



# Propiedades de fragmentación de jets en colisiones hadrónicas

Hermes León Vargas  
Instituto de Física, UNAM

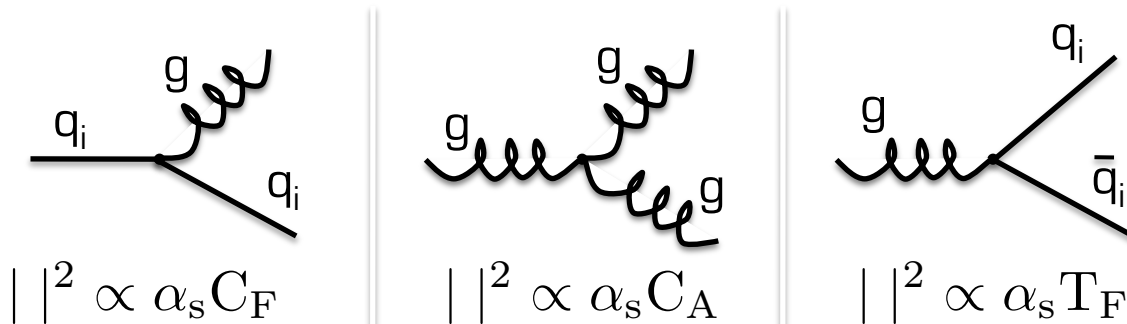
Febrero 8, 2013 BUAP

# Jets en colisiones de hadrones

Jet: Grupo colimado de partículas producidas por la hadronización de partones

$\left\{ \begin{array}{l} \text{Quarks} \\ \text{Gluones} \end{array} \right.$

QCD predice diferentes propiedades para los jets iniciados por quarks y gluones



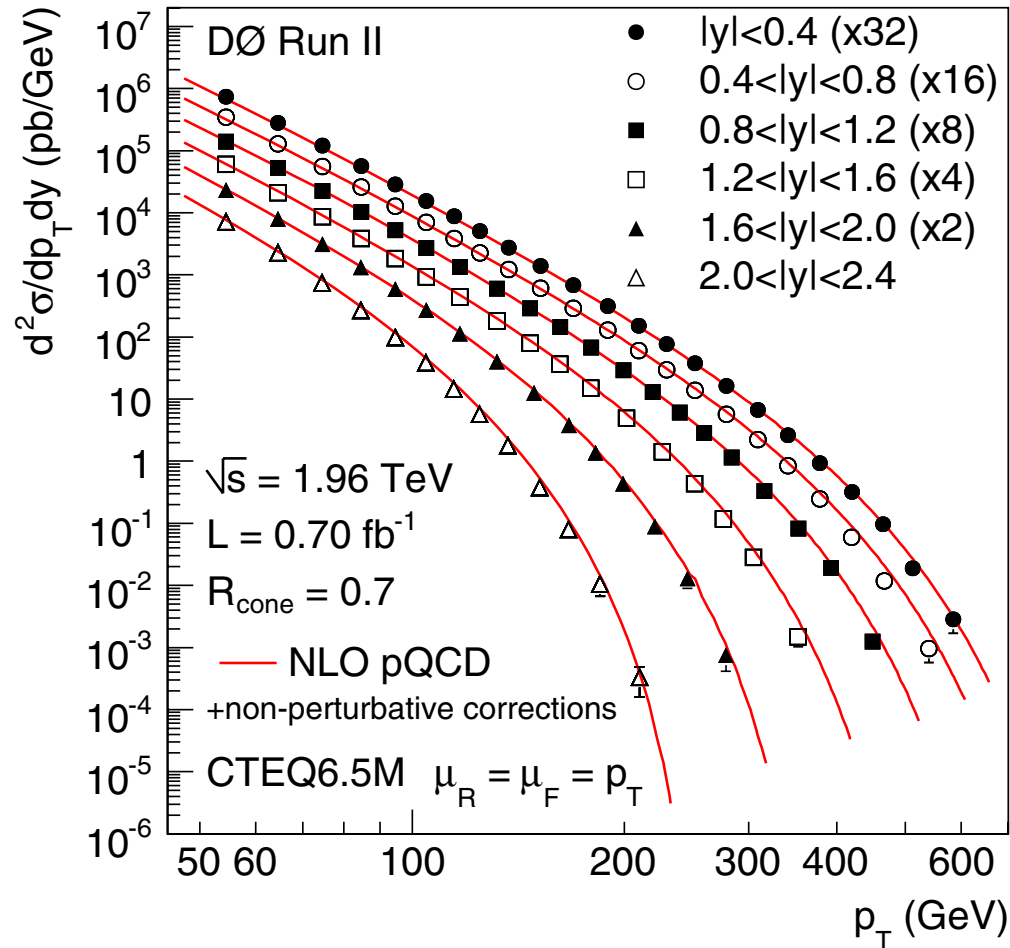
$$C_F = 4/3$$

$$C_A = 3$$

$$T_F = 1/2$$

$$C_A/C_F \sim 2$$

# Jets y predicciones de pQCD



$$p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$$

Para jets sin masa

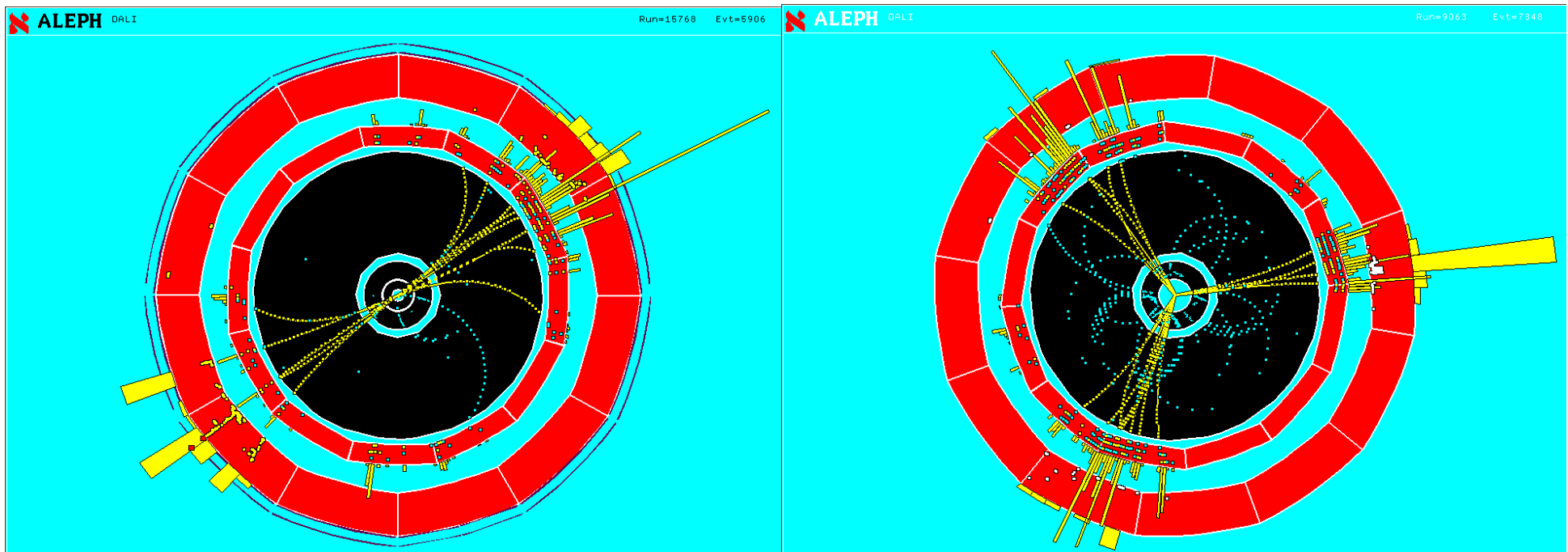
$$\eta = y$$

$$\eta = -\ln \tan \left( \frac{\theta}{2} \right)$$

Excelente coincidencia entre la predicción teórica (pQCD)  
y el experimento

# Jets en colisiones $e^+e^-$

Las colisiones electron-positron proveen la evidencia experimental del portador de la fuerza fuerte: el gluón

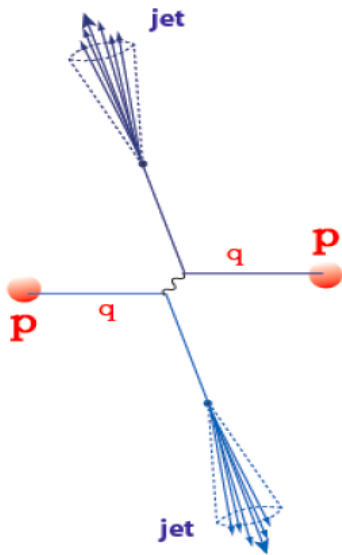


$$e^+ + e^- \rightarrow Z \rightarrow q + \bar{q}$$

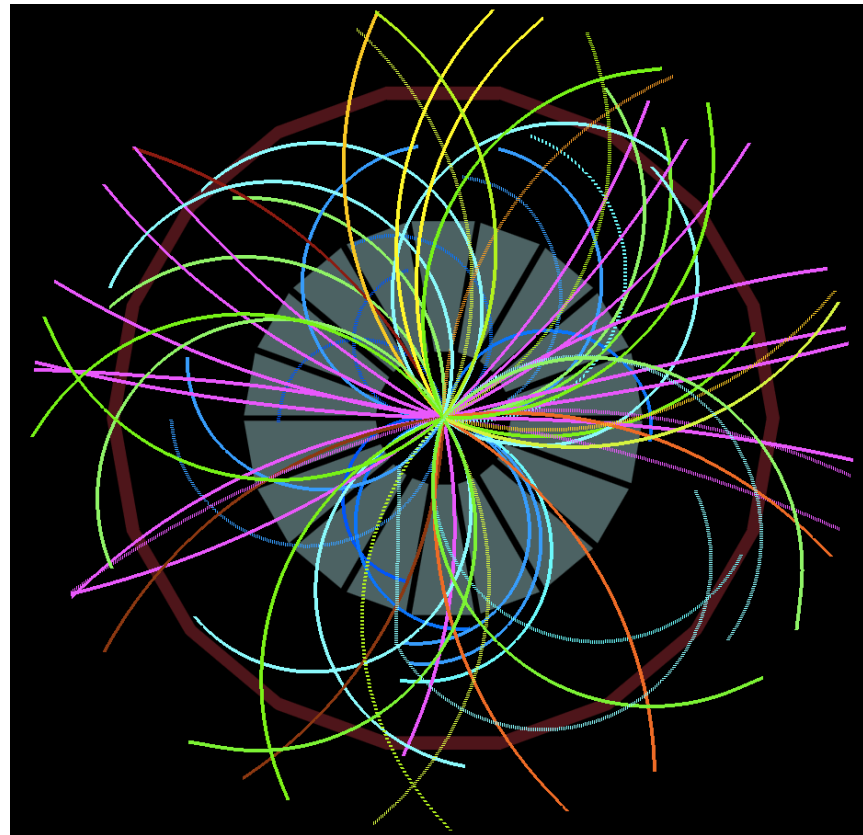
$$e^+ + e^- \rightarrow Z \rightarrow q + \bar{q} + g$$

# Jets en colisiones de hadrones

Los jets producidos en colisiones hadronicas son causados por la dispersión fuerte de los partones que forman a los hadrones



Dispersiones  $\left\{ \begin{array}{l} q + q \\ g + g \\ q + \bar{q} \\ q + g \end{array} \right.$



Colisión de objetos compuestos  $\longrightarrow$  estructura de eventos compleja

# Identificación de jets con conos

Los jets son círculos en el espacio  $\eta$ - $\phi$  ( $\eta = -\ln \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)$ )

centrados alrededor del eje del jet ( $\eta^{\text{Jet}}, \phi^{\text{Jet}}$ ) con radio  $R = \sqrt{\eta^2 + \phi^2}$

Propiedades del jet:

$$\eta^{\text{Jet}} = \frac{\sum_i \eta^i \cdot p_t^i}{p_t^{\text{Jet}}}$$

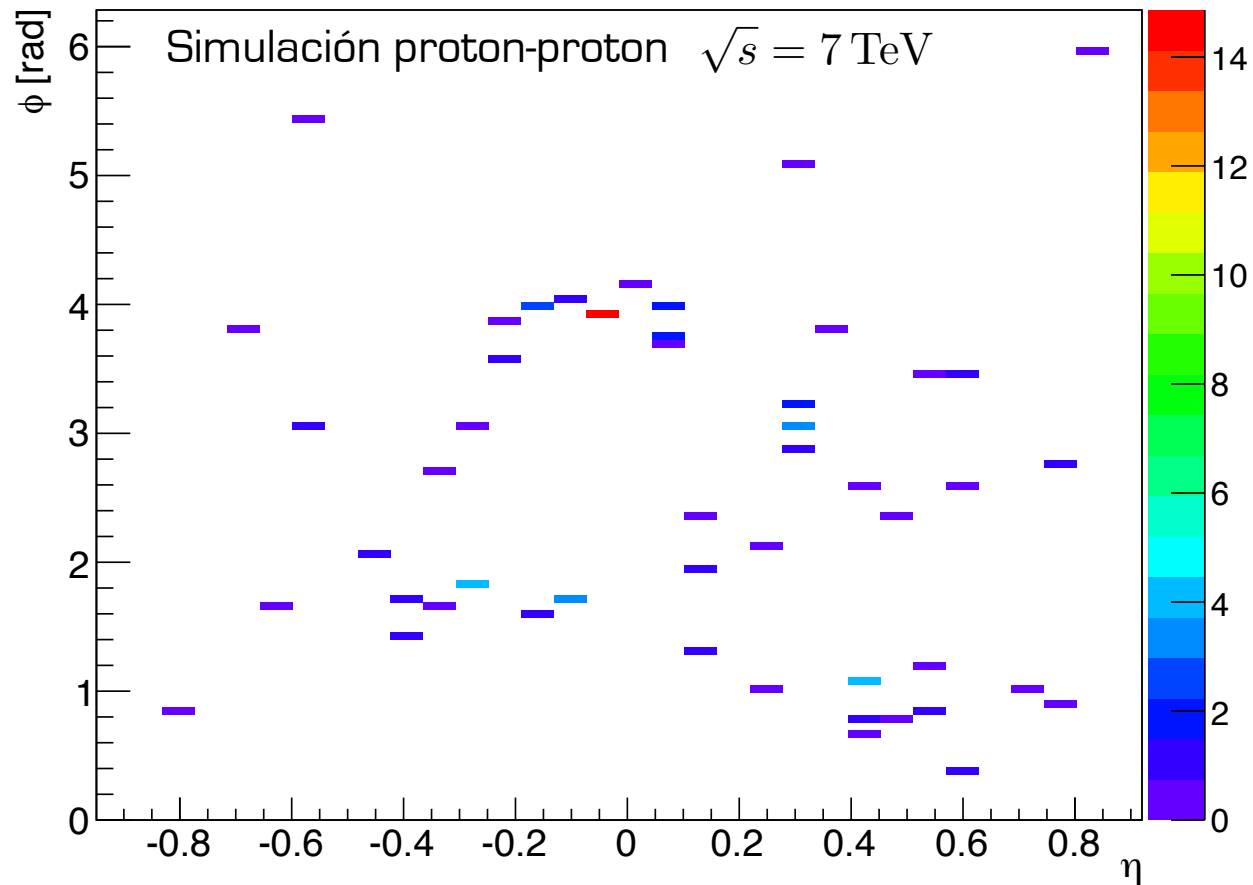
$$\phi^{\text{Jet}} = \frac{\sum_i \phi^i \cdot p_t^i}{p_t^{\text{Jet}}}$$

$$p_t^{\text{Jet}} = \sum_i p_t^i$$

con  $i \rightarrow$  trazas reconstruidas,  
celdas de calorímetro  
dentro del cono del jet

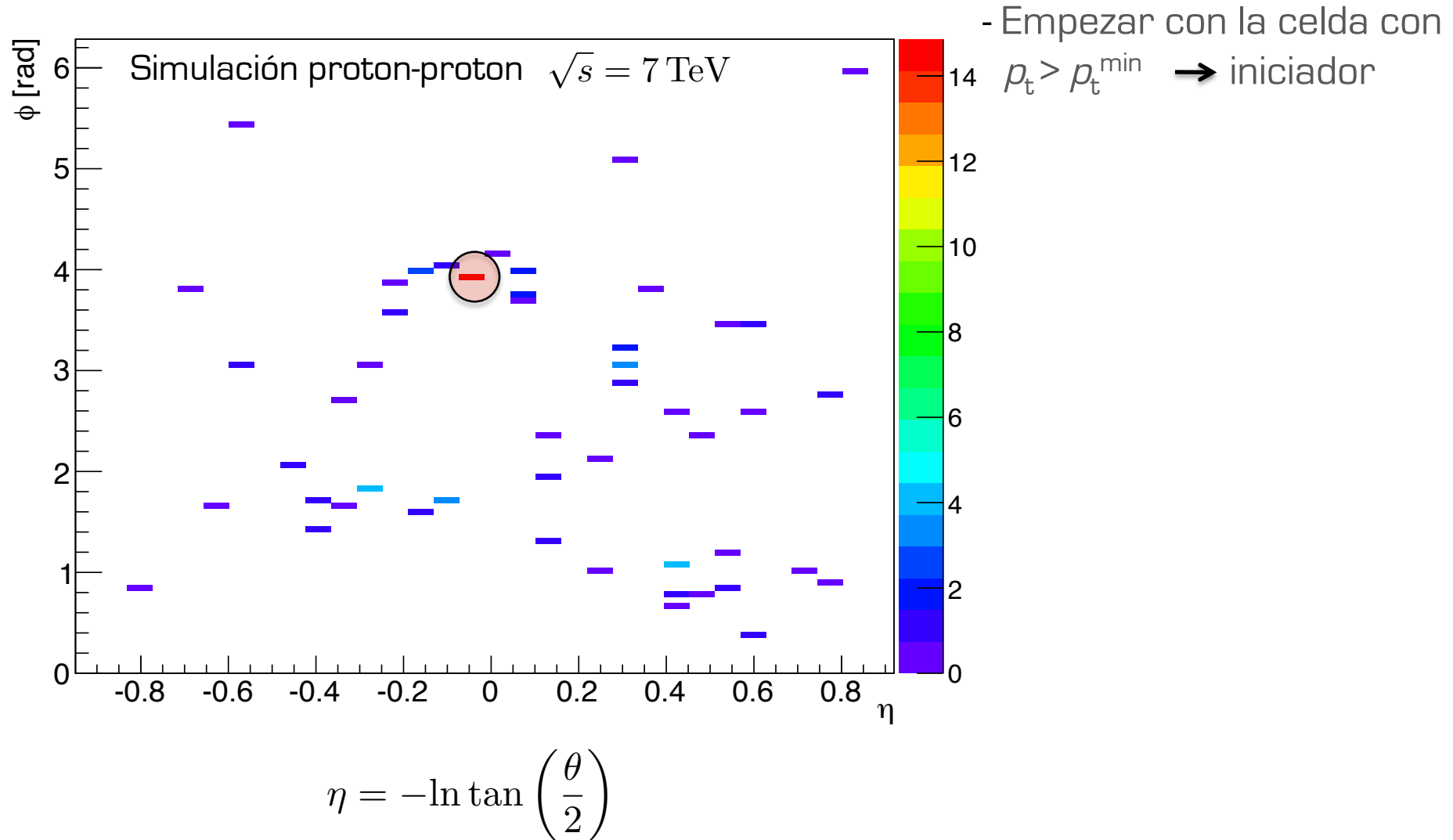
¿Cómo se identifican los jets?

# Identificación de jets con conos: uso de iniciadores



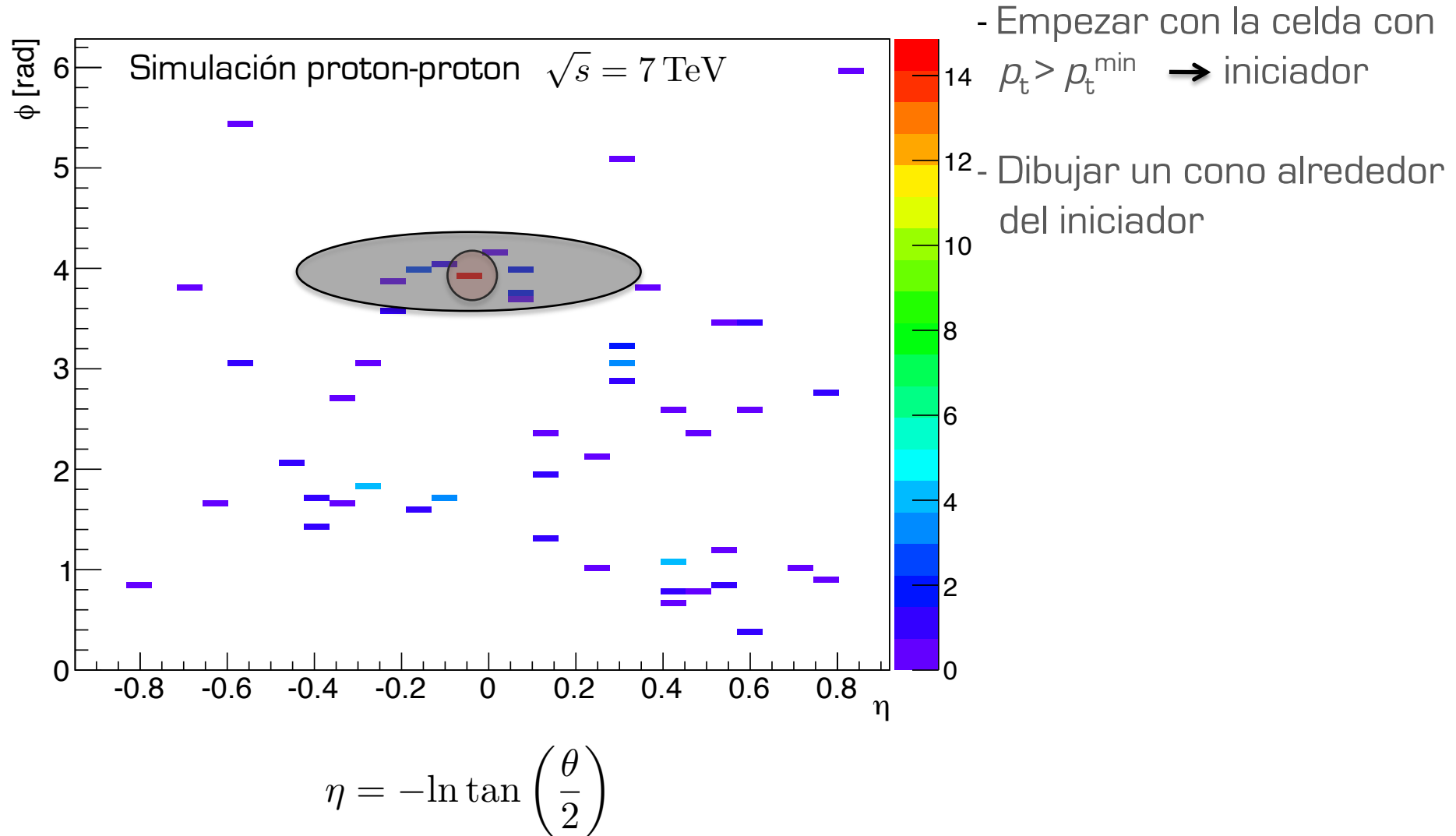
$$\eta = -\ln \tan \left( \frac{\theta}{2} \right)$$

# Identificación de jets con conos: uso de iniciadores

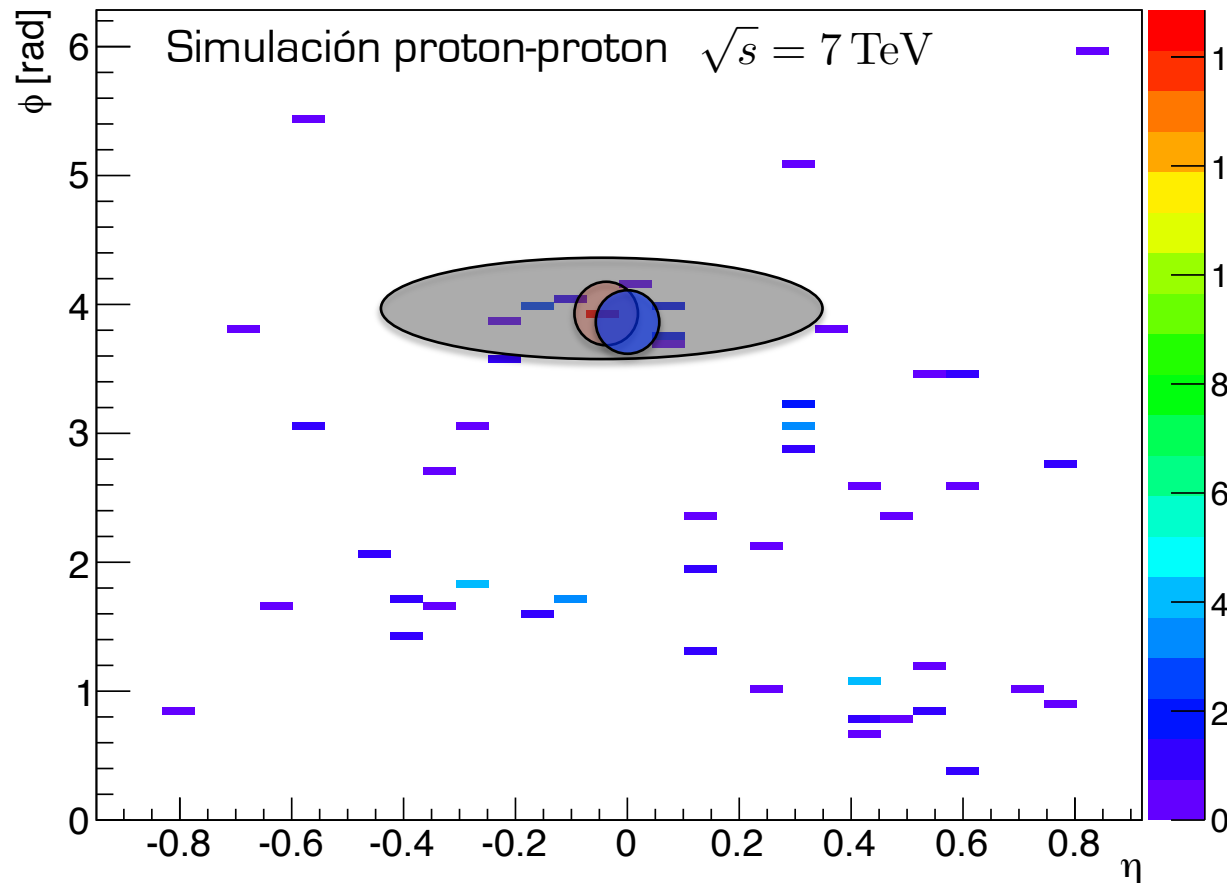




# Identificación de jets con conos: uso de iniciadores



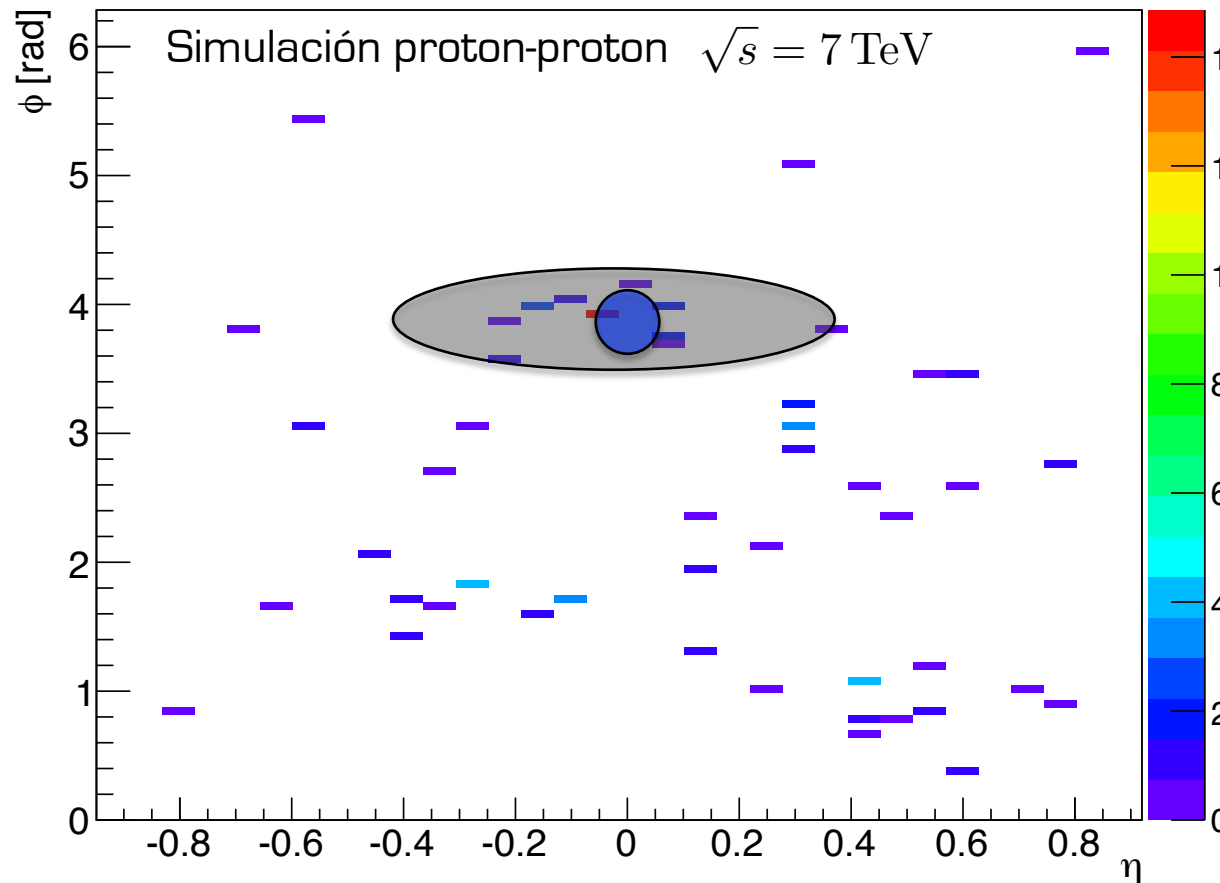
# Identificación de jets con conos: uso de iniciadores



$$\eta = -\ln \tan \left( \frac{\theta}{2} \right)$$

- Empezar con la celda con  $p_t > p_t^{\text{min}}$  → iniciador
- Dibujar un cono alrededor del iniciador
- Con base en los contenidos del cono se calcula un nuevo eje y se usa como iniciador

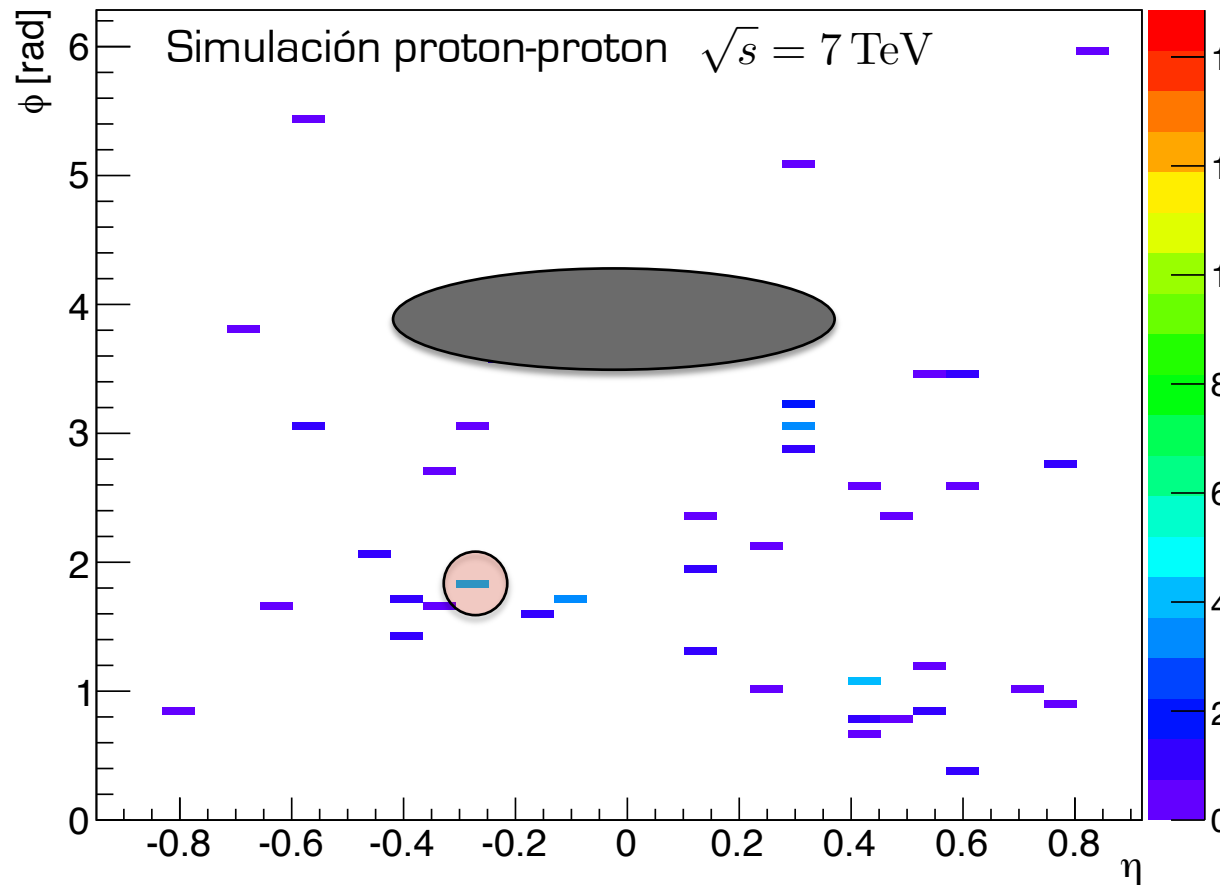
# Identificación de jets con conos: uso de iniciadores



- Empezar con la celda con  $p_t > p_t^{\text{min}}$  → iniciador
- Dibujar un cono alrededor del iniciador
- Con base en los contenidos del cono se calcula un nuevo eje y se usa como iniciador
- Repetir hasta que el eje del jet es estable

$$\eta = -\ln \tan \left( \frac{\theta}{2} \right)$$

# Identificación de jets con conos: uso de iniciadores



$$\eta = -\ln \tan \left( \frac{\theta}{2} \right)$$

- Empezar con la celda con  $p_t > p_t^{\text{min}}$  → iniciador
- Dibujar un cono alrededor del iniciador
- Con base en los contenidos del cono se calcula un nuevo eje y se usa como iniciador
- Repetir hasta que el eje del jet es estable
- Si es estable → jet, usar el siguiente iniciador
- Iterar ...

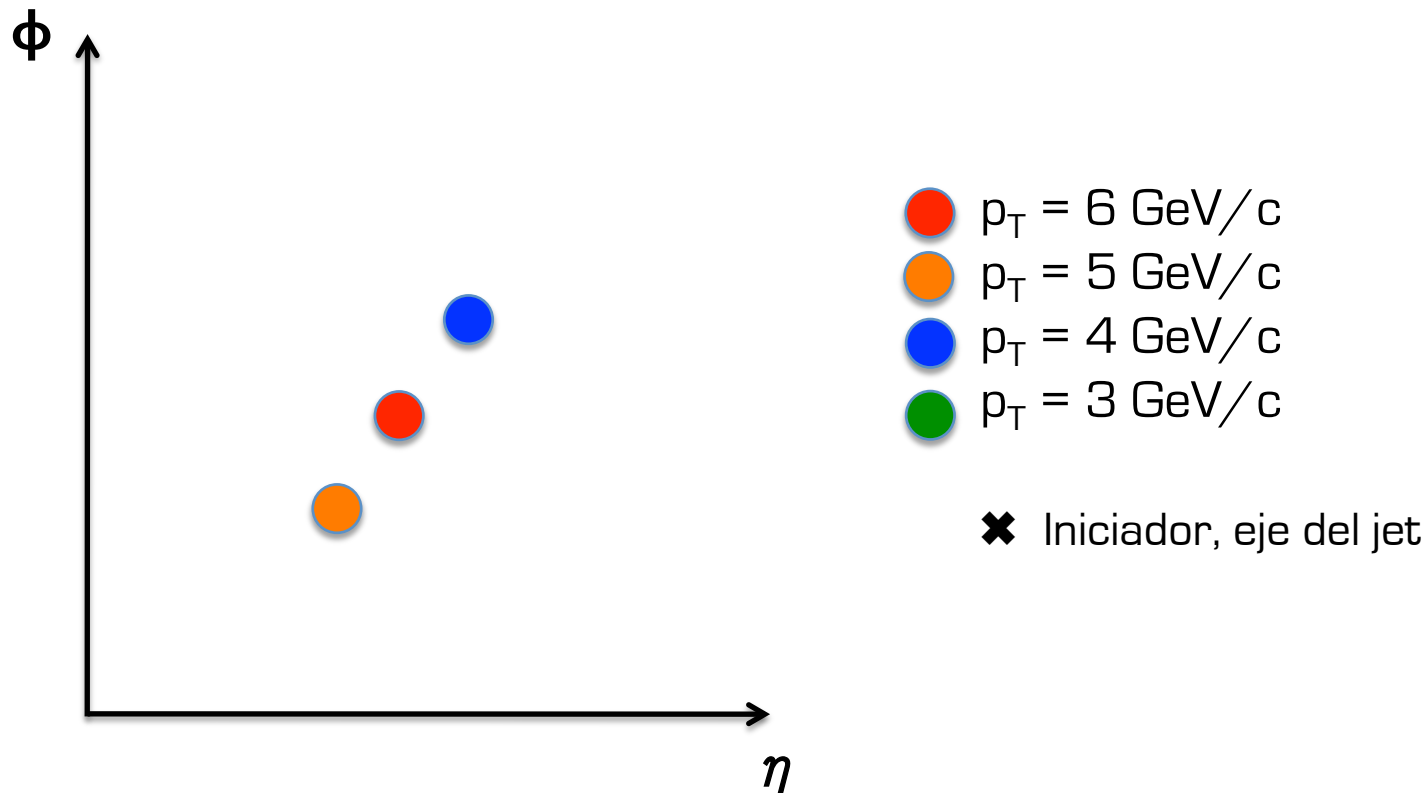
# Identificación de jets con conos: uso de iniciadores

El uso de iniciadores hace a los algoritmos más simples pero...

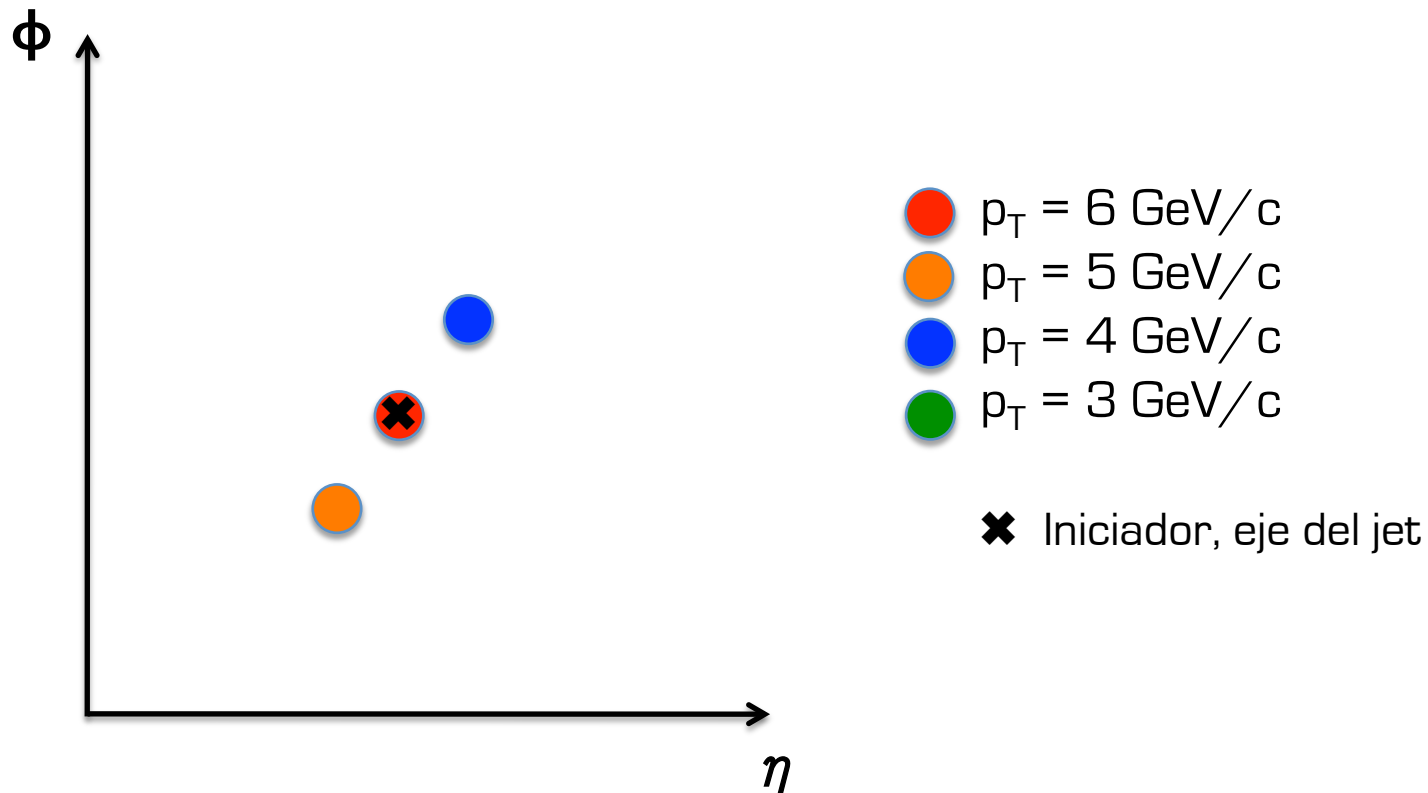
Produce problemas para comparar jets medidos en el experimento con las predicciones teóricas

Collinear e infrared safety  $\rightarrow$  la teoría produce  $\infty$

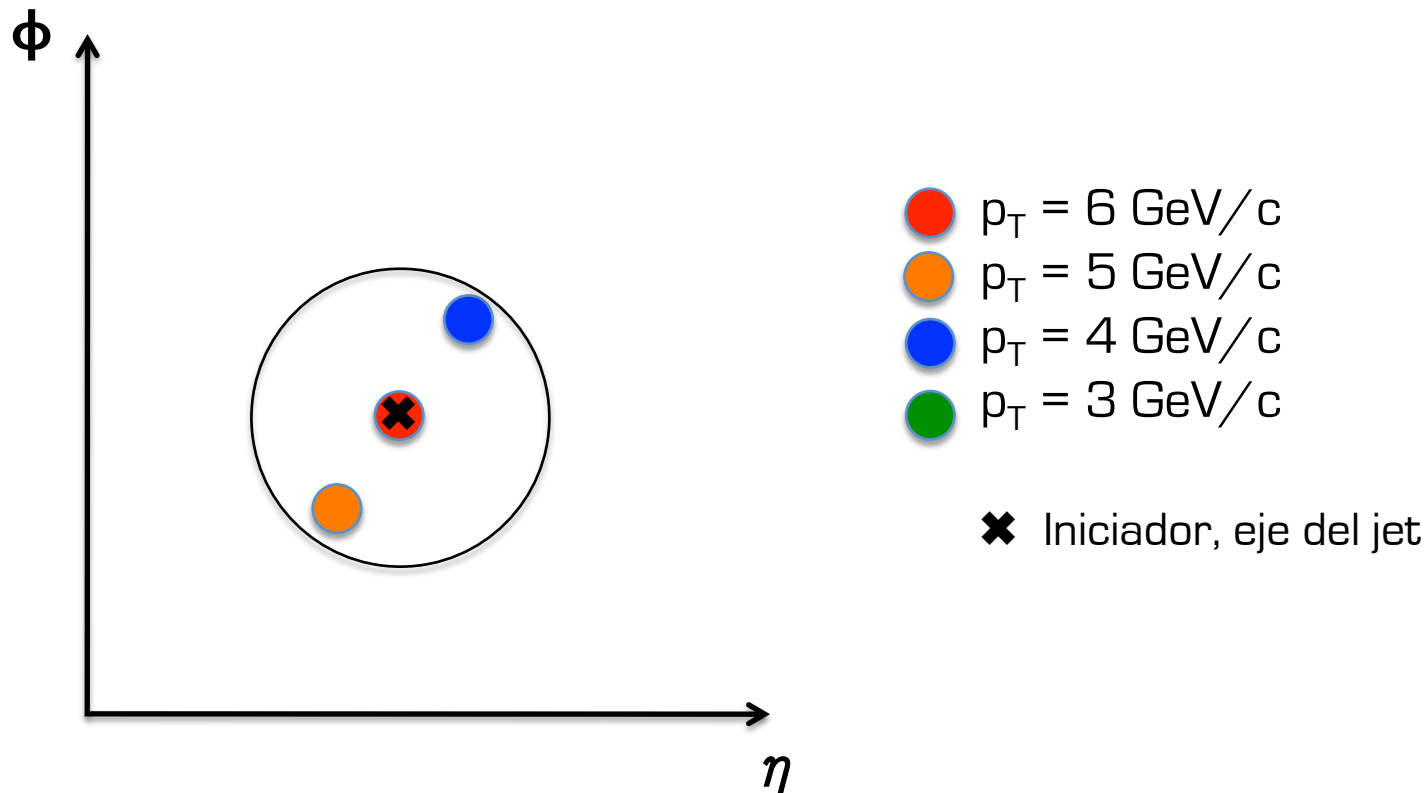
# Collinear safety



# Collinear safety

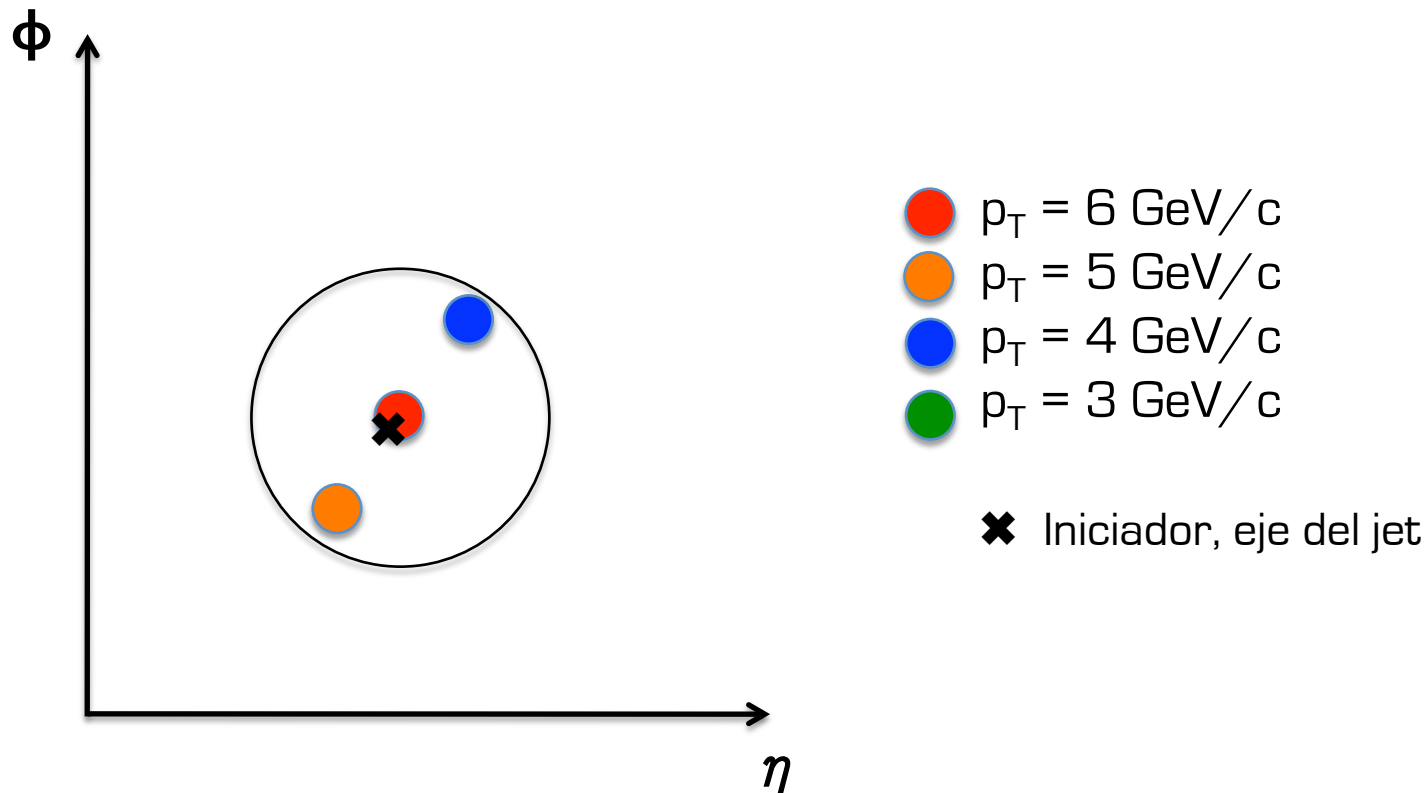


# Collinear safety

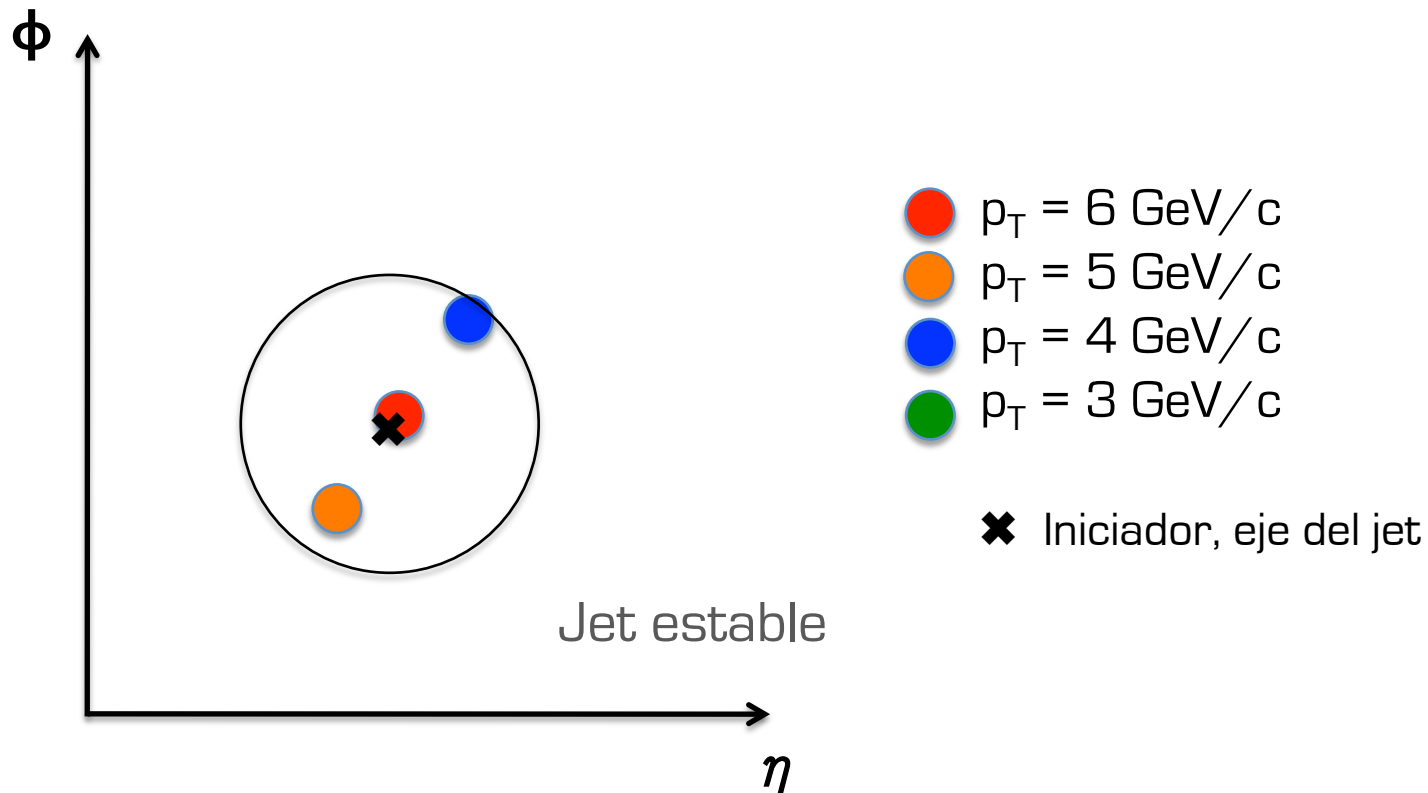




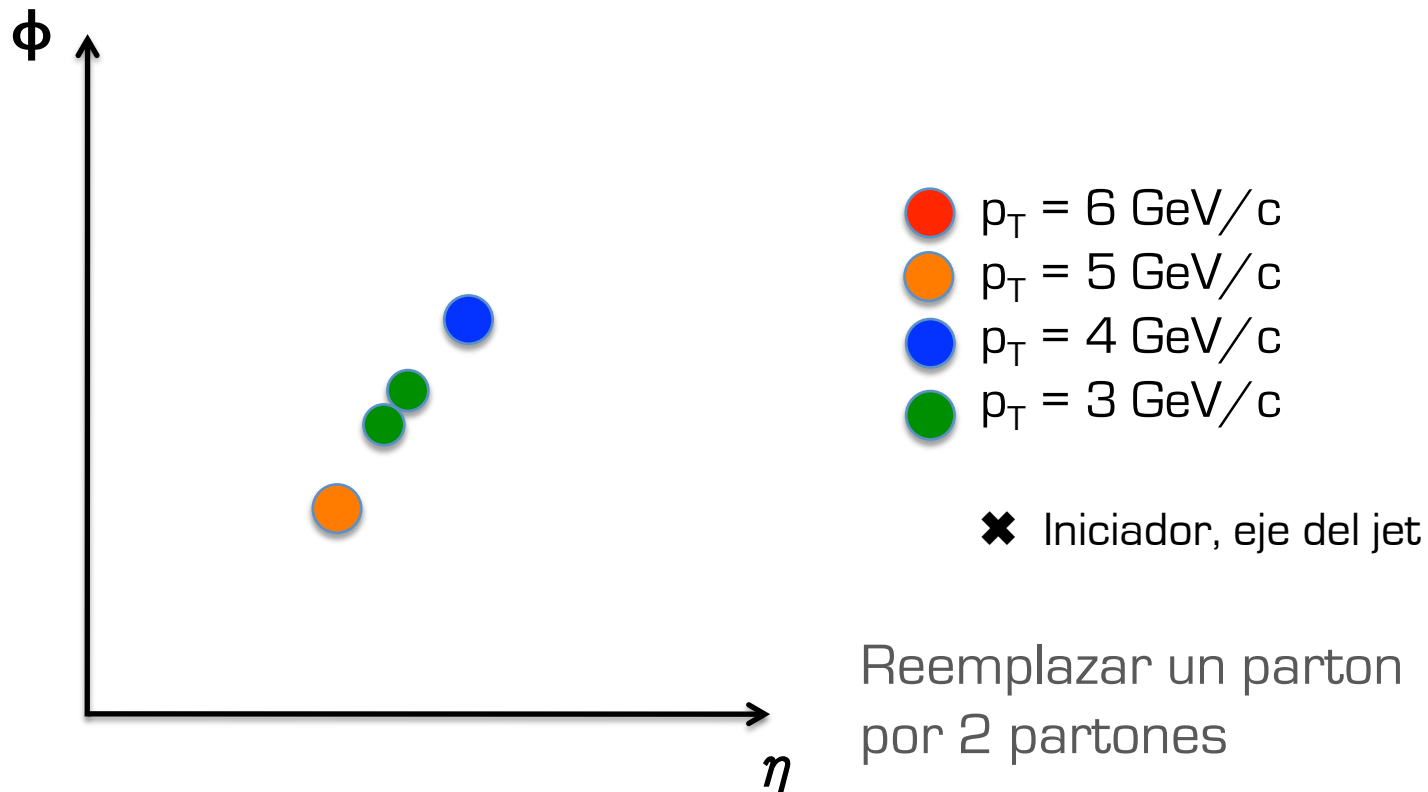
# Collinear safety



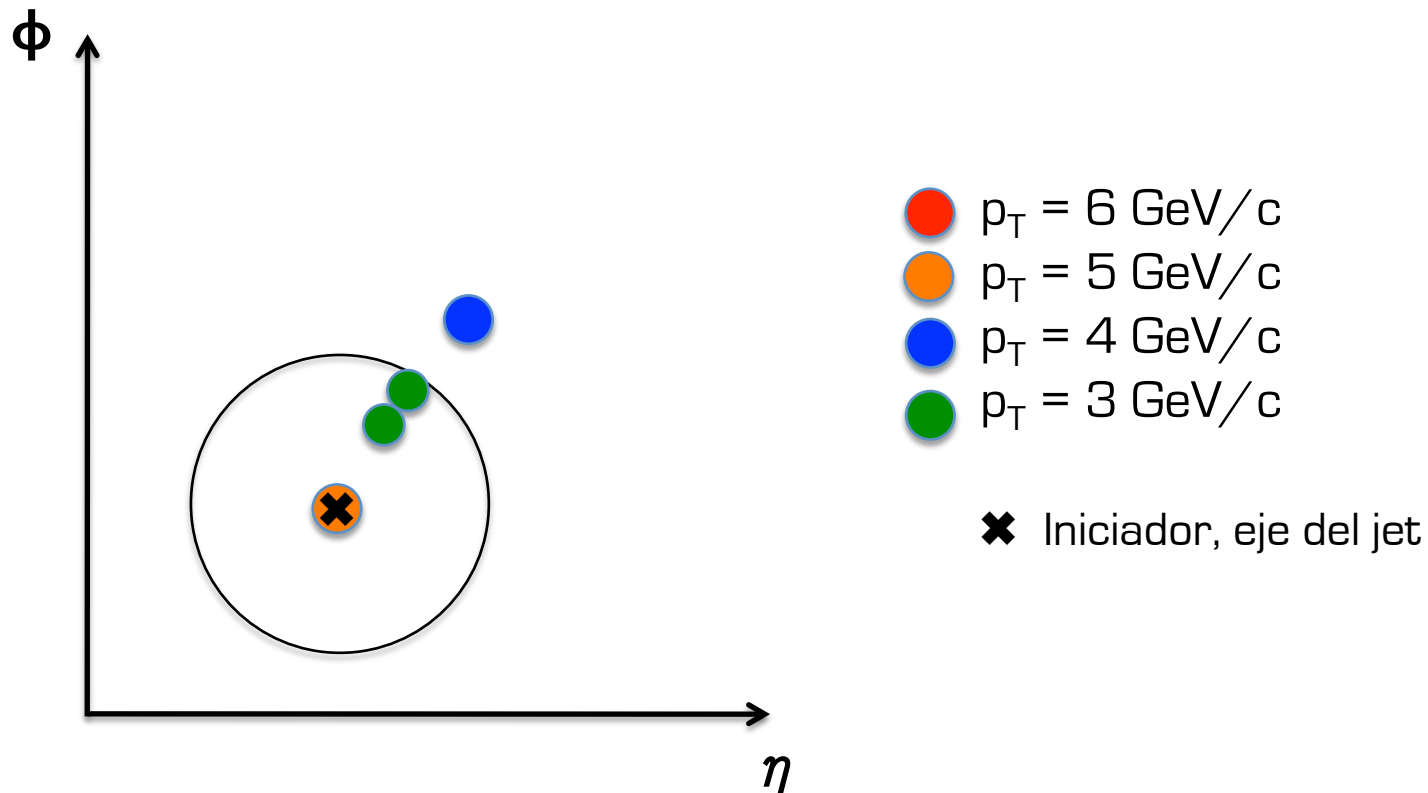
# Collinear safety



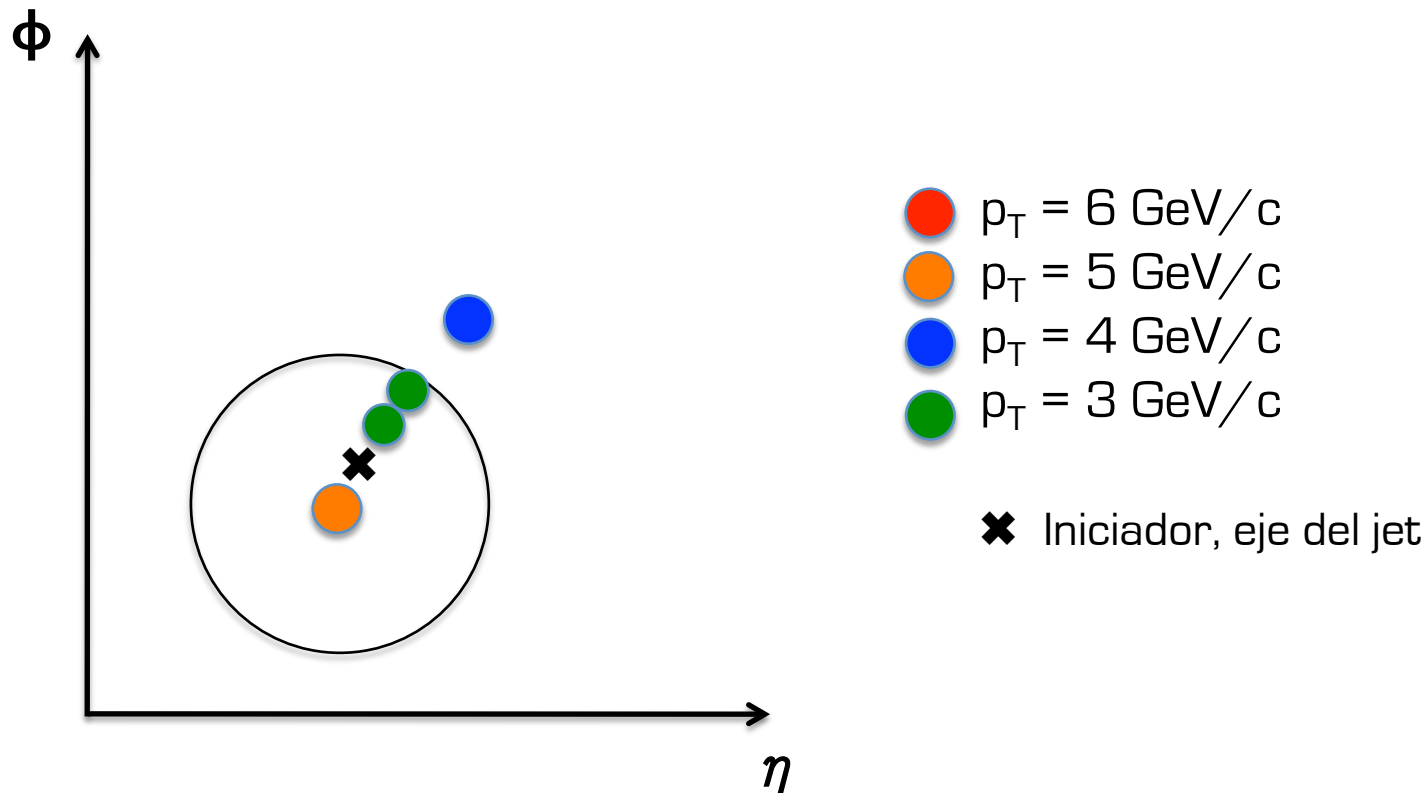
# Collinear safety



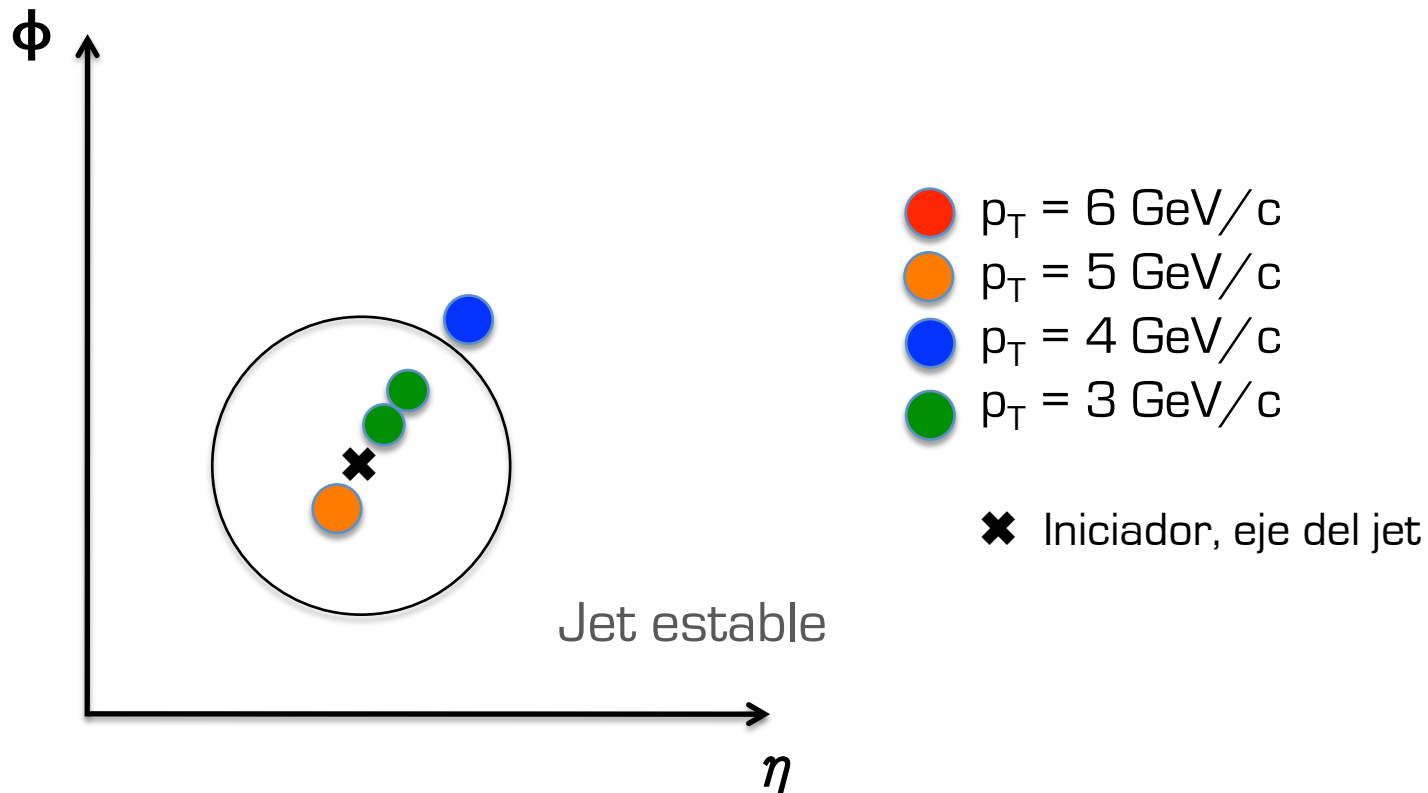
# Collinear safety



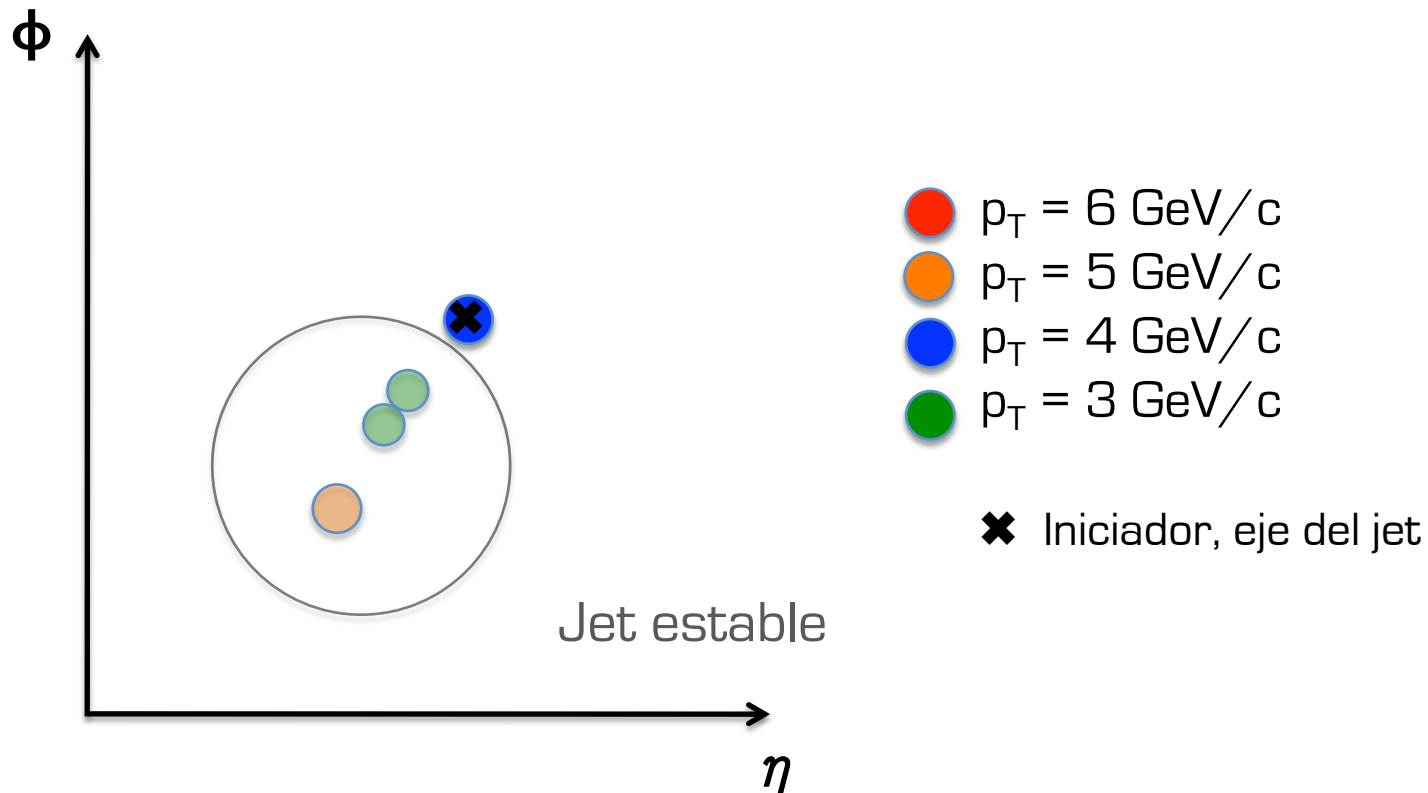
# Collinear safety



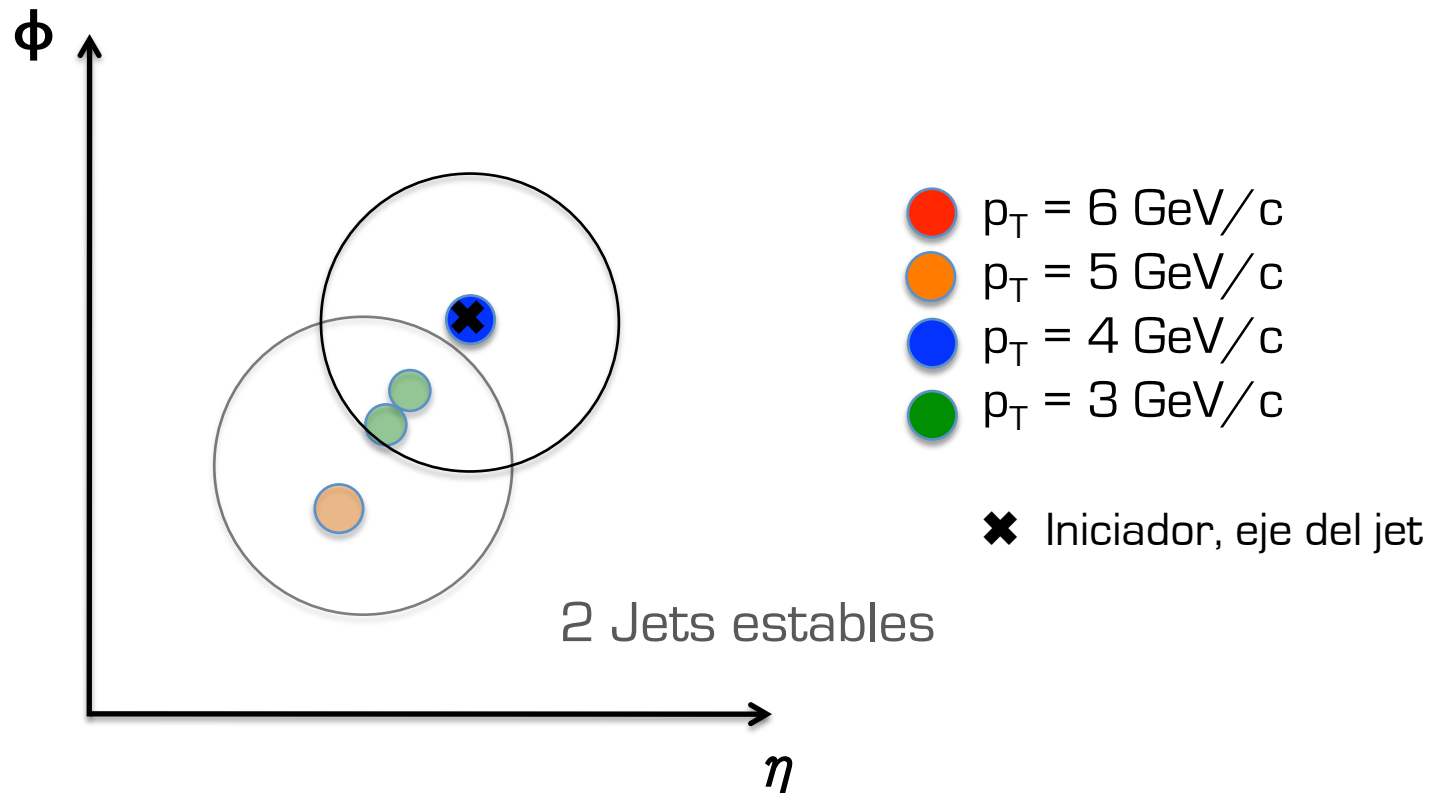
# Collinear safety



# Collinear safety



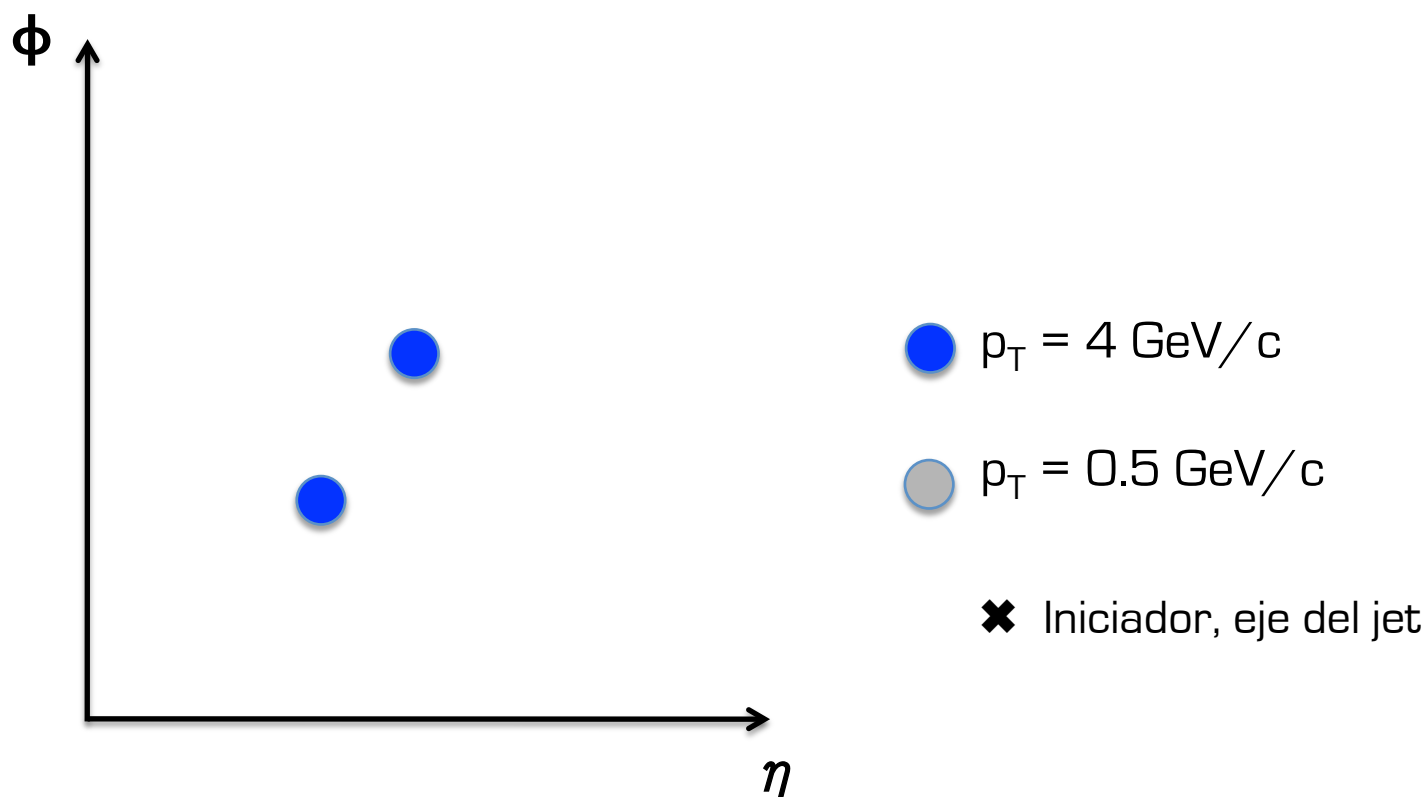
# Collinear safety



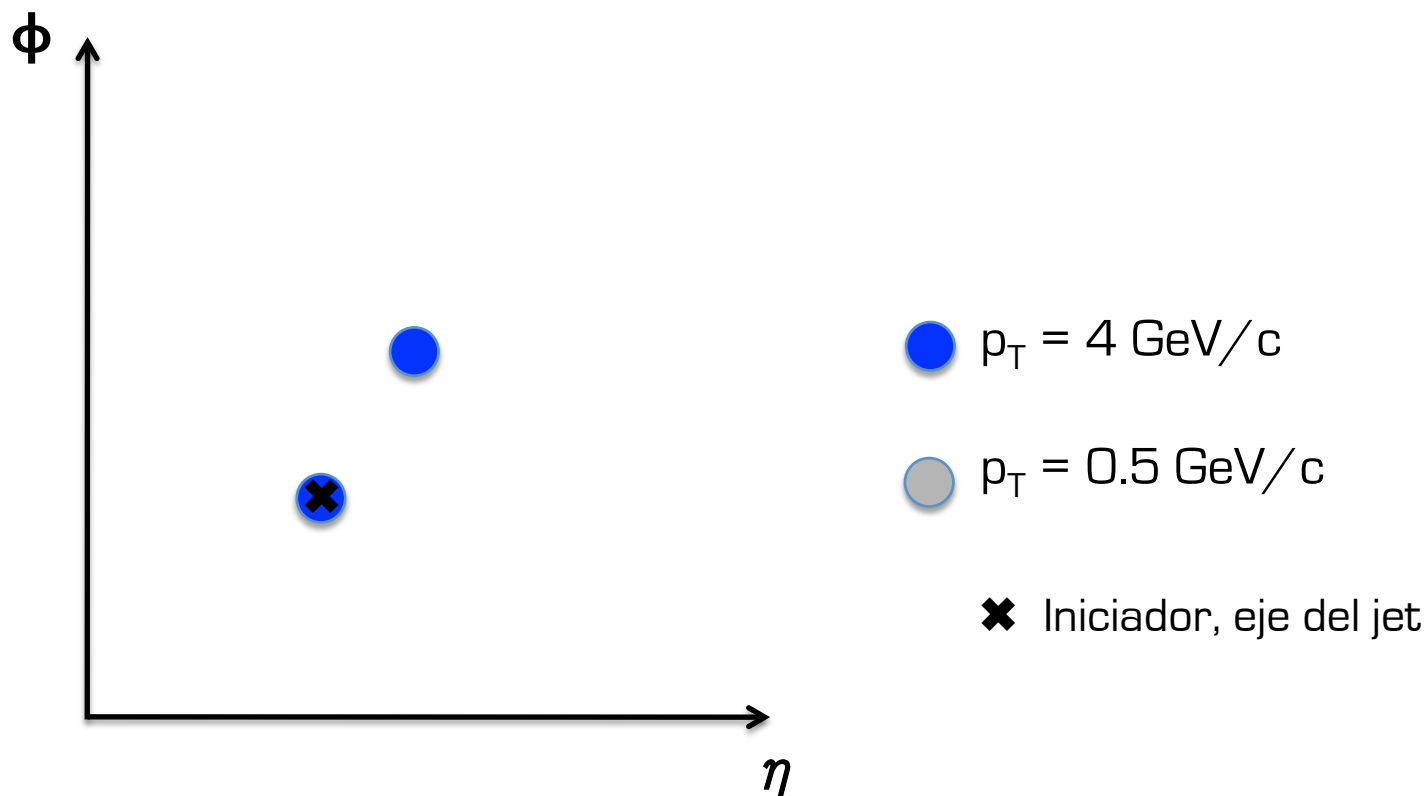
Si el algoritmo es “collinear safe” el resultado final no debe cambiar



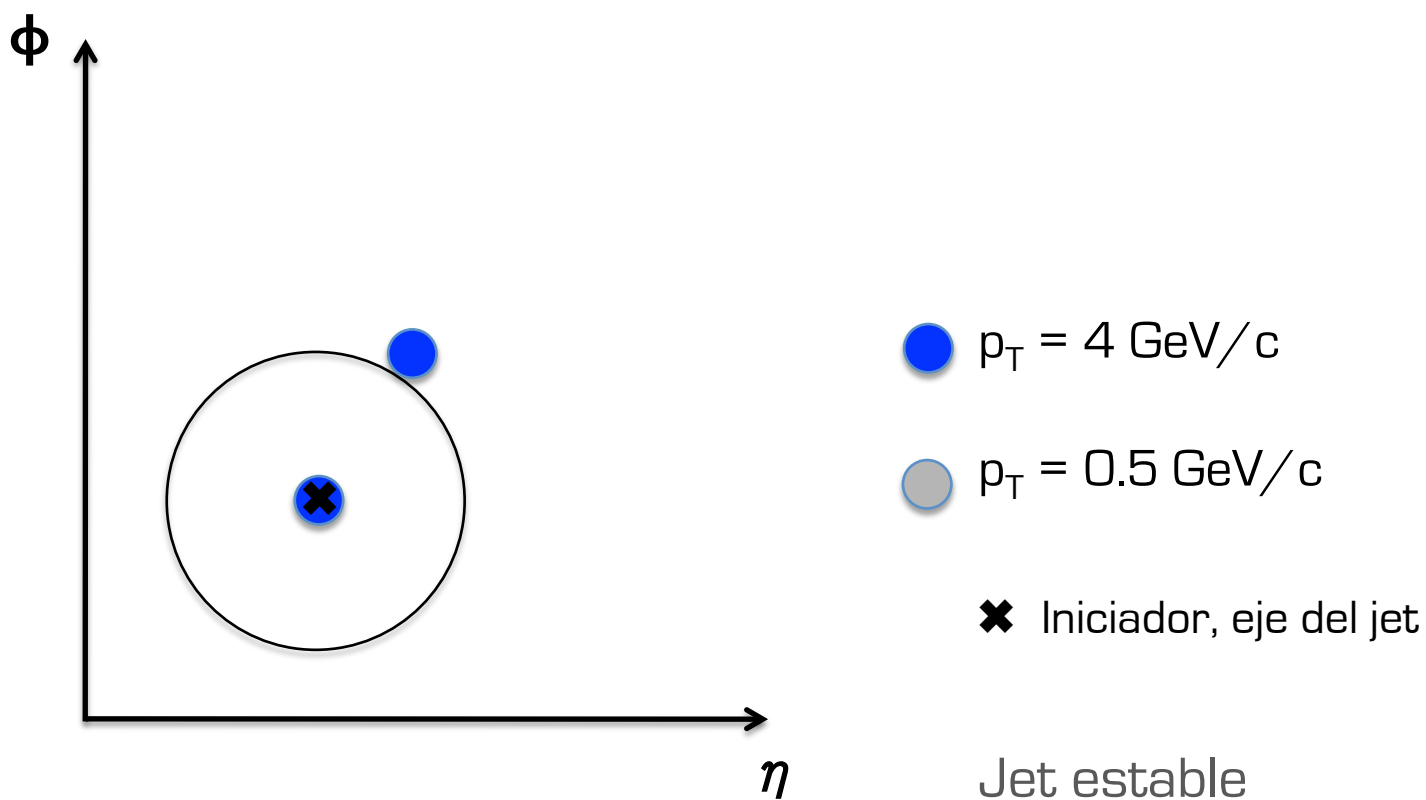
# Infrared safety



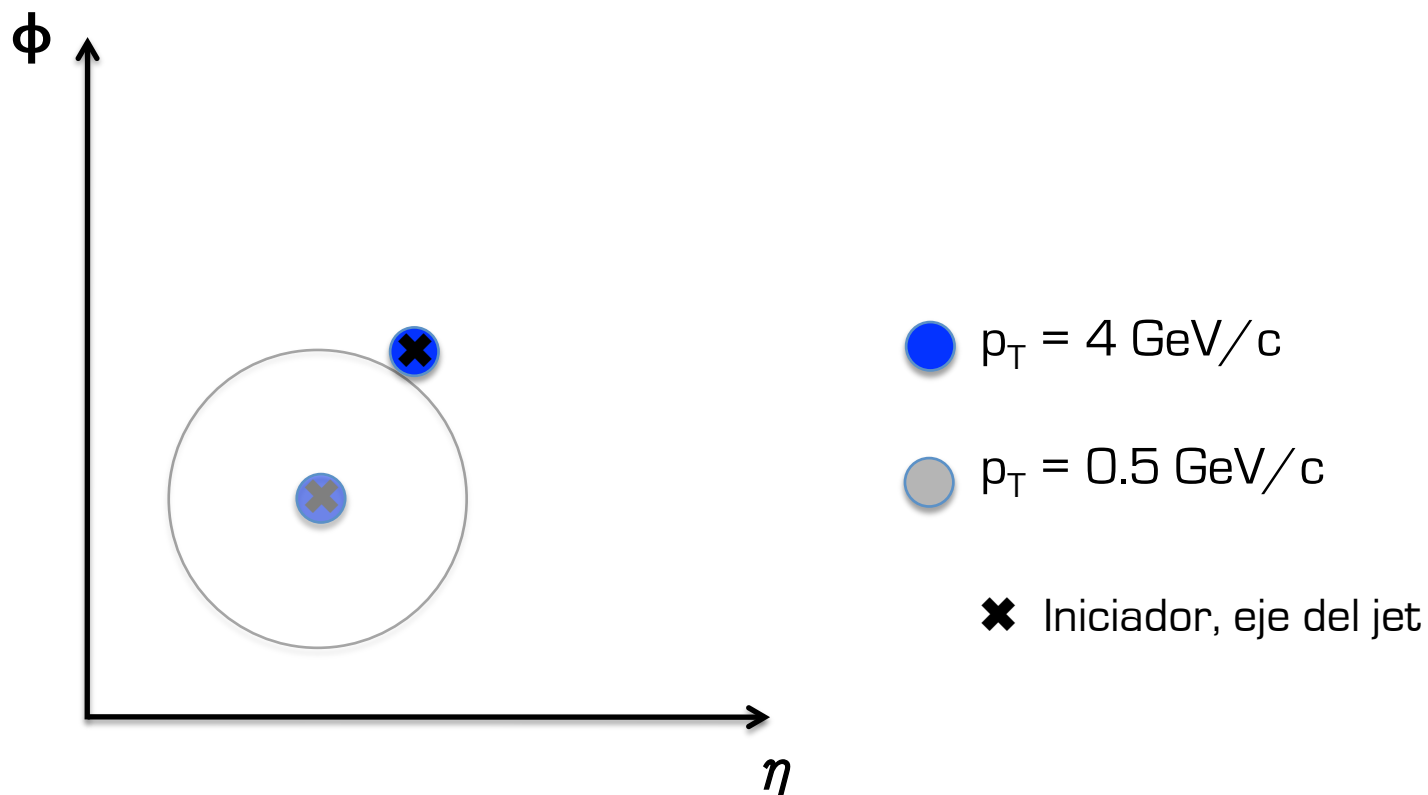
# Infrared safety



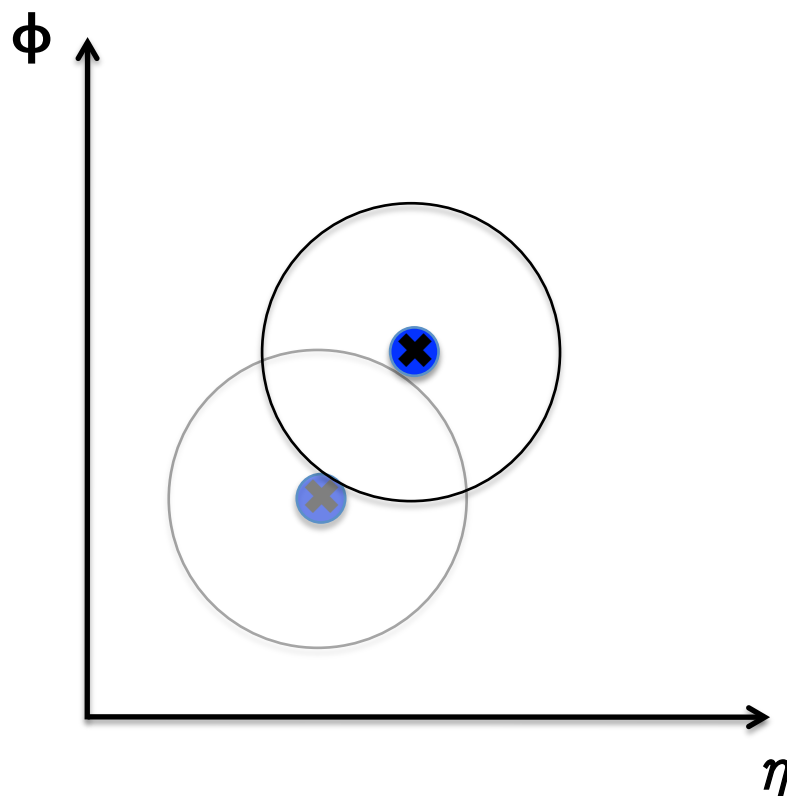
# Infrared safety



# Infrared safety



# Infrared safety



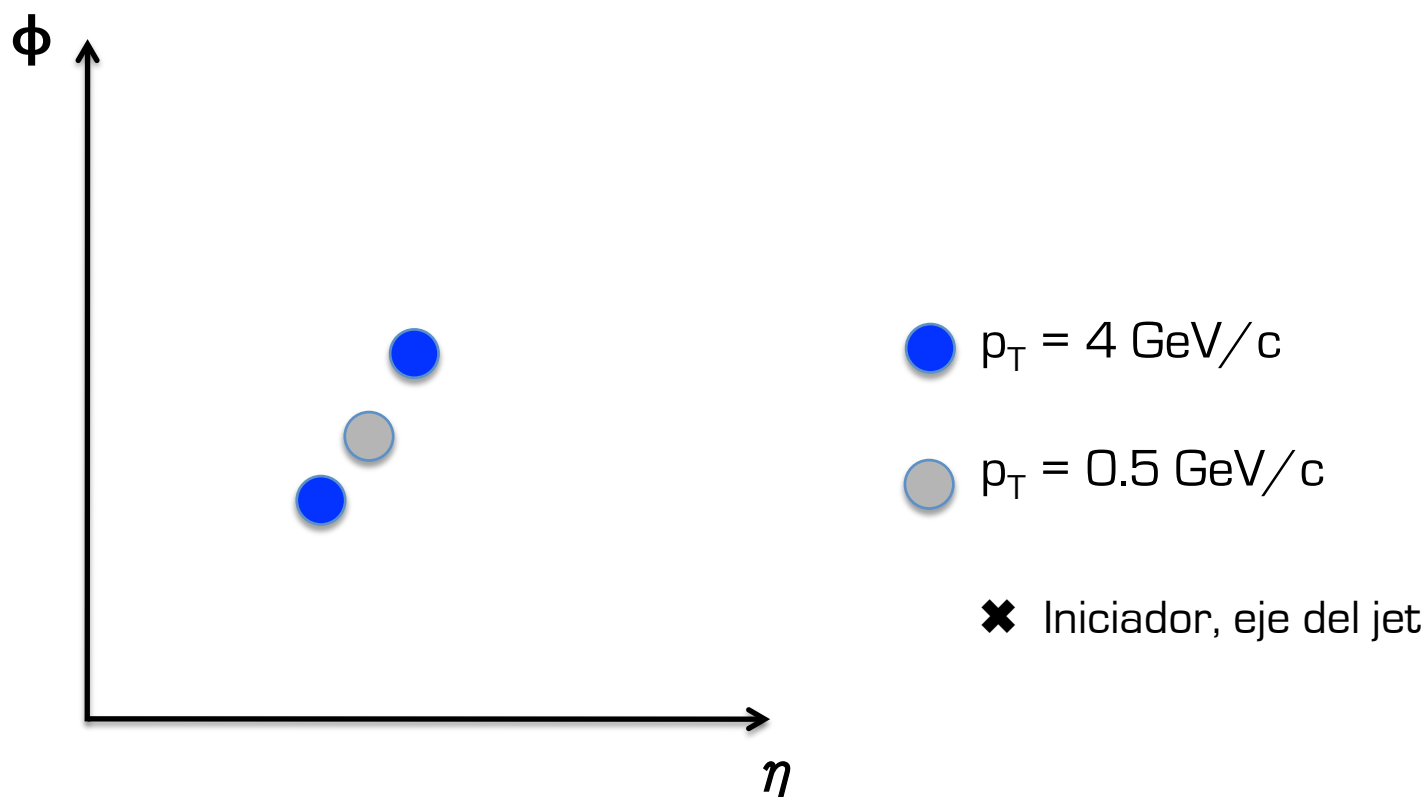
●  $p_T = 4 \text{ GeV}/c$

●  $p_T = 0.5 \text{ GeV}/c$

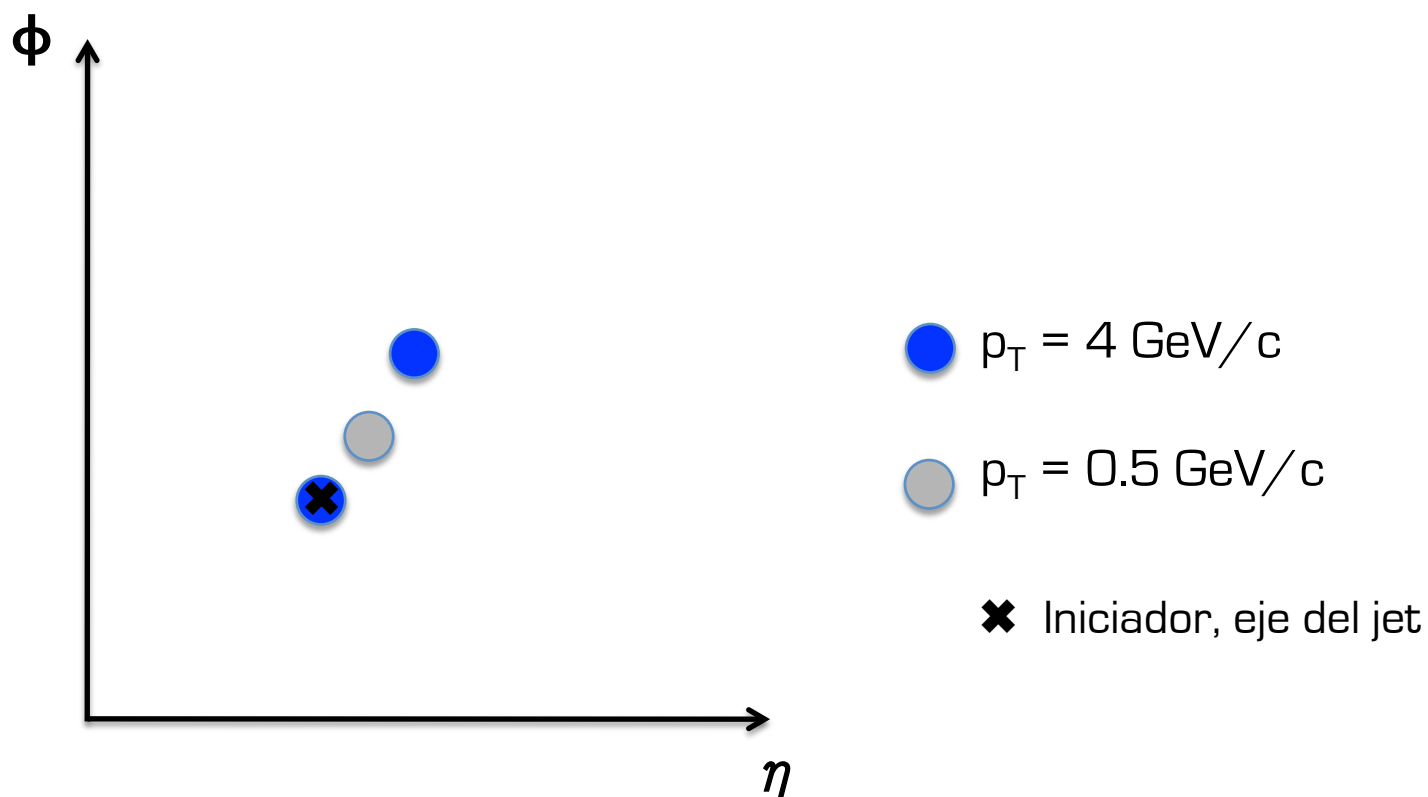
✕ Iniciador, eje del jet

2 jets estables

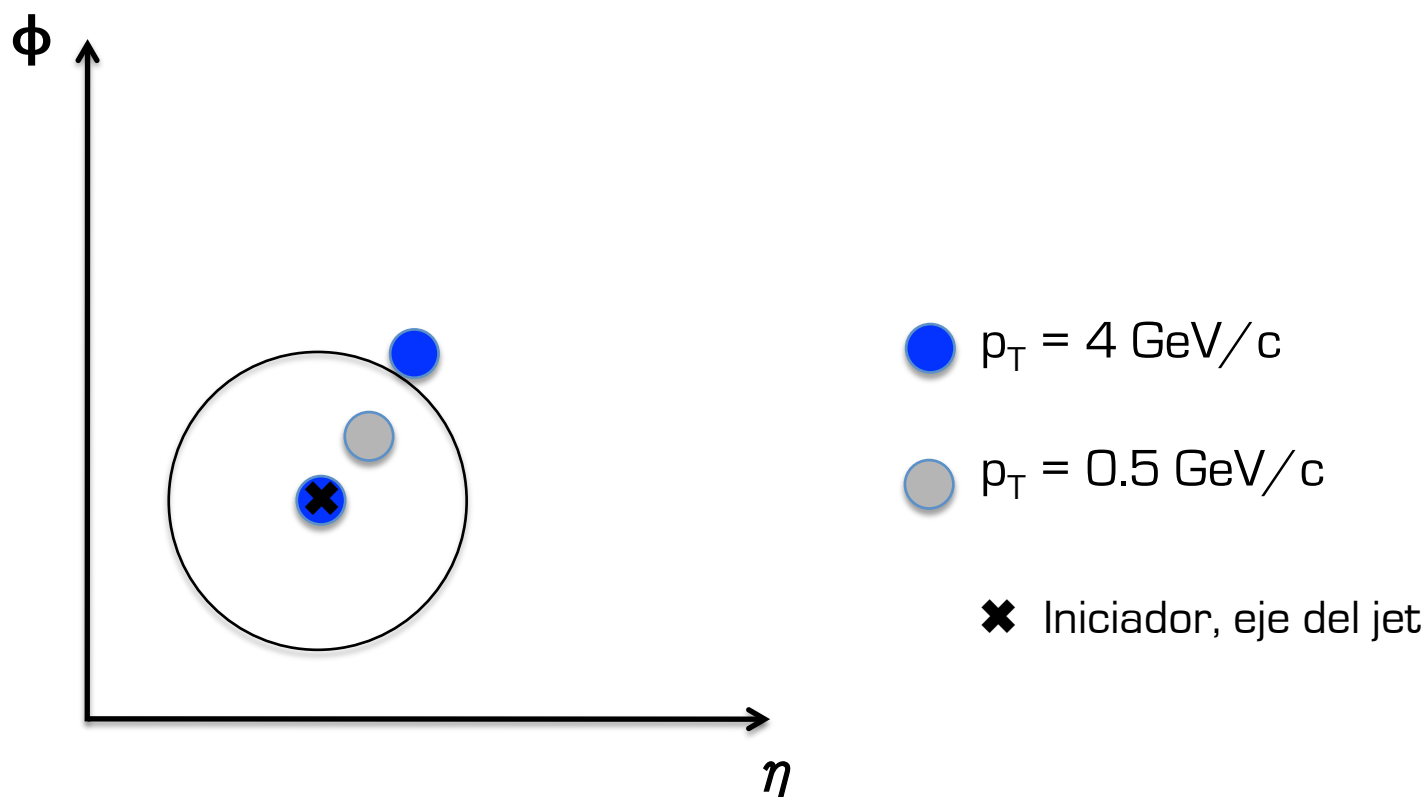
# Infrared safety



# Infrared safety

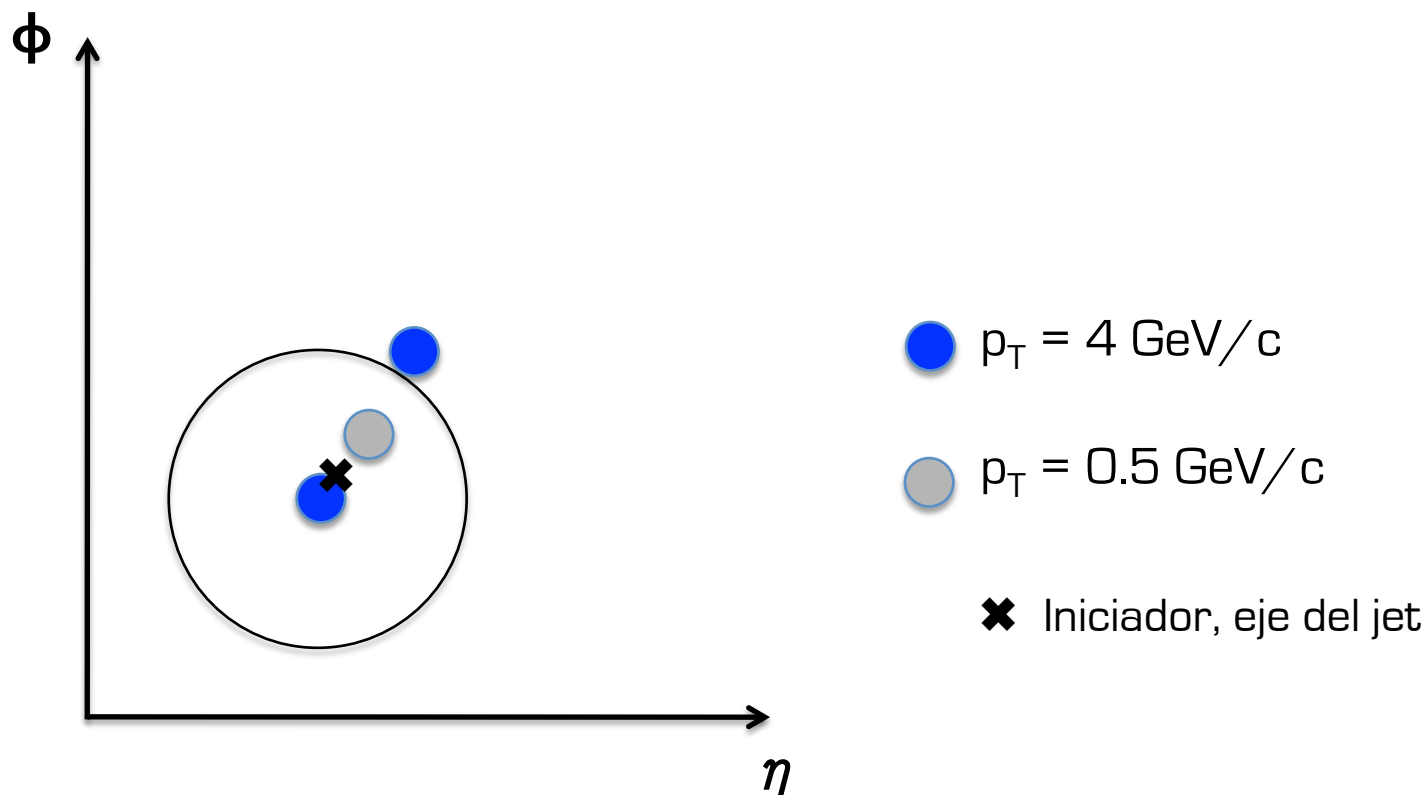


# Infrared safety

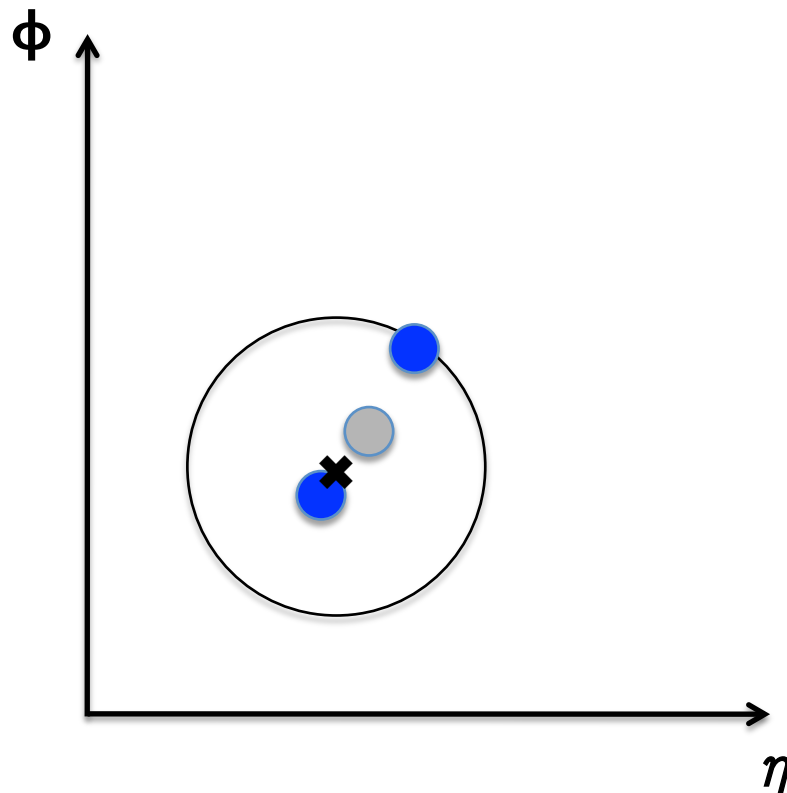




# Infrared safety



# Infrared safety



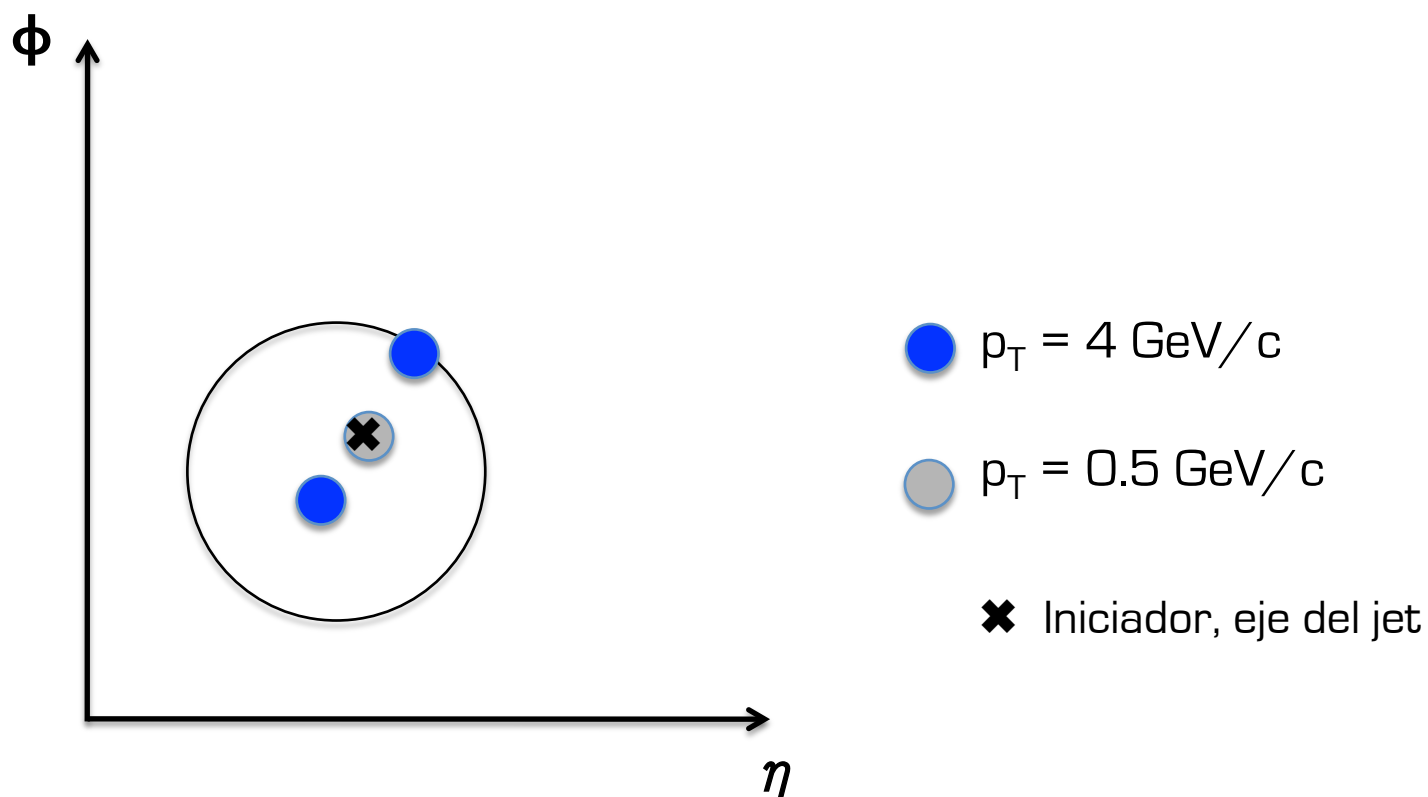
●  $p_T = 4 \text{ GeV}/c$

●  $p_T = 0.5 \text{ GeV}/c$

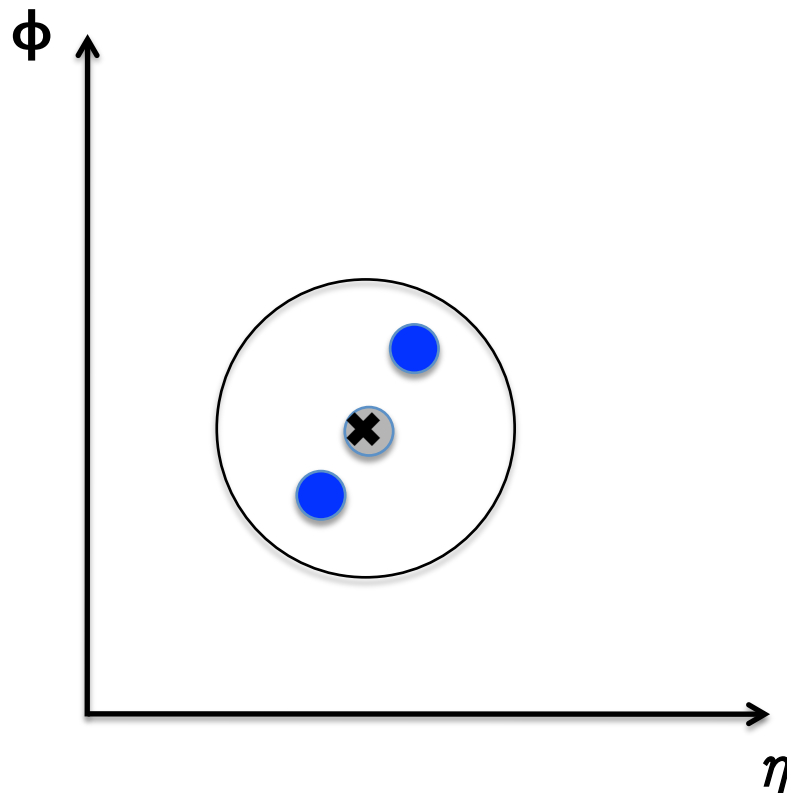
✕ Iniciador, eje del jet

Ambos iniciadores están contenidos en el cono del jet

# Infrared safety



# Infrared safety



●  $p_T = 4 \text{ GeV}/c$

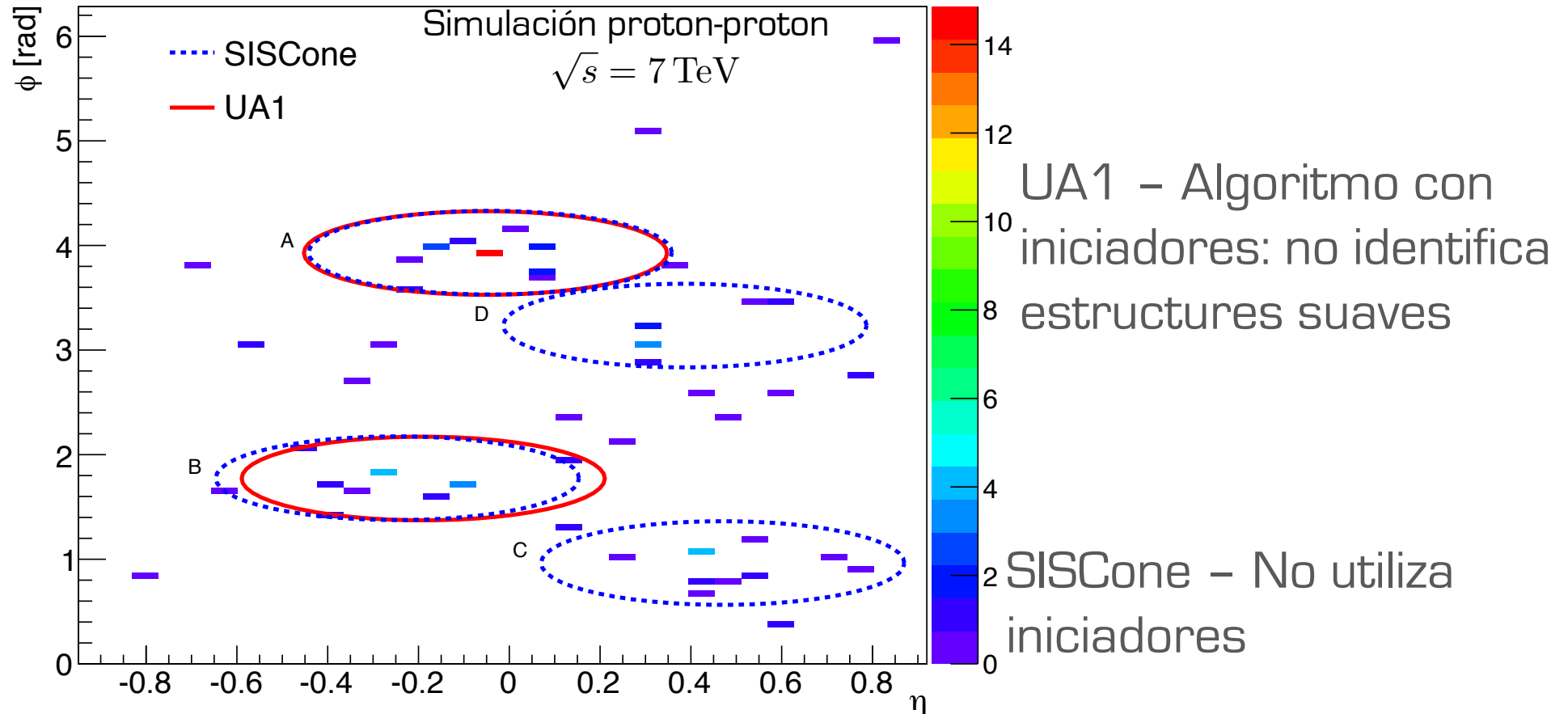
●  $p_T = 0.5 \text{ GeV}/c$

✕ Iniciador, eje del jet

Solución para los algorithms de cono:  
Encontrar todos los posibles jets  
estables

En este caso sólo hay un  
jet. Se obtiene un número  
diferente de jets al agregar  
un parton “suave”

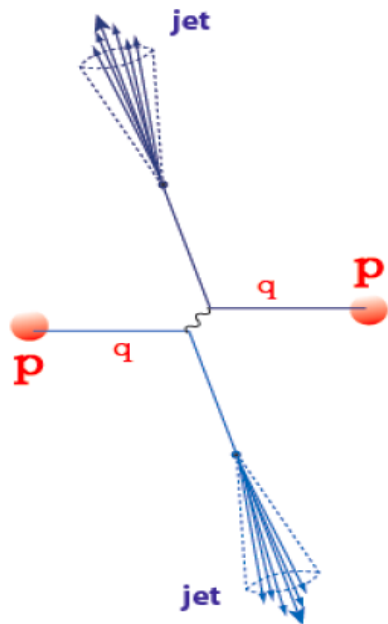
# Identificación de jets con conos



Los experimentos en el LHC usan algoritmos que son “collinear & infrared safe”

# Jets en colisiones proton-proton y de iones pesados

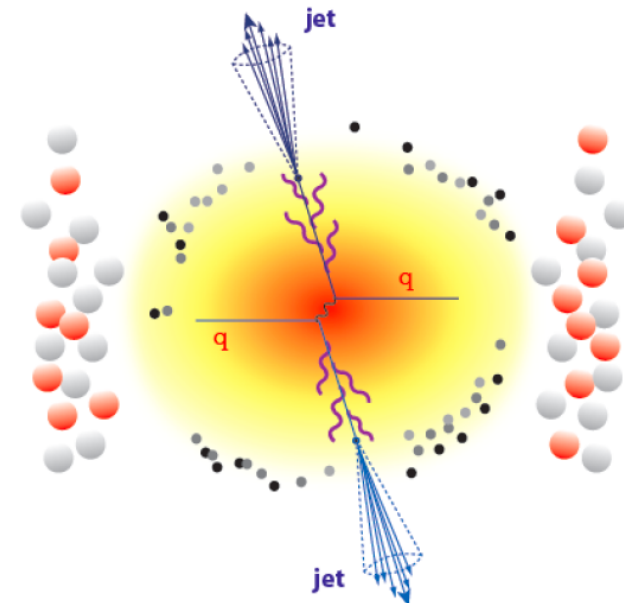
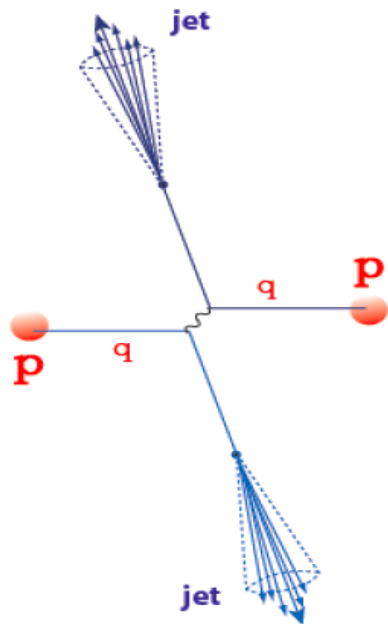
- pp
- Caracterización de jets
  - Fragmentación de partones en el vacío
  - Prueba exp. de pQCD



# Jets en colisiones proton-proton y de iones pesados

- pp
- Caracterización de jets
  - Fragmentación de partones en el vacío
  - Prueba exp. de pQCD

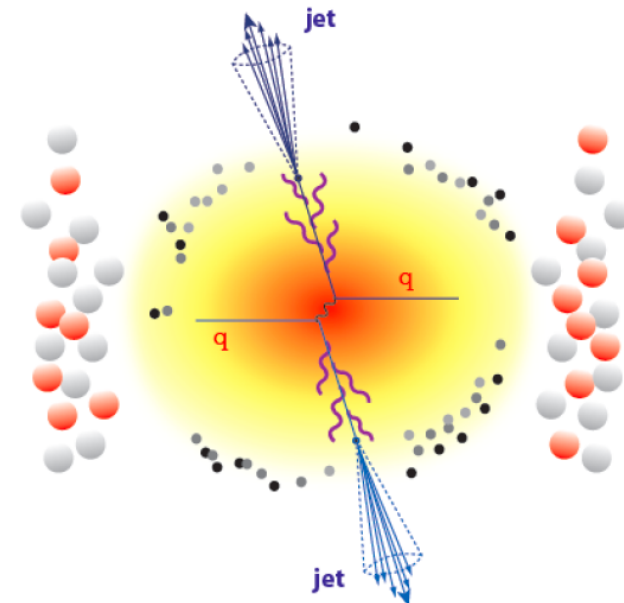
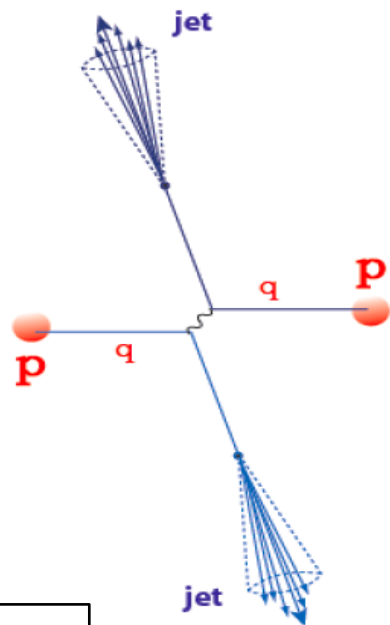
- Pb-Pb
- Fragmentación en un medio
  - Posible modificación de la fragmentation



# Jets en colisiones proton-proton y de iones pesados

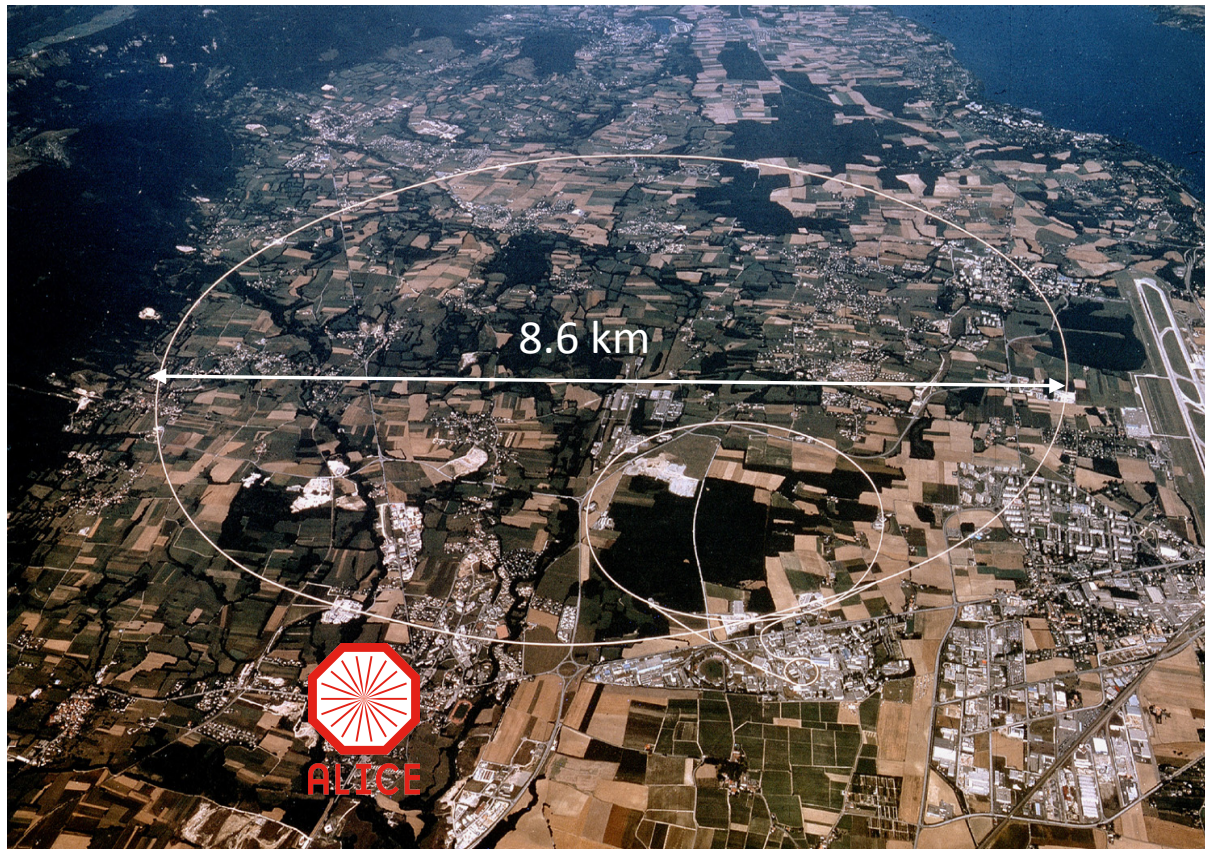
- pp
- Caracterización de jets
  - Fragmentación de partones en el vacío
  - Prueba exp. de pQCD

- Pb-Pb
- Fragmentación en un medio
  - Posible modificación de la fragmentation





# ALICE en el LHC



- ~ 1000 Colaboradores
- ~ 30 Países
- ~ 100 Instituciones

El LHC prooverá:

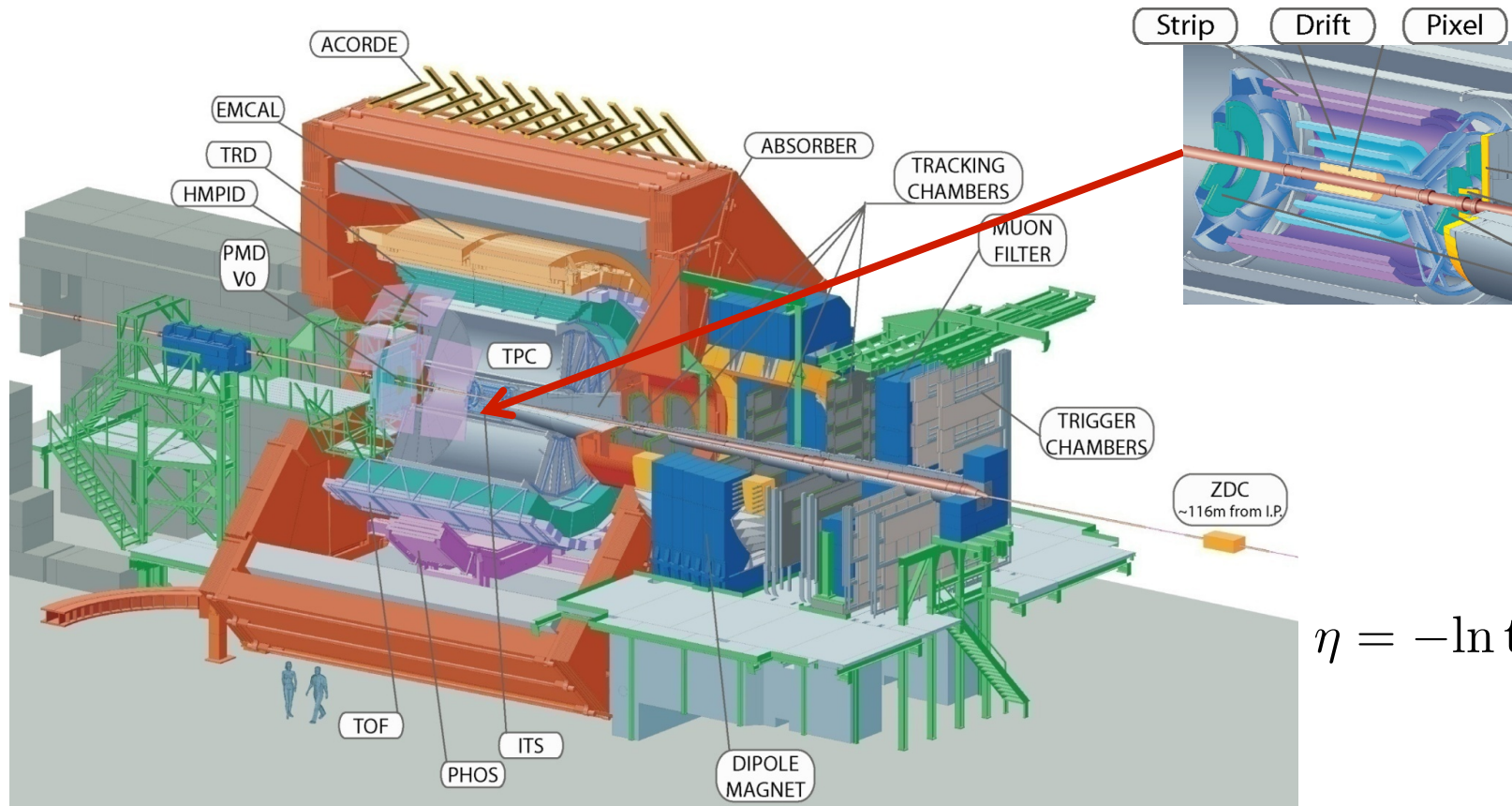
colisiones pp hasta con  $\sqrt{s} = 14$  TeV

colisiones Pb-Pb hasta con  $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$  TeV

Este año:

colisiones p-Pb con  $\sqrt{s} = 5.02$  TeV

# El experimento ALICE

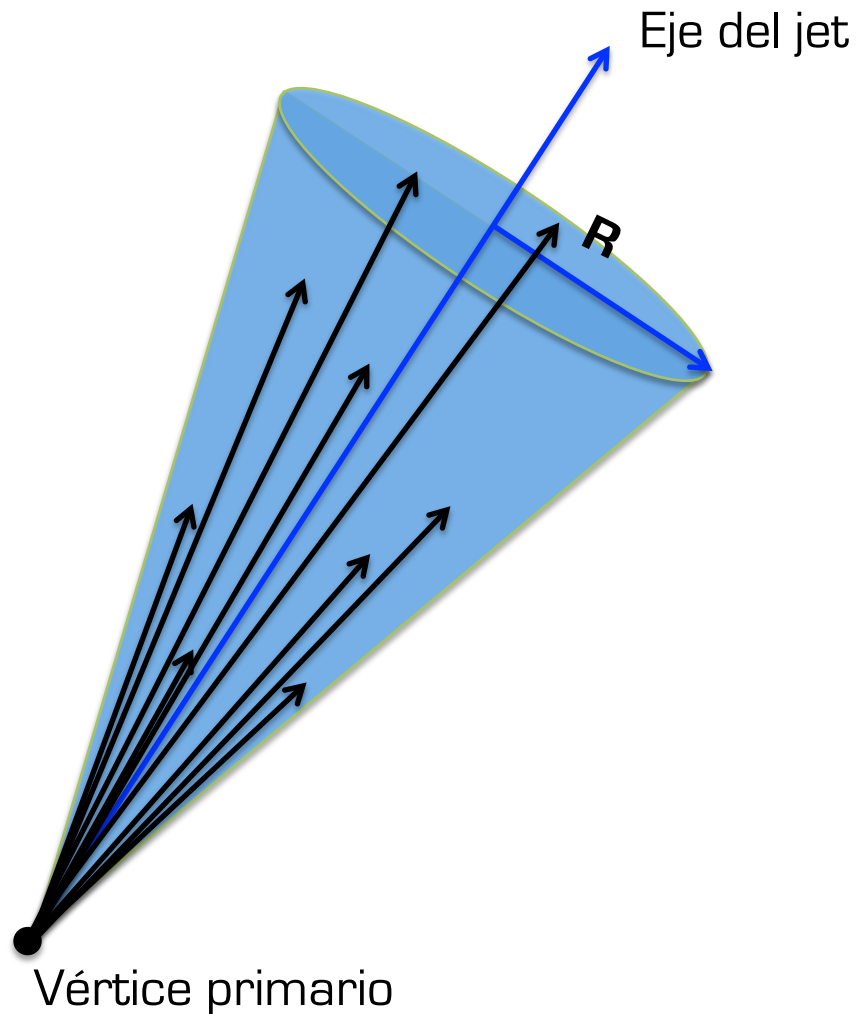


$$\eta = -\ln \tan \left( \frac{\theta}{2} \right)$$

En mi tesis:

Tracking: TPC ( $|\eta| < 0.9$ )    Vértice: ITS    Disparo:  $\left\{ \begin{array}{l} \text{VO} \left( \begin{array}{l} 5.1 < \eta < 2.8 \\ -3.7 < \eta < -1.7 \end{array} \right) \\ \text{ITS} \end{array} \right.$

# La observable de jets *NT90*

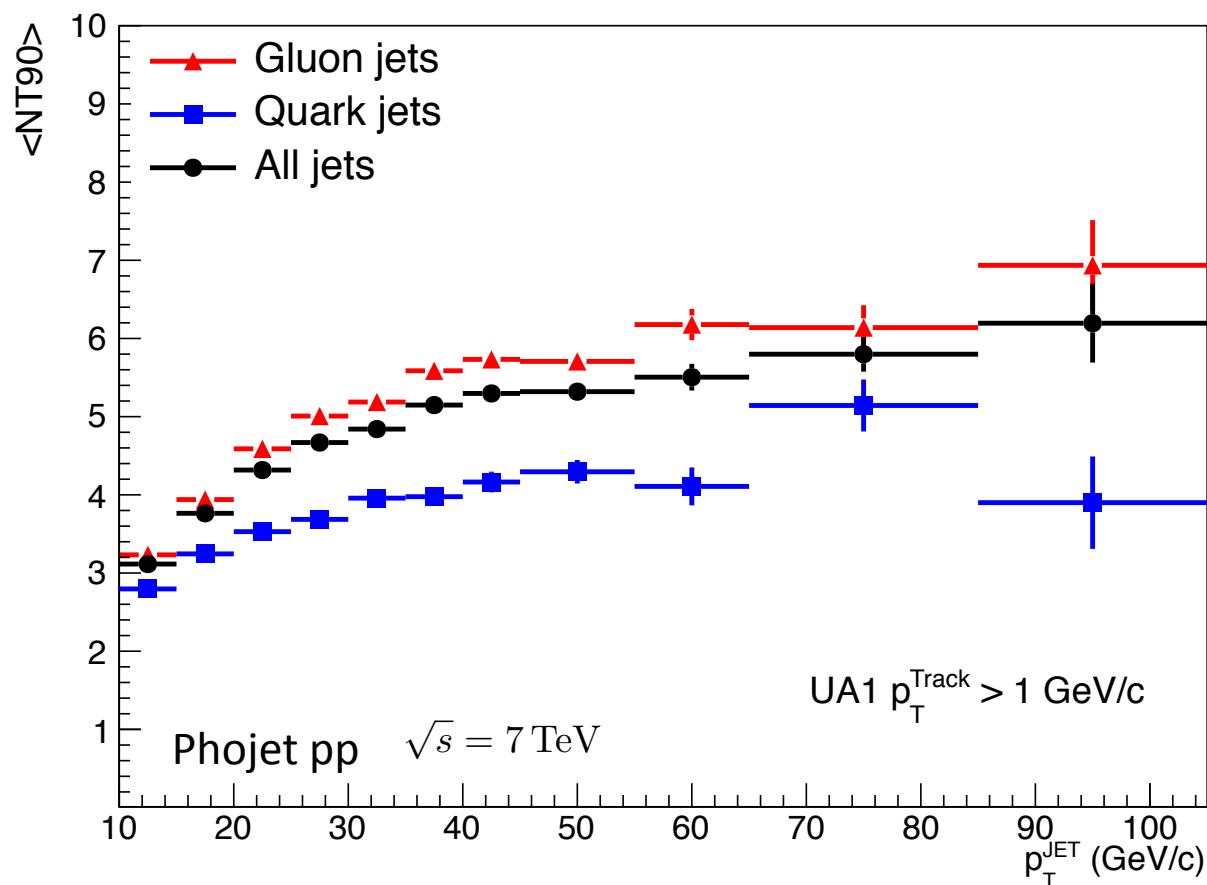


- Propuesta para discriminar jets producidos por quarks o gluones.

*Phys. Rev. D 44 (1991) 2025*

- Ordenar las trazas en los jets en  $p_T$  decreciente.
- Sumar el  $p_T$  de las trazas hasta que 90% del  $p_T$  del jet es recuperado.
- *NT90* es el mínimo número de trazas necesarias para recuperar 90% del  $p_T$  del jet.

# La observable de jets *NT90*



- Propuesta para discriminar jets producidos por quarks o gluones.

*Phys. Rev. D 44 (1991) 2025*

- Ordenar las trazas en los jets en  $p_T$  decreciente.
- Sumar el  $p_T$  de las trazas hasta que 90% del  $p_T$  del jet es recuperado.
- *NT90* es el mínimo numero de trazas necesarias para recuperar 90% del  $p_T$  del jet.

# La observable de jets $SMCPJ \langle \delta R_c^2 \rangle$

CMS PAS QCD-08-002

CMS PAS QCD-10-014

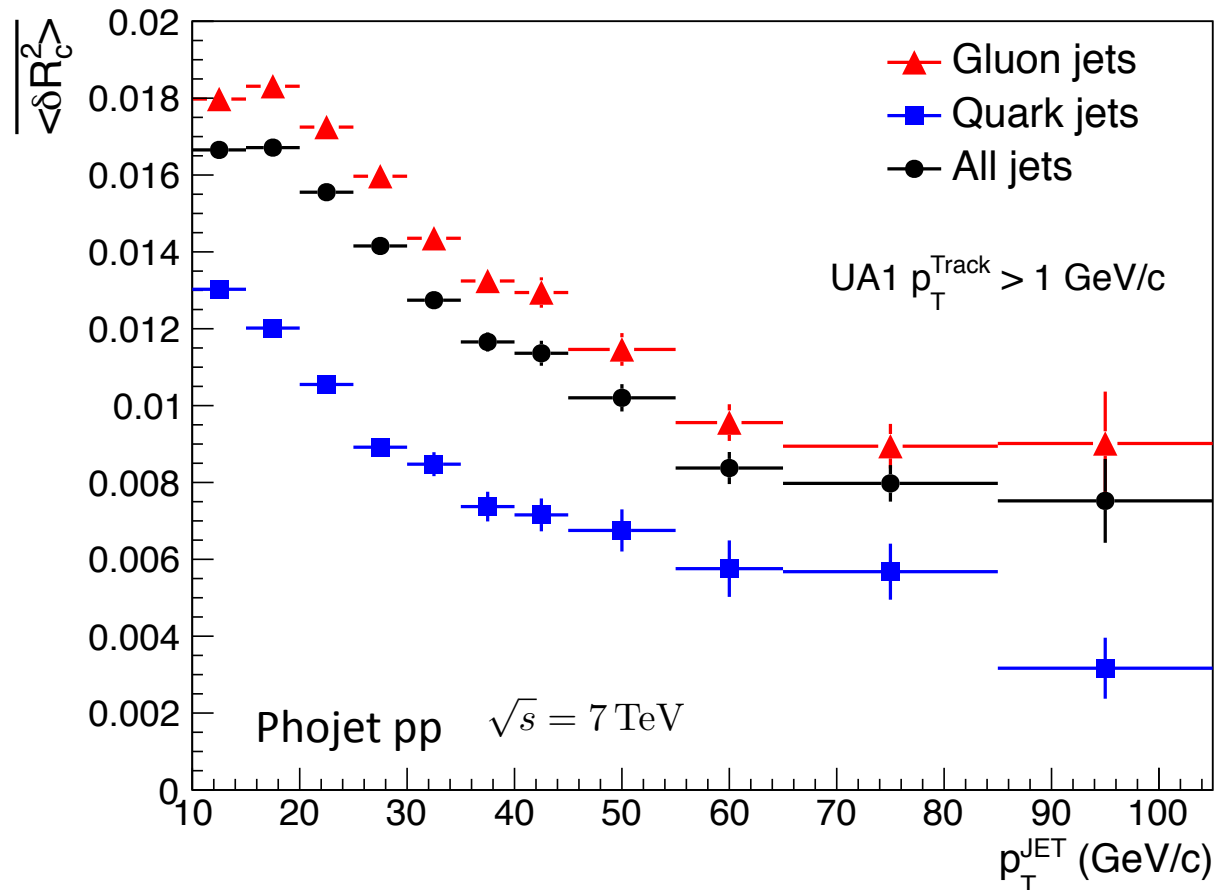
Observable de jets  
propuesta por CMS

Algoritmo:

1:  $\langle \delta R_c^2 \rangle = \langle \delta \phi_c^2 \rangle + \langle \delta \eta_c^2 \rangle$

2:  $\langle \delta \alpha_c^2 \rangle = \langle \delta \alpha_j^2 \rangle - \langle \delta \alpha_j \rangle^2$

3:  $\langle \delta \alpha_j^n \rangle = \frac{\sum_{i=1}^m (\alpha_j - \alpha_i)^n \times p_T^i}{\sum_{i=1}^m p_T^i}$



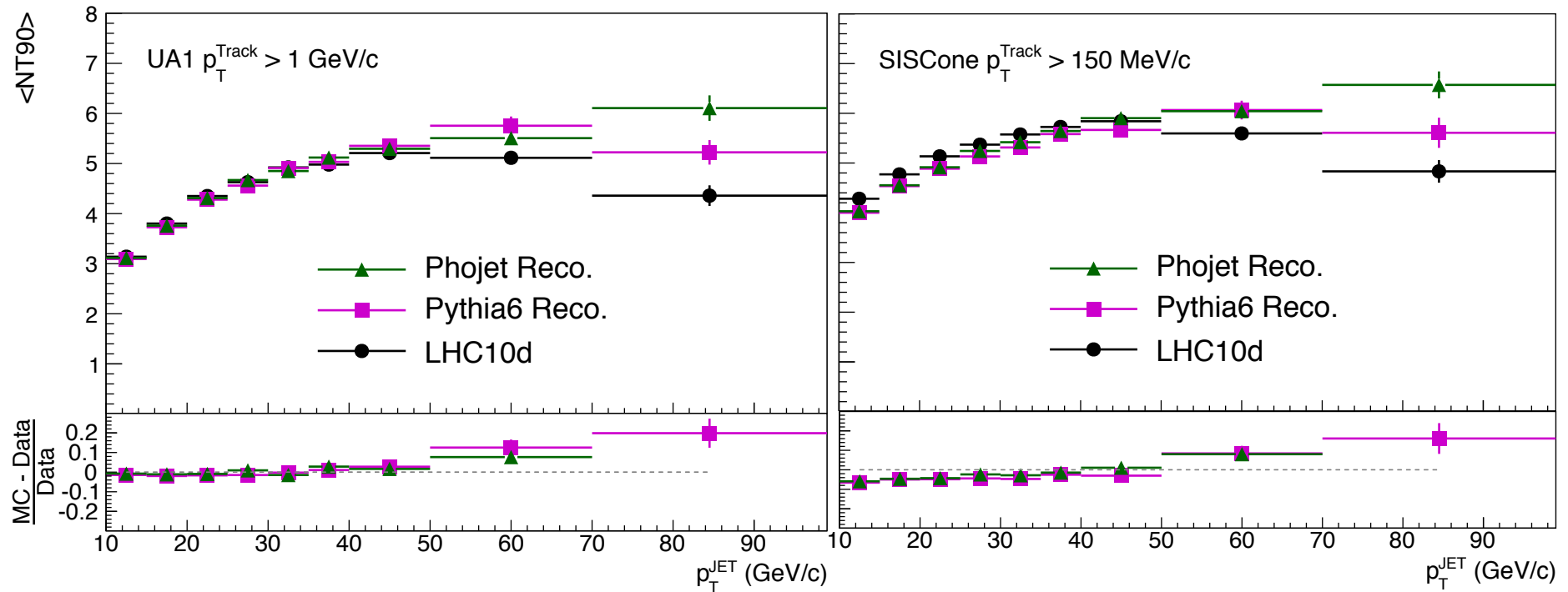
$\langle \delta R_c^2 \rangle$  cuantifica la distribución espacial de partículas dentro del jet

A1

# Estudio inclusivo de observables de jets y estimación de la razón quark/gluon

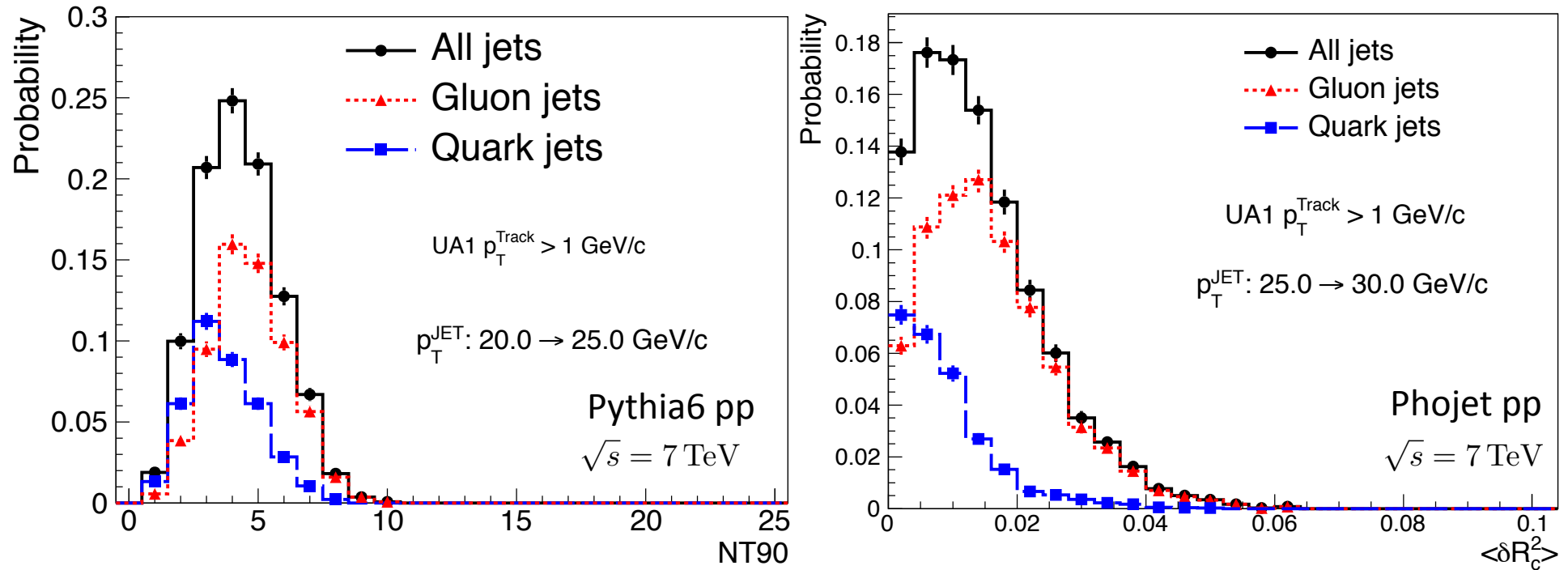
*H. León Vargas (for the ALICE Collaboration)  
International Journal of Modern Physics E  
Vol. 20, No. 7 (2011) 1561-1565*

# NT90: Datos y modelos MC



- Dos diferentes valores de corte de  $p_T$  usados en los algoritmos
- Los modelos reproducen mejor las mediciones cuando  $p_T^{Track} > 1 \text{ GeV}/c$
- Observación similar en el caso de  $\langle \delta R_c^2 \rangle$

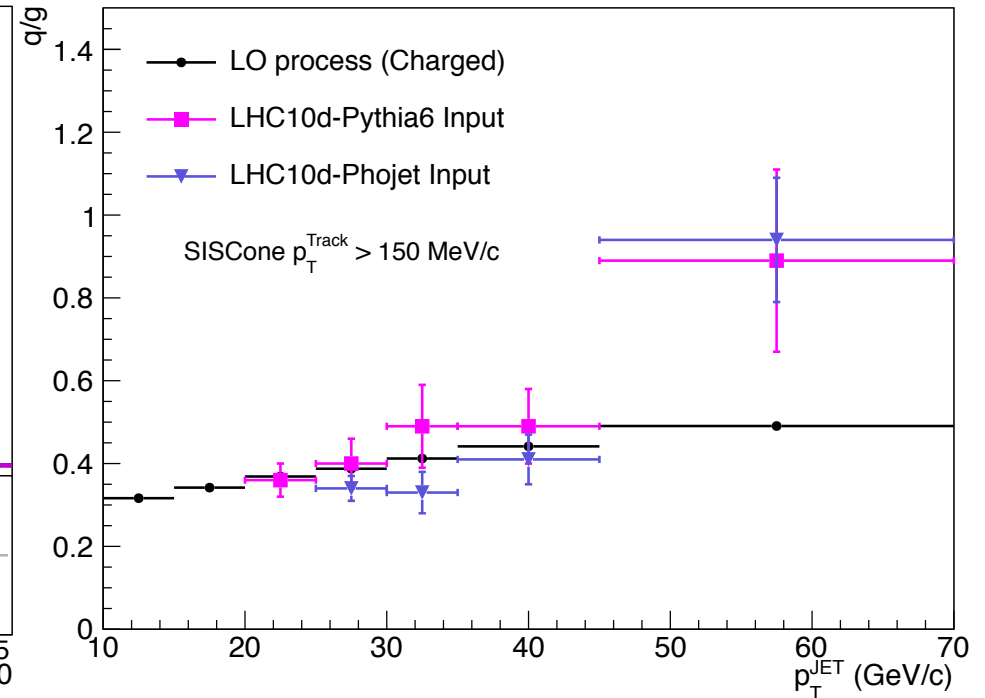
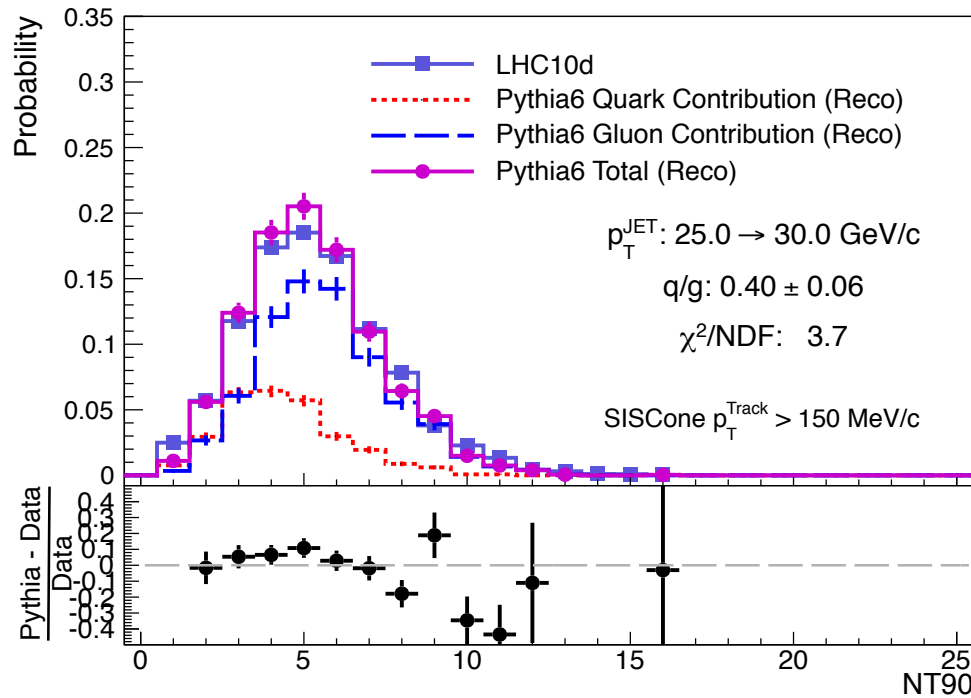
# Estimación de la razón $q/g$



- Hacer uso de las diferencias de fragmentación de los jets producidos por quark y gluones
- Estimar la razón  $q/g$  como función del  $p_T$  de los jets



# Estimación de $q/g$ : *NT90*



1.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{\text{nbins}} \left( \frac{NT90_{\text{Data}(i)} - NT90_{\text{MC}(i)}}{\sqrt{E_{\text{Data}(i)}^2 + E_{\text{MC}(i)}^2}} \right)^2$$

2.

$$NT90_{\text{MC}} = \alpha f_Q + (1 - \alpha) f_G$$

3.

$$\frac{q}{g} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

# Resumen de A1

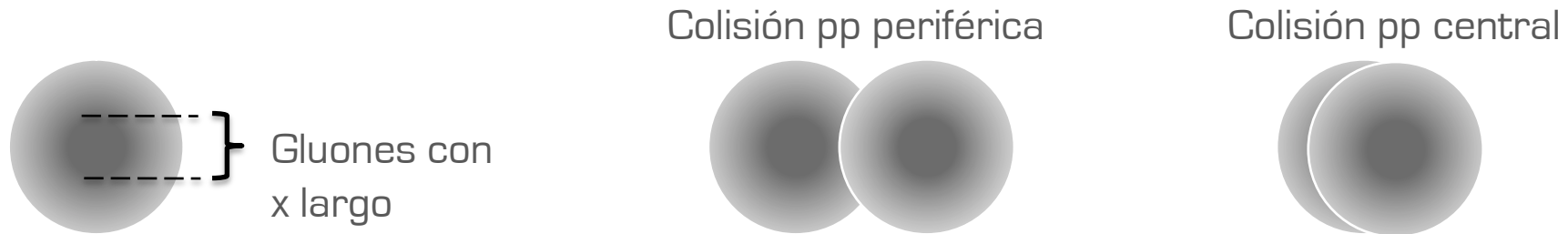
- Estudié  $NT90$  y  $\langle \delta R_c^2 \rangle$  usando dos valores de corte  $p_T^{\text{Track}}$ 
  - Los modelos reproducen mejor los resultados experimentales cuando  $p_T^{\text{Track}} > 1 \text{ GeV}/c$  para ambas observables.
- Desarrollé un método para estimar la razón  $q/g(p_T^{\text{Jet}})$

A2

# Dependencia de las observables de jets con la multiplicidad del evento

*H. León Vargas (for the ALICE Collaboration)  
Journal of Physics: Conference Series 389 (2012)*

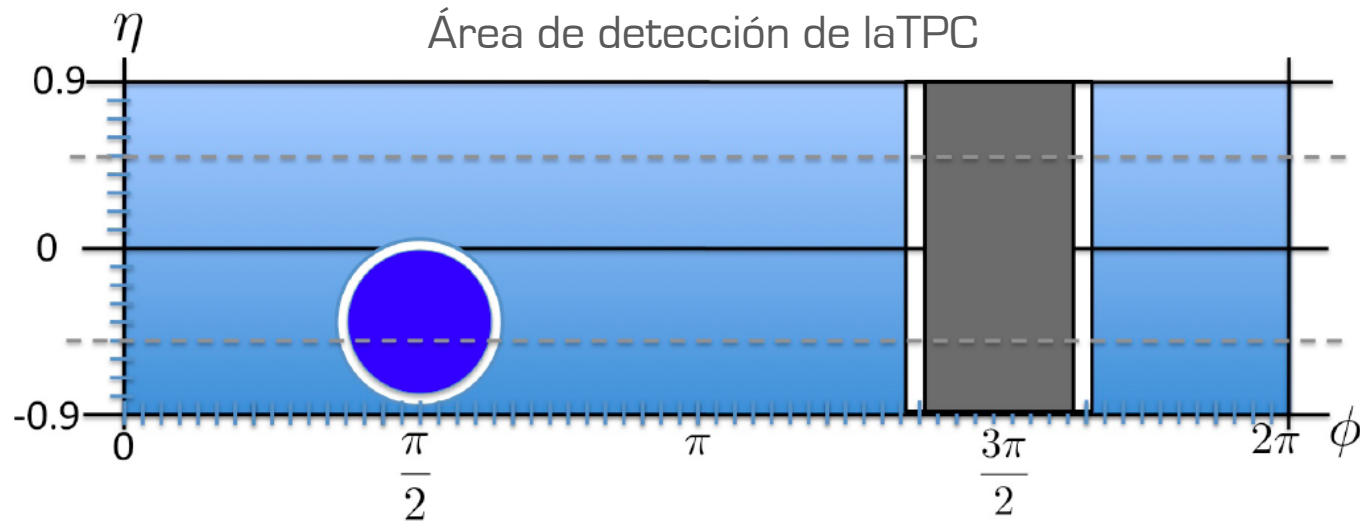
# Caracterización de la multiplicidad subyacente



*L. Frankfurt, M. Strikman and C. Weiss, Phys. Rev. D. 83 (2011) 054012*

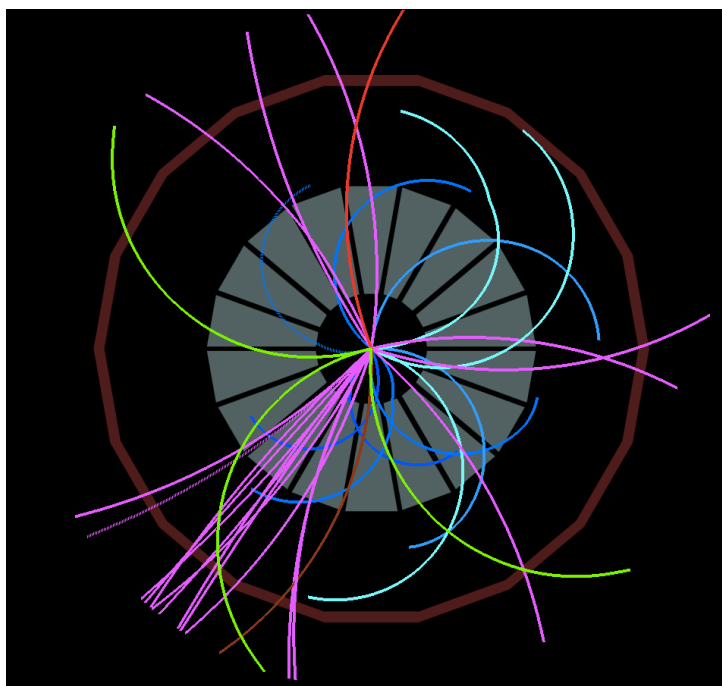
- Multiplicidad  $\longrightarrow$  Parametro de impacto de la colision pp (ansatz).
- Modelos MC  $\longrightarrow$  PDFs  
Necesidad de GPDs ?
- Estudiar la correlación entre las observables de jets y la multiplicidad asociada  
multiplicity  $\longrightarrow$  Diferente composición de jets de quark/gluon
- Separar el evento en dos regiones
  - Con actividad de jets
  - Región complementaria sin fragmentos de jets

# Multiplicidad subyacente



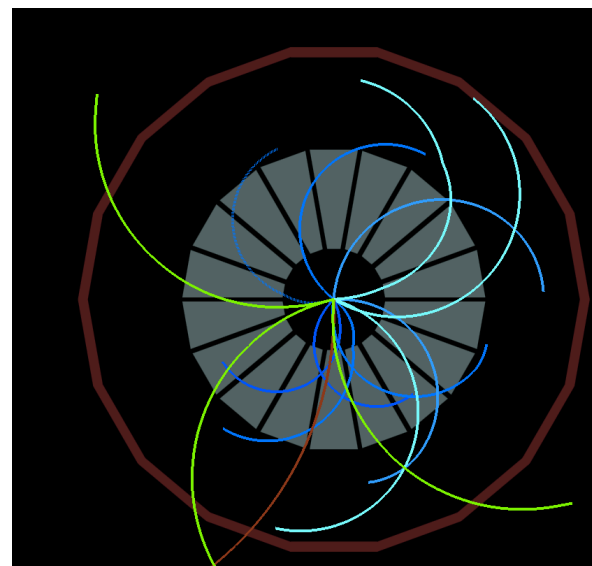
- Multiplicidad total en la TPC:  
Todas las trazas con  $|\eta| < 0.9$  y  $150 \text{ MeV}/c < p_{\text{T}}^{\text{Track}} < 900 \text{ MeV}/c$
- Multiplicidad suave en la TPC: Subconjunto de la multiplicidad total en la TPC sin:
  - \* Trazas alrededor de  $R_{\text{E}}$  del eje del jet.  $|\eta_{\text{Jet}}| < 0.5$
  - \* Trazas alrededor de  $\phi_{\text{E}} = \phi_{\text{Jet}} + \pi \pm R_{\text{E}}$

# Multiplicidad subyacente

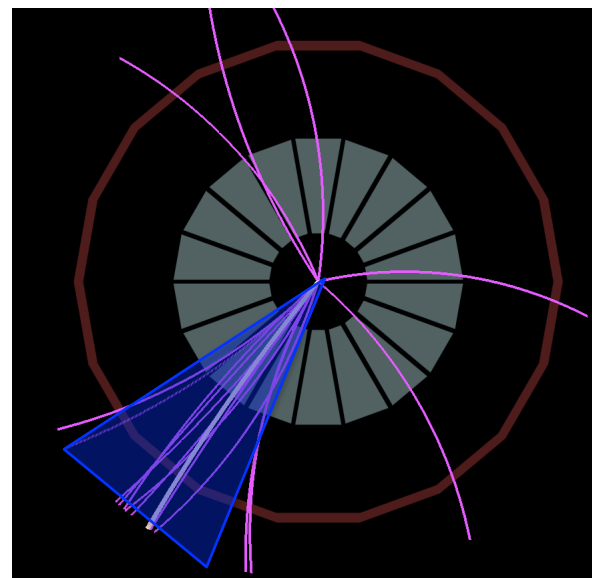


Evento con un jet

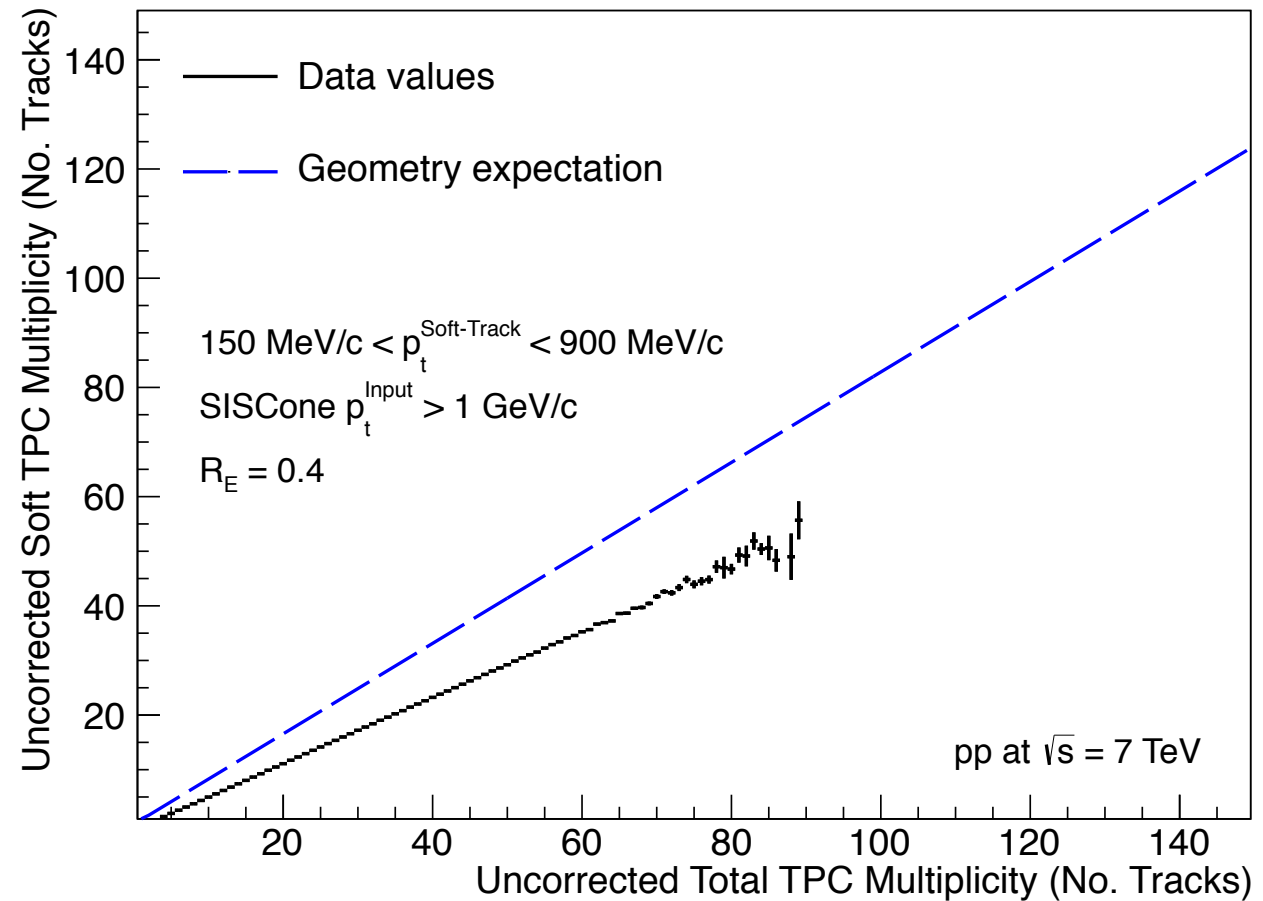
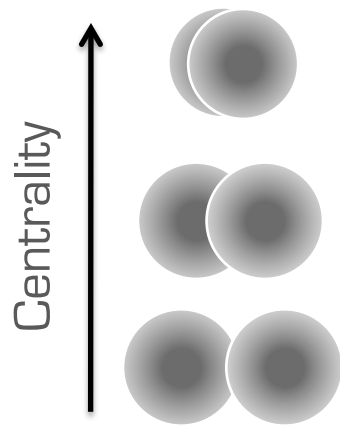
Multiplicidad suave



Fragmentos del jet

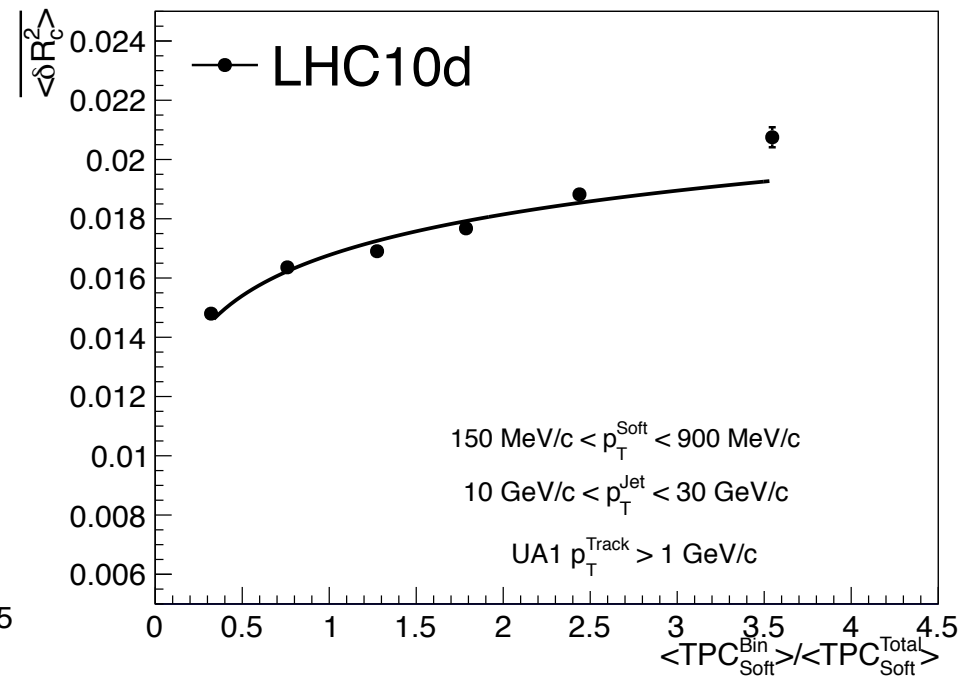
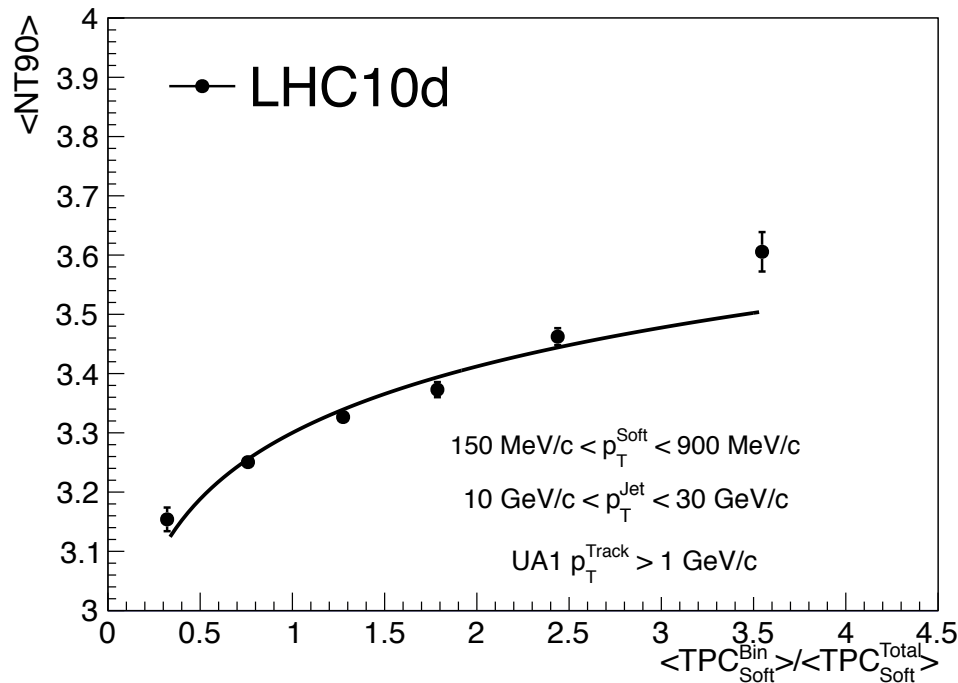


# Multiplicidad subyacente (MS)



La MS no conduce al resultado trivial debido a geometría

# NT90, $\langle \delta R_c^2 \rangle$ y la multiplicidad subyacente



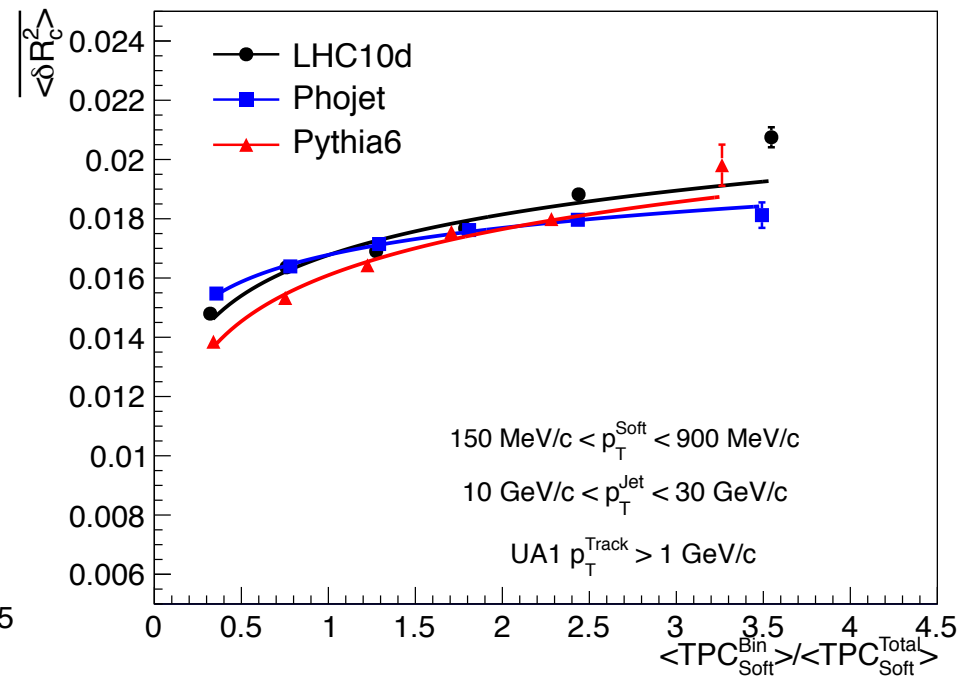
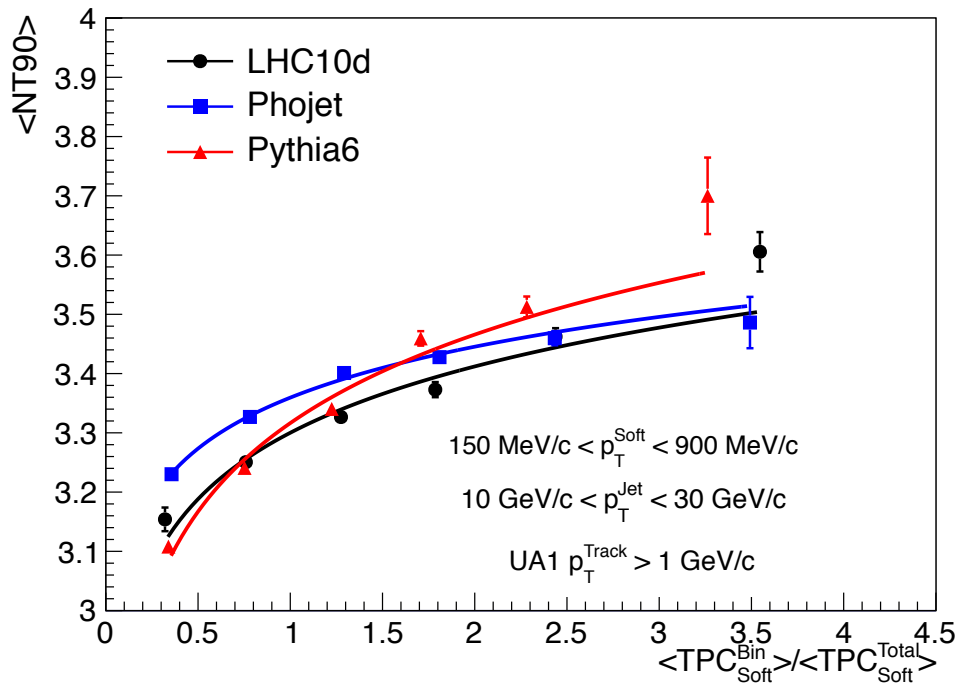
$$\langle NT90 \rangle = m \ln \frac{\langle TPC_{Soft}^{Bin} \rangle}{\langle TPC_{Soft}^{Total} \rangle} + b$$

$$\langle \delta R_c^2 \rangle = m \ln \frac{\langle TPC_{Soft}^{Bin} \rangle}{\langle TPC_{Soft}^{Total} \rangle} + b$$

Incremento de los valores medios de  $NT90$  y  $\langle \delta R_c^2 \rangle$  con la multiplicidad subyacente.



# NT90: Comparación de medidas experimentales y simulaciones



Las simulaciones describen un incremento en los valores medios de  $NT90$  y  $\langle \delta R_c^2 \rangle$  con la multiplicidad suave

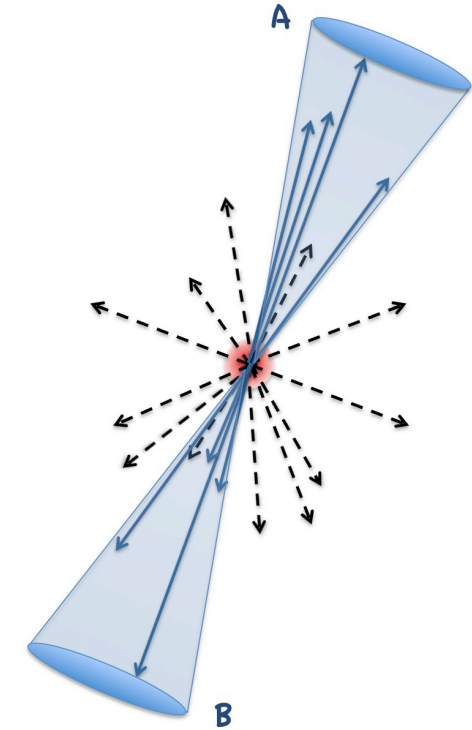
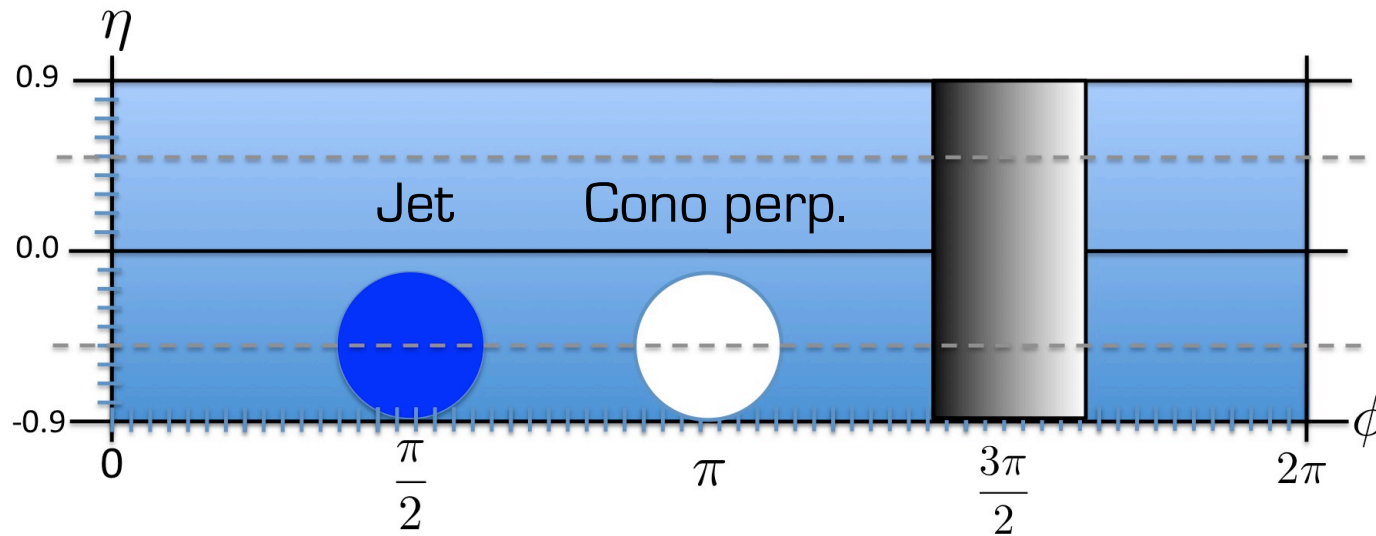
# Resumen de A2

- Estudié  $NT90$  y  $\langle \delta R_c^2 \rangle$  como función de la multiplicidad subyacente
- Los jets asociados con valores largos de la multiplicidad subyacente exhiben características de jets producidos por gluones
- Por el momento los modelos son capaces de reproducir las observaciones experimentales.

# A3

*NT80* en colisiones Pb-Pb  
con  $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 2.76 \text{ TeV}$

# Substracción del fondo de la colisión para *NT80*



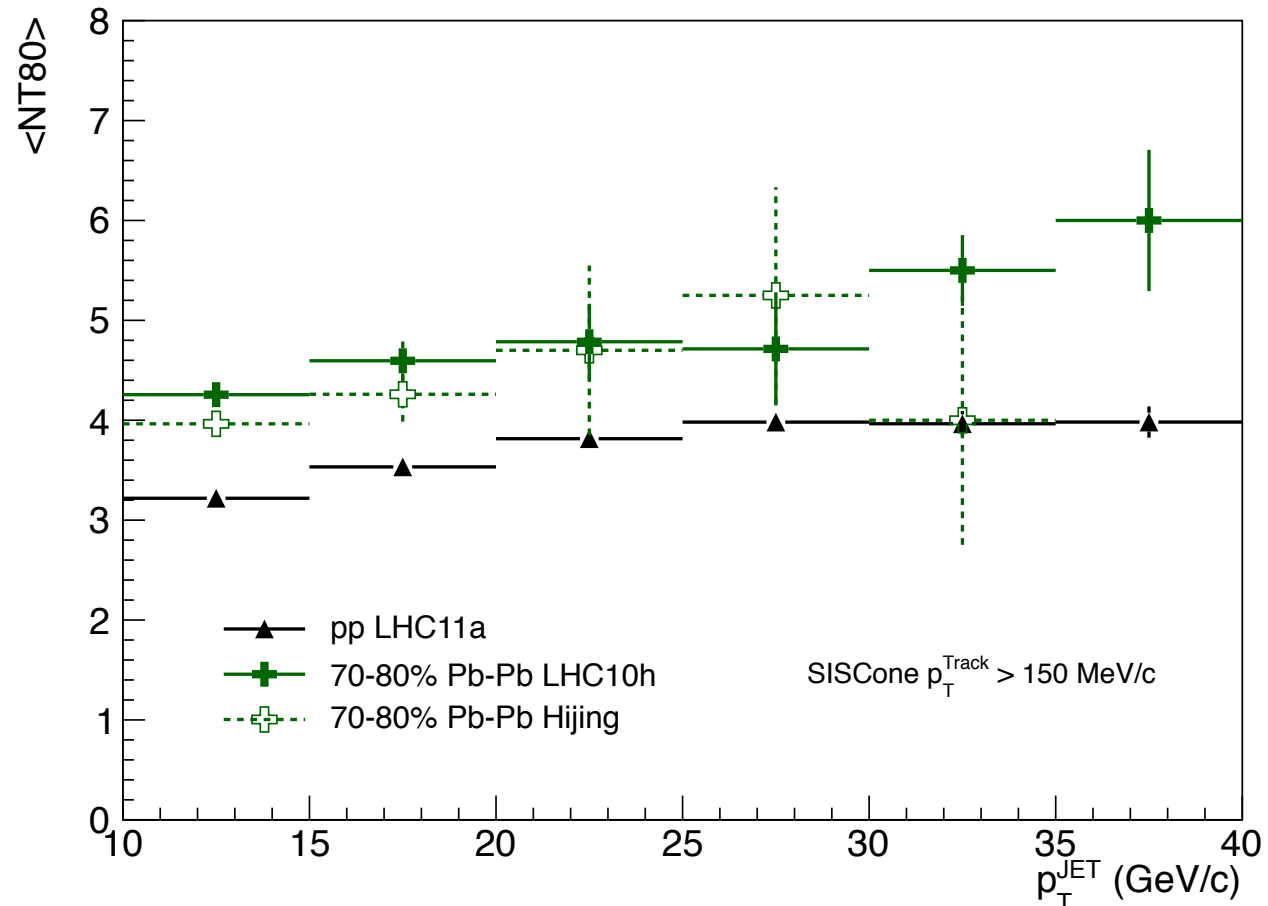
Coordenadas del cono perpendicular

$$\begin{cases} \eta_{\text{Perp.}} = \eta_{\text{Lead.}} \\ \phi_{\text{Perp.}} = \phi_{\text{Lead.}} + \frac{\pi}{2} \end{cases}$$

Jet reconstruido:  $p_{\text{T}}^{\text{JET.MD.}} = p_{\text{T}}^{\text{JET}} + p_{\text{T}}^{\text{BCKG.}}$

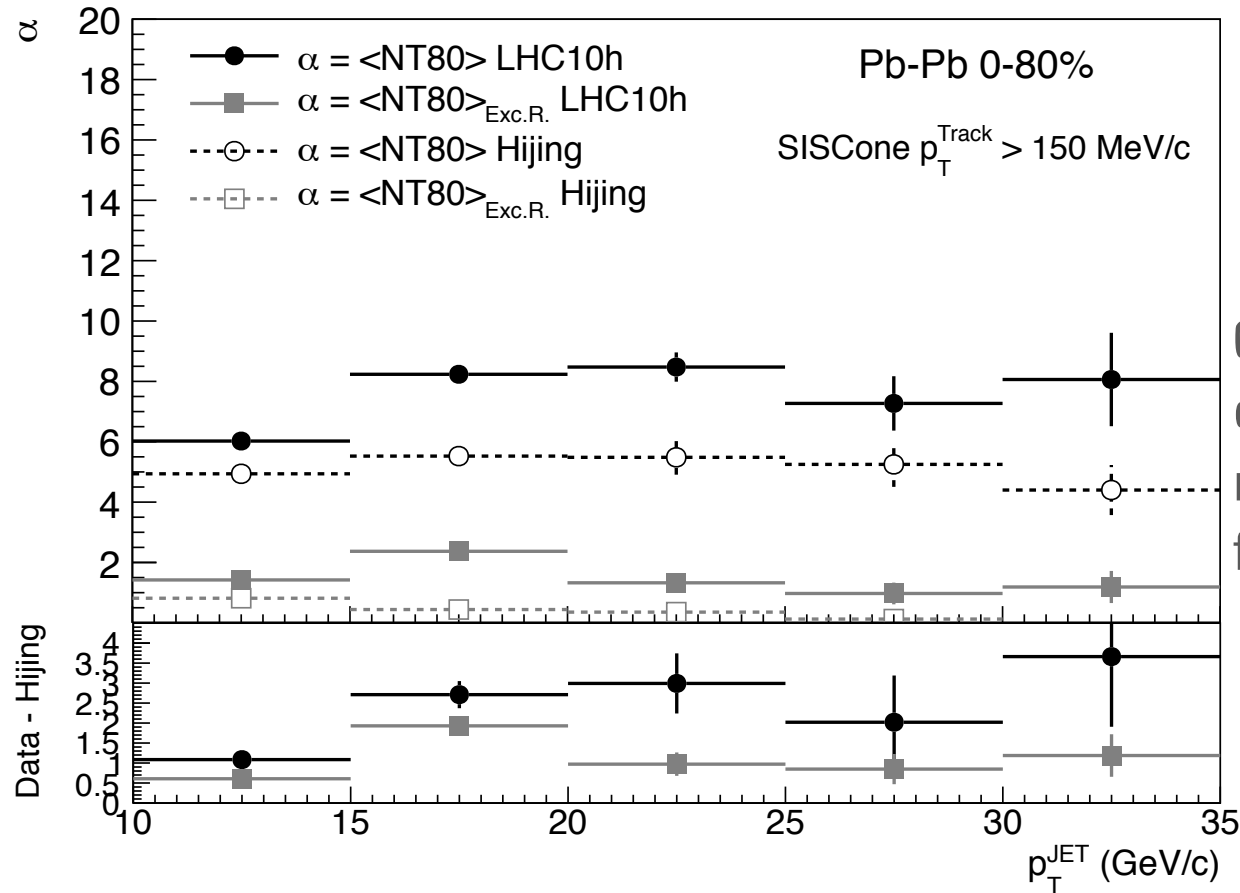
$$NT80_{\text{Raw}} \longrightarrow NT80$$

# Comparación de la medición experimental con Hijing y con colisiones pp



- Hijing reproduce la observación experimental en el caso de colisiones periféricas

# Modificación de la fragmentación del jet

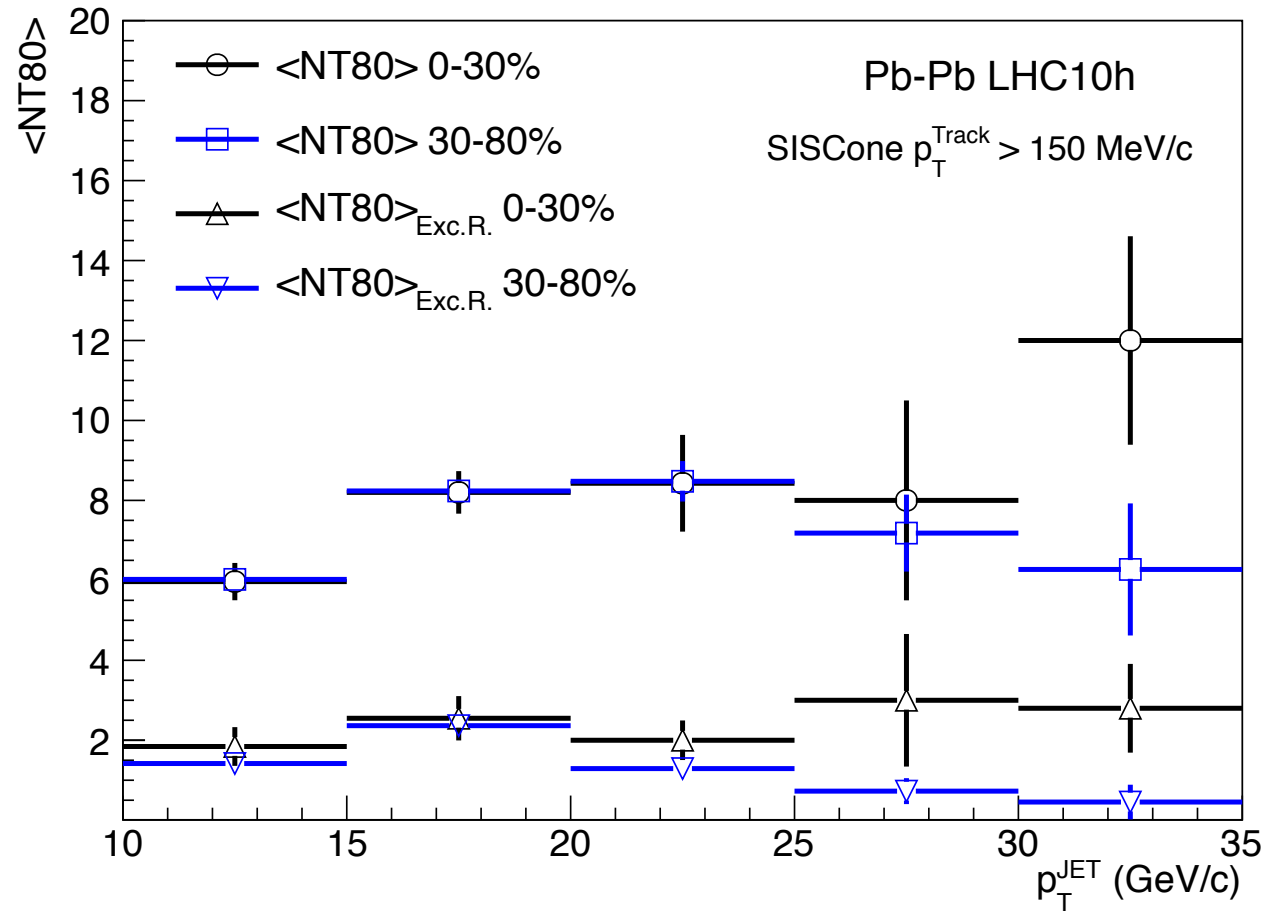


$\langle NT80 \rangle_{\text{Exc.R.}}$

Cuantifica la posible contaminación en la medición debida al fondo de la colisión

- Dada la subestimación del fondo de la colisión Hijing, los valores experimentales son reproducidos experimentalmente

# Modificación de la fragmentación del jet



- La comparación de colisiones centrales y periféricas muestran que las fragmentaciones son compatibles

# Resumen de A3

- Estudié *NT80* en colisiones de Pb-Pb usando SIScone
- Desarrollé un método para estimar y substraer el fondo de la colisión de la observable
- Comparé la medición inclusiva de *NT80* con las predicciones de Hijing y de dos centralidades (periférica y central)
- La fragmentación de los jets es compatible con la fragmentación observada en el vacío



# Conclusiones

## A1

- Estudié  $NT90$  y  $\langle \delta R_c^2 \rangle$ : se encontró una mejor concordancia entre la medición experimental y los modelos cuando  $p_T^{\text{Track}} > 1 \text{ GeV}/c$
- Desarrollé un método para estimar  $q/g(p_T^{\text{Jet}})$

## A2

- Los jets asociados a valores largos de la multiplicidad muestran una fragmentación similar a la de jets de gluones

## A3

- Estudié  $NT80$  en colisiones Pb-Pb: la fragmentación de los jets es consistente con la fragmentación de jets en el vacío