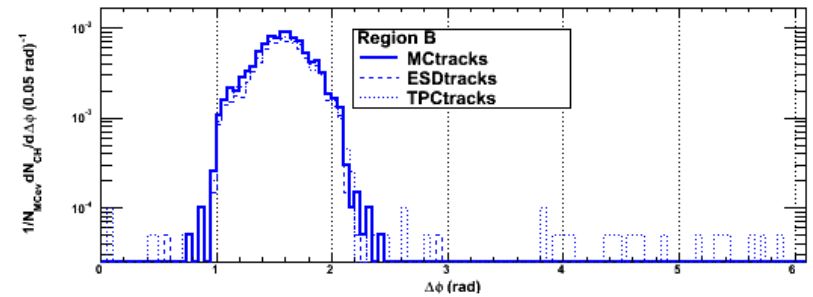
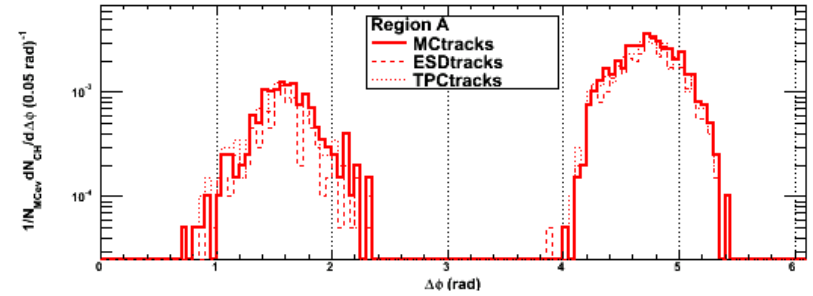
Exploramos la topología de los eventos, para ello realizamos una rotación de tal modo que la partícula de más alto  $p_t$  quede a  $90^\circ$  en  $\phi$  refiriéndonos al plano transversal al eje del haz.

Exploramos la topología de los eventos seleccionados...

Jet #1 Direction



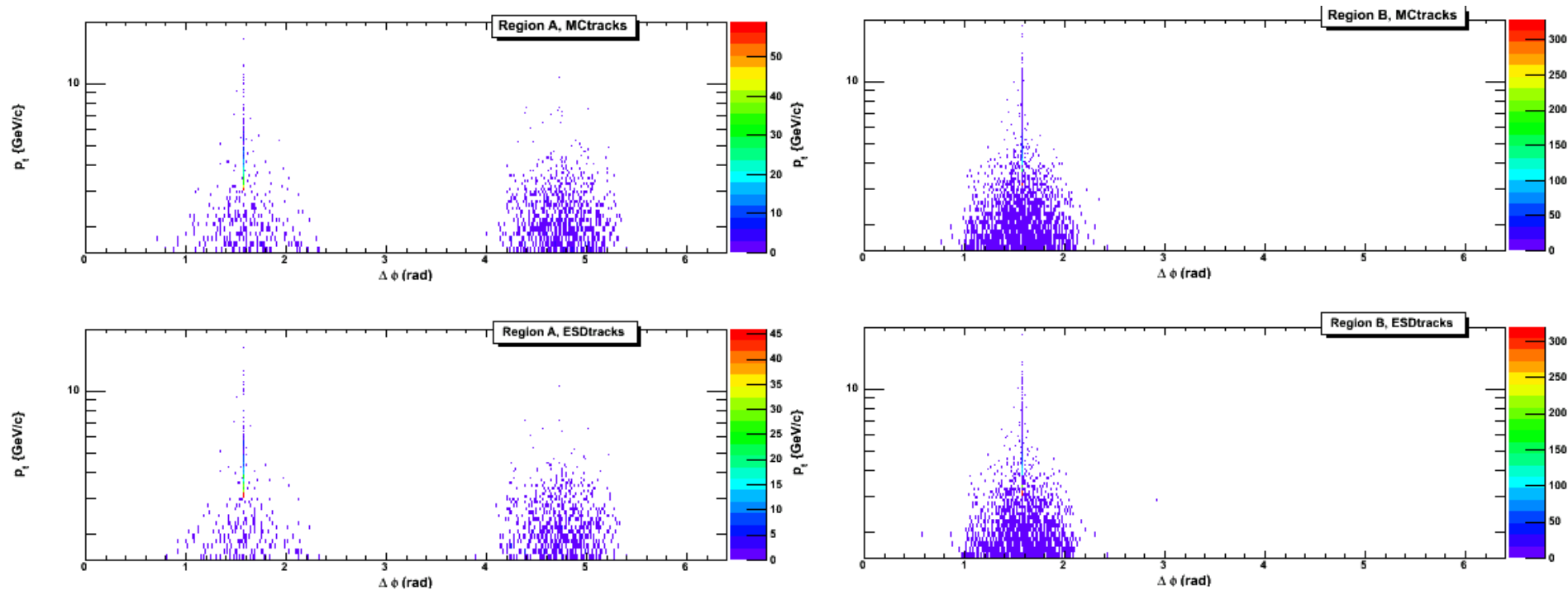
✓ Región A: la distribución acimutal presenta dos picos un a  $90^\circ$  y el otro a  $180^\circ$ . Estructura de eventos con dos jets.



✓ Como se esperaba los eventos de alta R solo presentan un pico, corresponden a eventos de un jet en la aceptación, gamma jets o a fluctuaciones grandes entre componentes cargada/neutra.

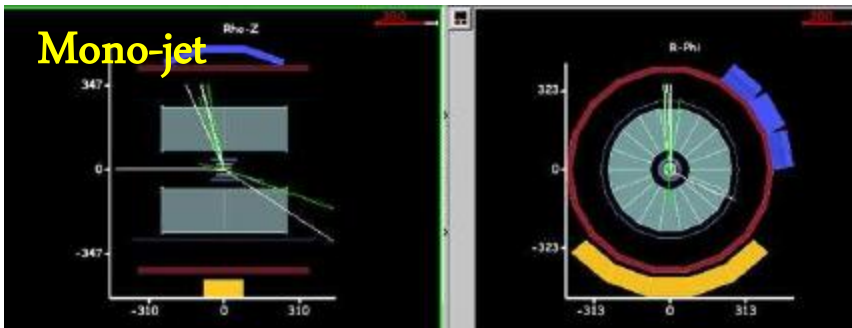
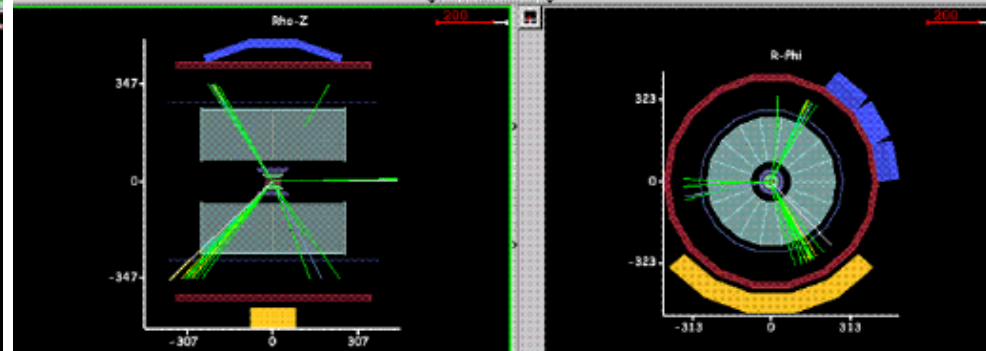
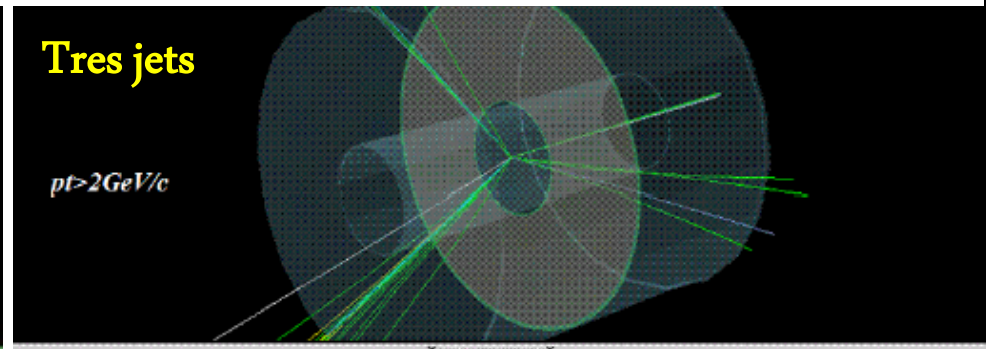
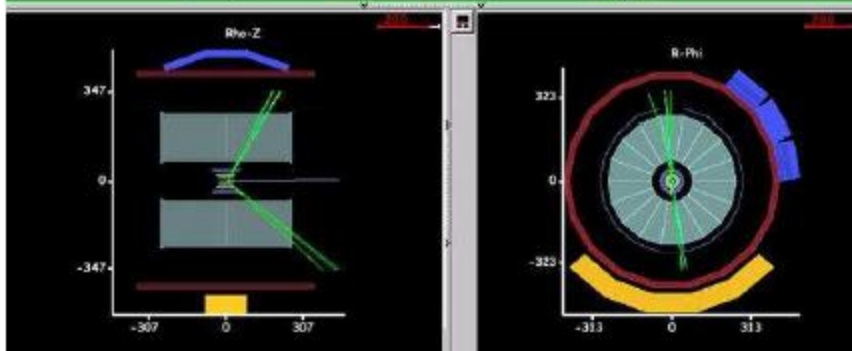
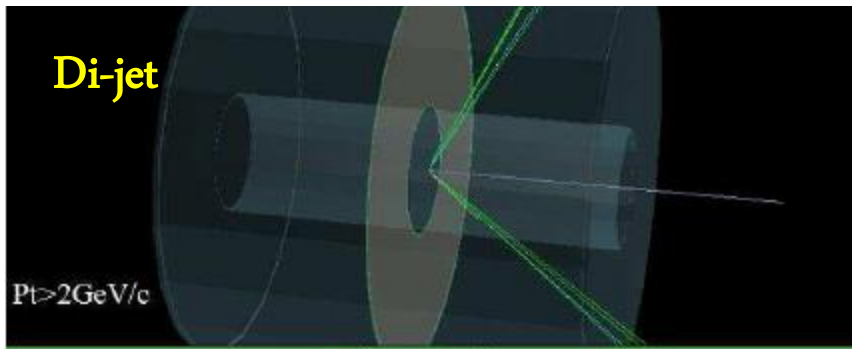
✓ Los eventos de más altos valores 1-T, exhiben 3 picos. Uno que esta en la dirección de la leading y los dos simétricos en el hemisferio opuesto.

Distribución de  $p_t$  vs  $\phi$ , la partícula de más alto  $p_t$  esta incluida...



Region	Topología	Variables	$N_{MCevents}$	$N_{ESDevents}$
A	Dijets	$R \leq 0.35, \tau \leq 0.03$	468 (0.12%)	414 (0.1%)
B	Monojets	$R \geq 0.9, \tau \leq 0.03$	2978 (0.74%)	2815 (0.7%)
C	Mercedes	$R \leq 0.4, \tau \geq 0.25$	192 (0.048%)	117 (0.029%)

A continuación usamos las herramientas de visualización del software de ALICE para ver a detalle la topología de los eventos.



Visualización de los eventos...  
 Confirmación de nuestras suposiciones  
 sobre los eventos seleccionados en cada  
 región!!!

# Estudios de correlaciones acimutales a $\sqrt{s} = 200 \text{ GeV}$ usando ESA.

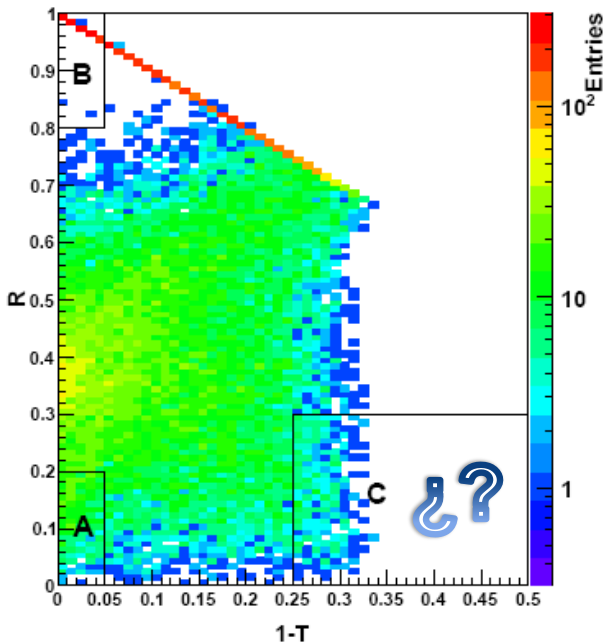
(A. Ayala, E. Cuautle, I. Domínguez, A. Ortiz y G. Paic)

Es interesante hacer correlaciones acimutales en momento transverso dado que la estructura de doble cresta en el “away side” ha sido observada en RHIC ( $\sqrt{S}=200$  GeV) en colisiones entre iones pesados usando correlaciones acimutales de dos partículas. Sin embargo usando el procedimiento análogo en el caso de colisiones p-p, se reporta que esa estructura es inexistente.

A. Adare *et al.*, (PHENIX Collaboration), *Phys. Rev. C* **78**, 014901 (2008).

Wang F. *et al.*, (STAR Collaboration), *Nucl. Phys. A* **774**, 129 (2006).

Es interesante hacer correlaciones acimutales en momento transverso dado que la estructura de doble cresta en el “away side” ha sido observada en RHIC ( $\sqrt{s}=200$  GeV) en colisiones entre iones pesados usando correlaciones acimutales de dos partículas. Sin embargo usando el procedimiento análogo en el caso de colisiones p-p, se reporta que esa estructura es inexistente.



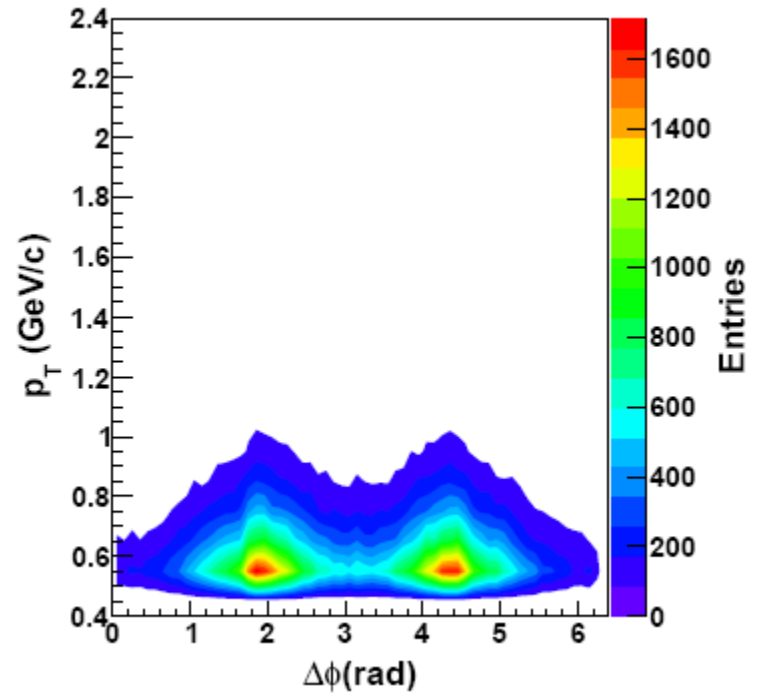
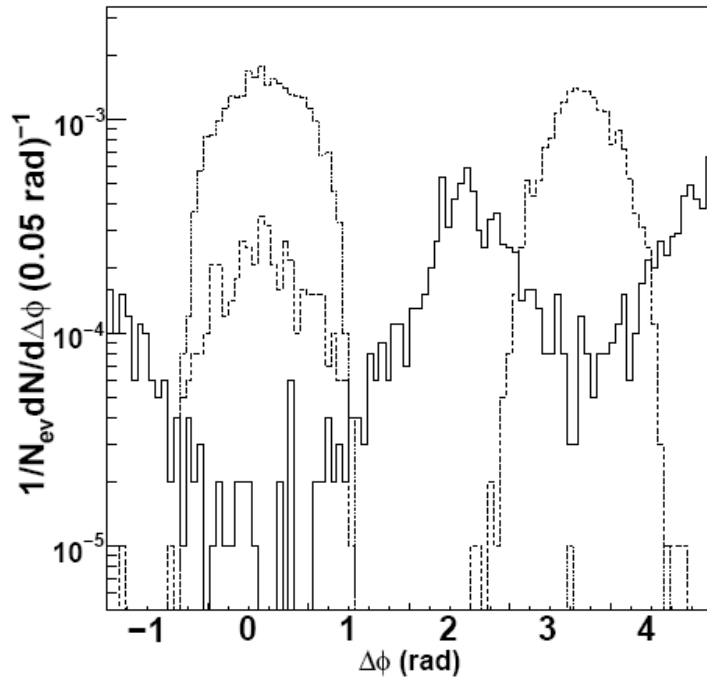
A. Adare *et al.*, (PHENIX Collaboration), Phys. Rev. C **78**, 014901 (2008).

Wang F. *et al.*, (STAR Collaboration), Nucl. Phys. A **774**, 129 (2006).

¿Es realmente inexistente la estructura de doble cresta en el “away side” en colisiones p-p a  $\sqrt{s}=200$  GeV?

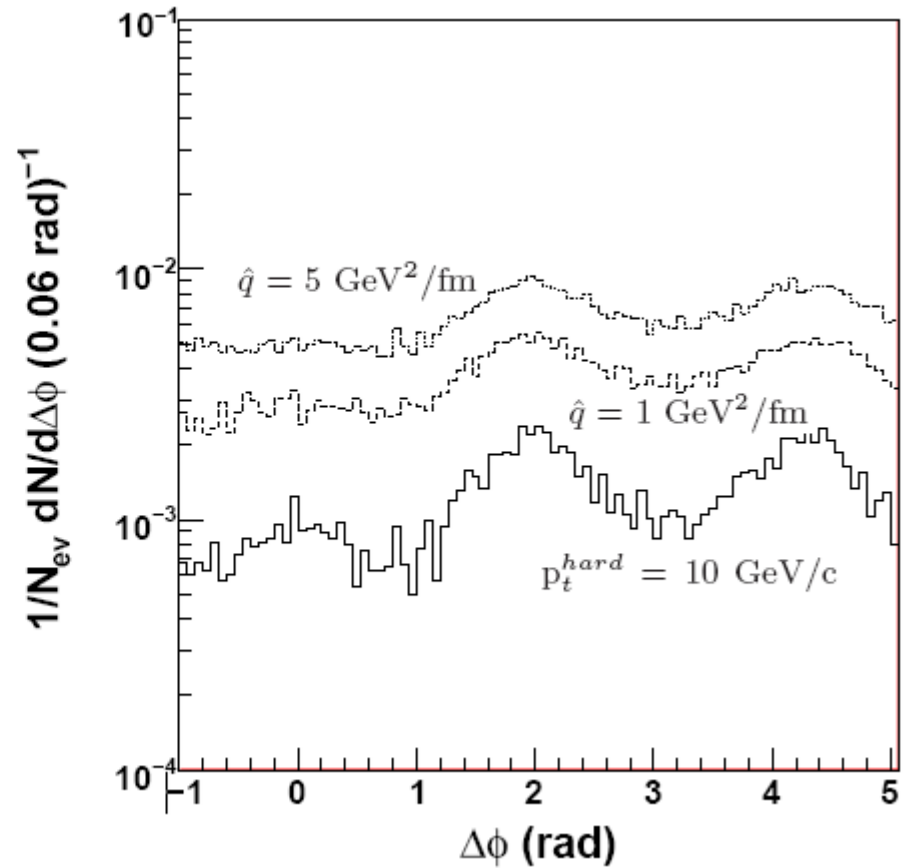
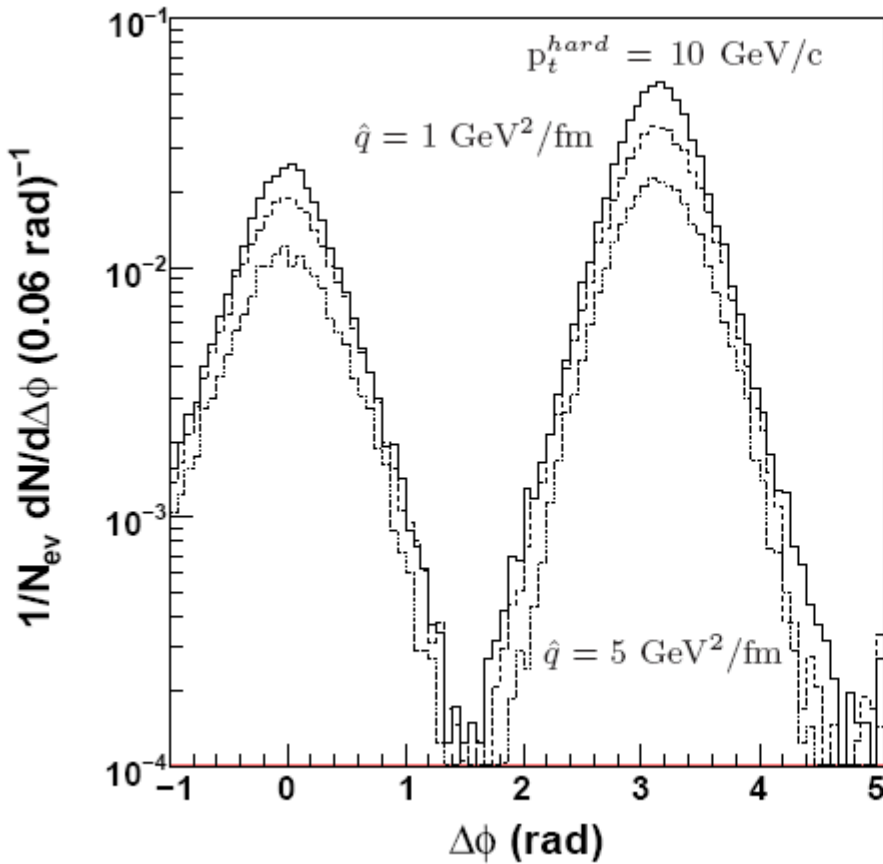
Para responder esta pregunta aplicamos ESA a simulaciones minimum-bias de colisiones p-p a dicha energía en centro de masa. Se utilizó el generador de eventos Pythia.

arXiv:hep-ph /0902.0074



La respuesta es SI!!! Para entender más sobre el origen de los eventos de tres jets utilizamos un software (Q-Pythia) que nos permite simular la pérdida de energía de los partones a través de la inducción de radiación de gluones al medio.

Investigando la posible influencia del medio...



# Conclusiones

- ✓ Hemos desarrollado un método (ESA) que nos permite hacer discriminación de eventos con diferentes topologías de jets: di-jet, mono-jet, mercedes.
- ✓ De acuerdo con estos resultados, ESA podría ser utilizado para hacer los primeros estudios p-p (10 TeV) en ALICE, pues este análisis fue hecho con 400 000 eventos MB.
- ✓ La sensibilidad de ESA respecto a la estructura de los eventos en el plano transversal nos ha permitido hacer estudios a 200 GeV (RHIC) y demostrar que la estructura de tres de doble cresta en la región “away” se preserva en p-p y esta asociada con la emisión de dos jets en la dirección “backward”.