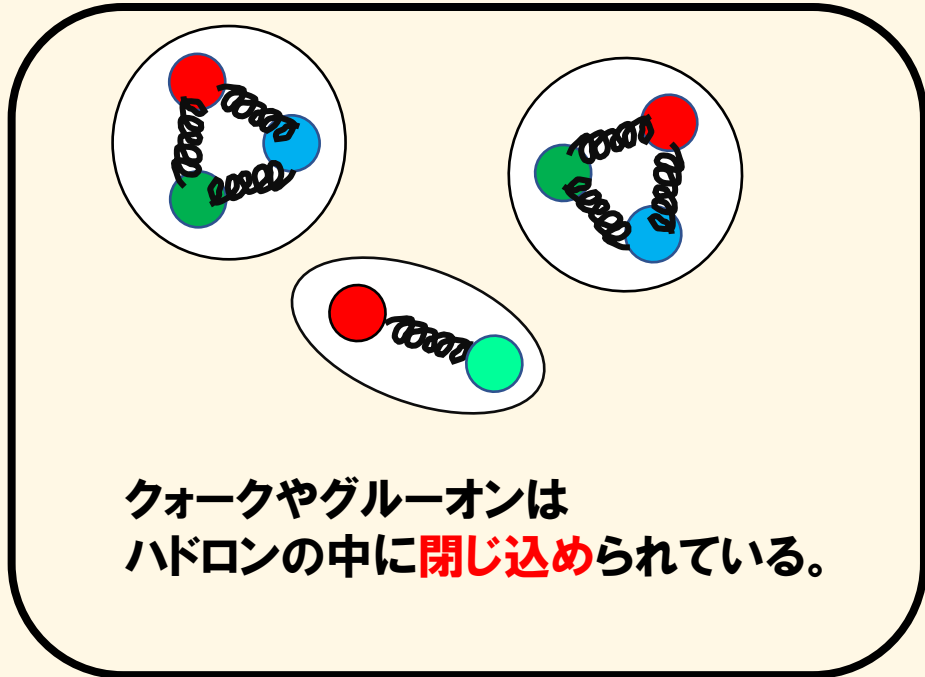


PHENIX実験における
陽子+陽子衝突 (p+p) での
 D^0 メソン再構成

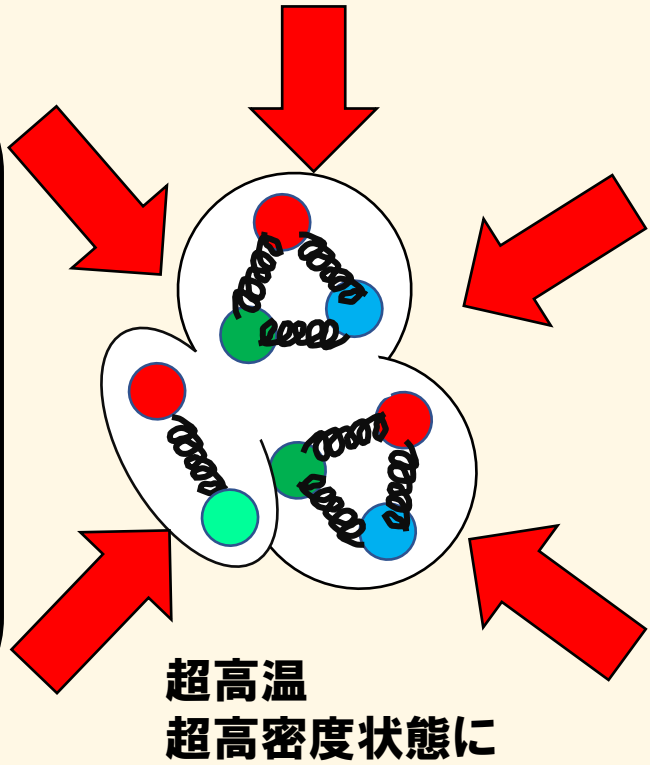
今井 皓

クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP)



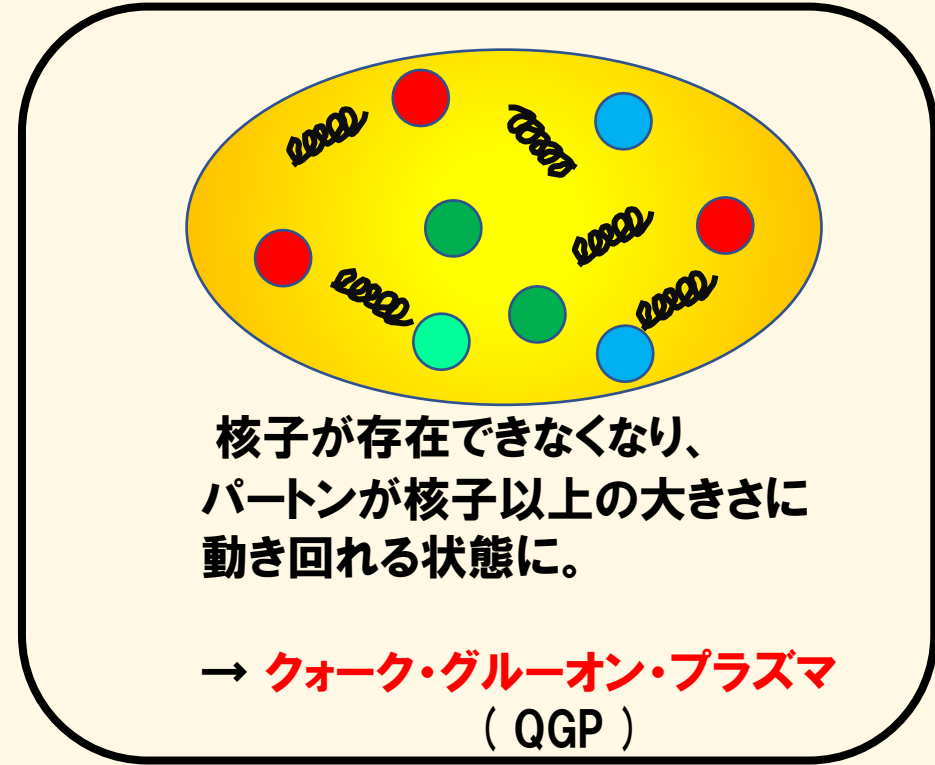
クォークやグルーオンは
ハドロンの中に閉じ込められている。

The diagram shows three hadrons. Two are baryons, each containing three quarks (red, blue, and green) connected by gluons. The third is a meson, containing a quark-antiquark pair (red and green) connected by a gluon.



超高温
超高密度状態に

The diagram shows the transition from the hadron state to the quark-gluon plasma state. Red arrows point from the hadrons towards a central region where the quarks and gluons are shown as free particles, indicating the transition to a quark-gluon plasma state.



核子が存在できなくなり、
パートンが核子以上の大きさに
動き回れる状態に。

→ **クォーク・グルーオン・プラズマ**
(QGP)

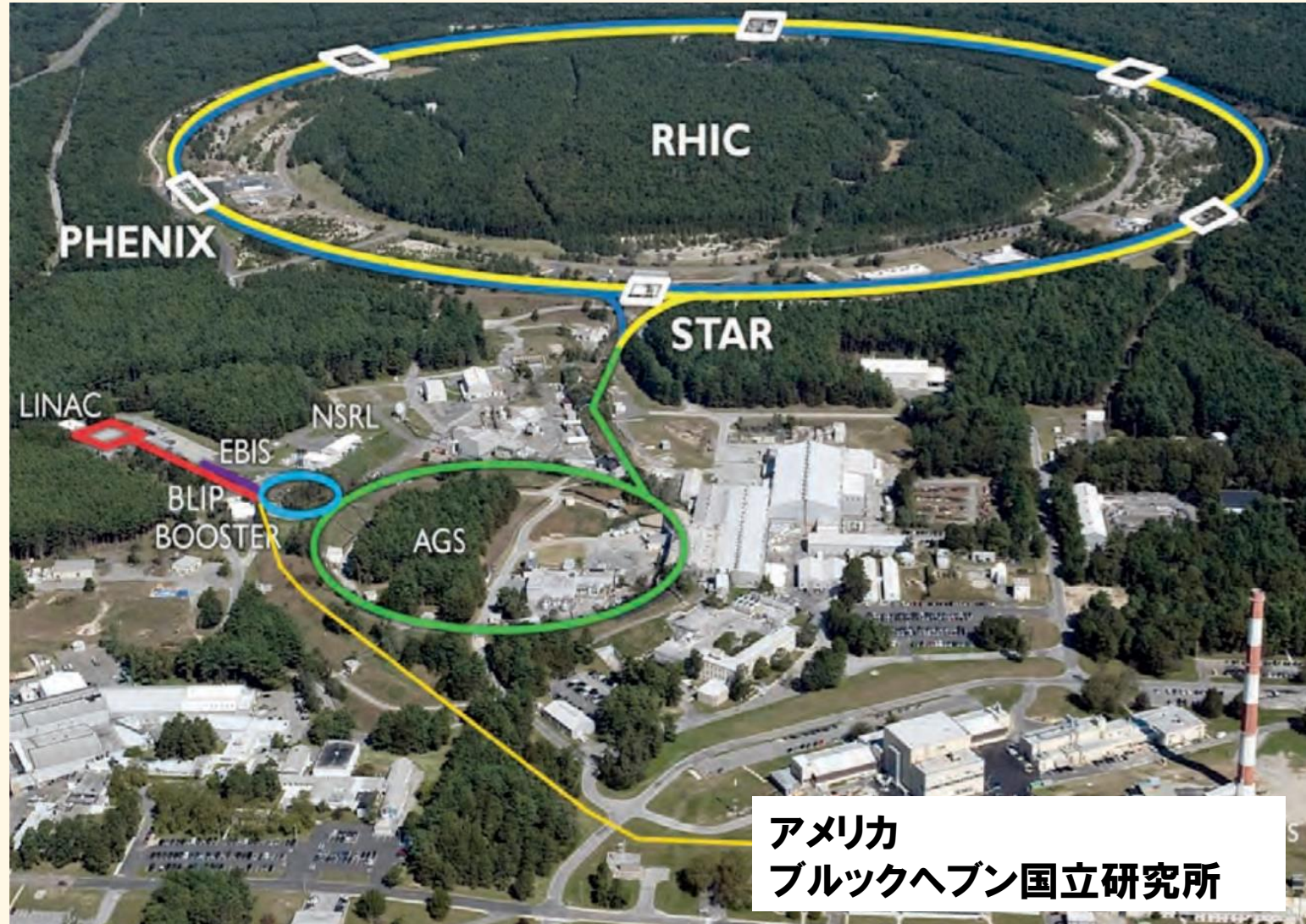
The diagram shows a quark-gluon plasma state. A yellow oval contains several quarks (red, blue, and green) and gluons (black squiggly lines) moving freely, indicating that nucleons no longer exist and partons can move around at a size larger than a nucleon.

Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)

QGPの物理を理解するためには、まずQGPを作り出さなければならない。

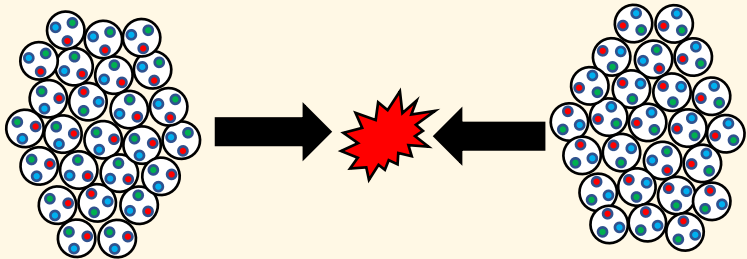
Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)

QGPの物理を理解するためには、まずQGPを作り出さなければならない。



Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)

QGPの物理を理解するためには、まずQGPを作り出さなければならない。

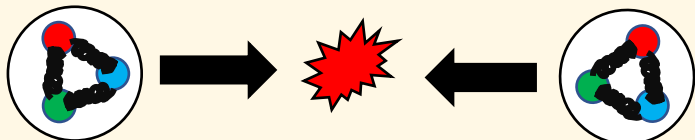


金原子核

金原子核

高エネルギー金原子核衝突

→ QGPを生成。

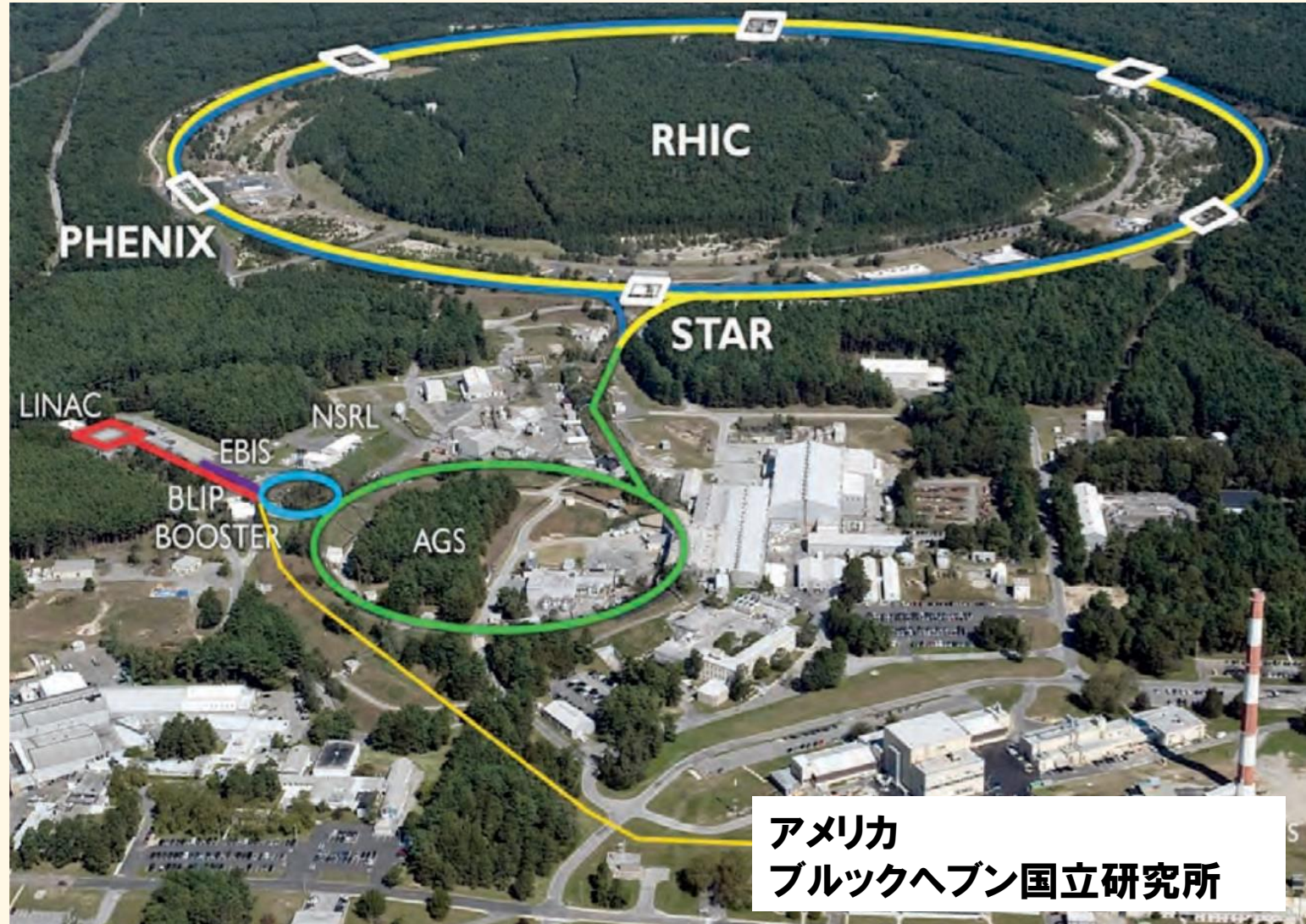


陽子

陽子

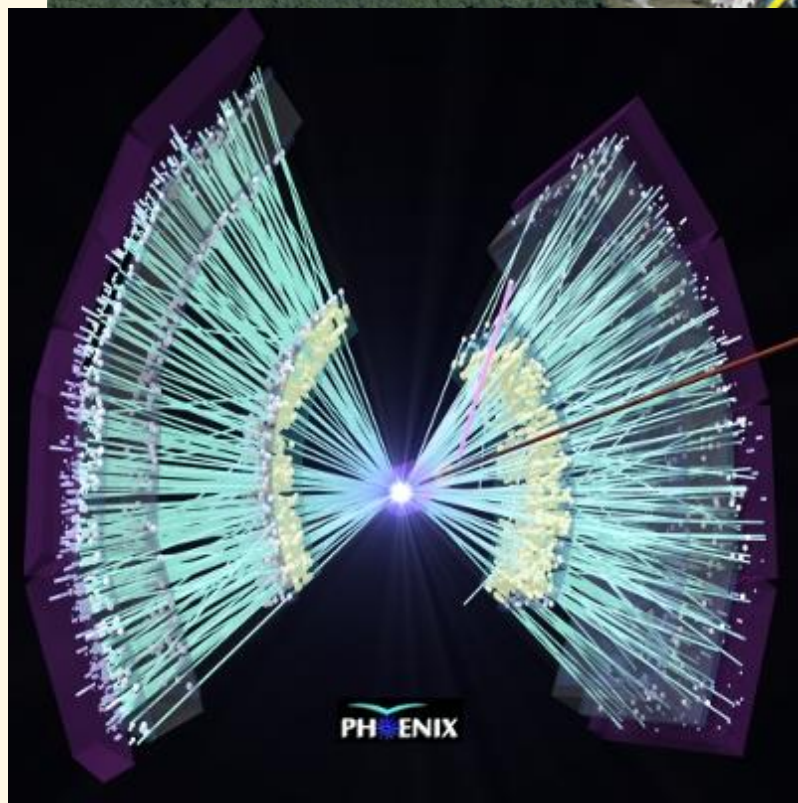
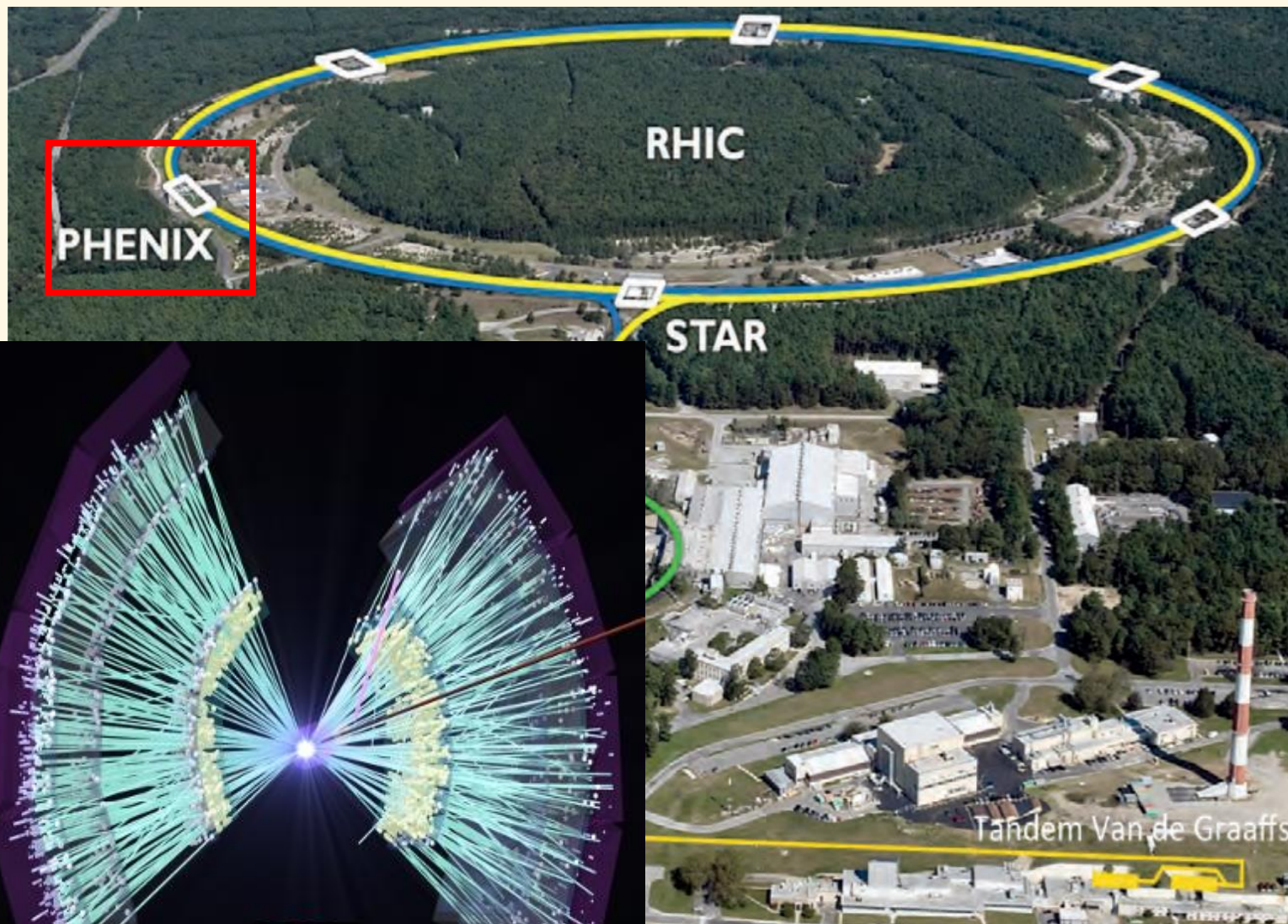
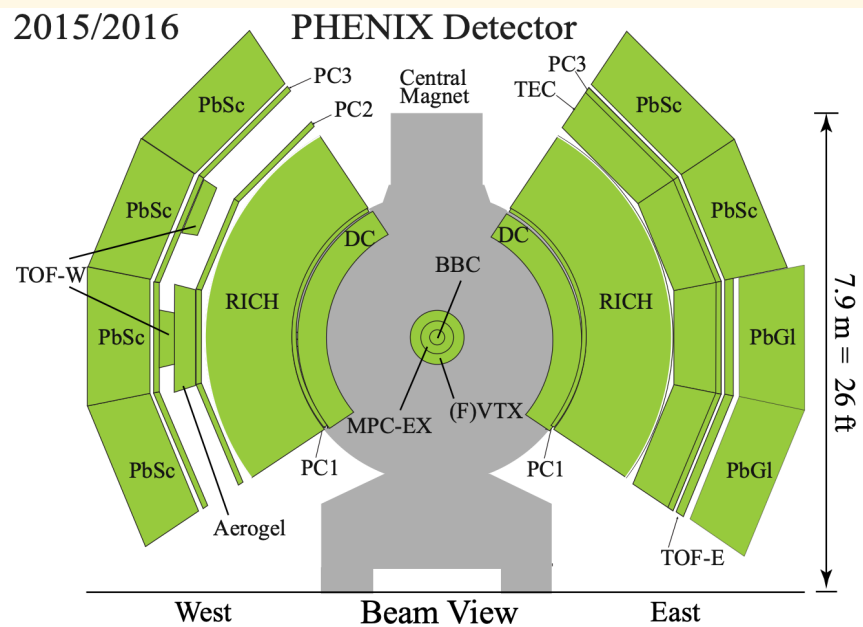
高エネルギー陽子衝突

→ QGPは生成されないが
金原子核衝突の比較対象となり
QGP物理の**ベースライン**



アメリカ
ブルックヘブン国立研究所

PHENIX実験



ビーム衝突点近傍に、さまざまな役割を持つ検出器群を配置。

PHENIX実験は2016年に終了。

本研究はPHENIXが取得したデータ解析

QGP物性の測定するためのプローブ～重いクォーク～

PHNEIX実験当初の目標 ⇒ QGPを発見すること。数多くの実験的証拠により達成済み。

現在の目標 ⇒ QGP中のパートンのエネルギー損失量やQGPの粘性といったQGPの**物性**を理解したい。

QGP物性の測定するためのプローブ～重いクォーク～

PHNEIX実験当初の目標 ⇒ QGPを発見すること。数多くの実験的証拠により達成済み。

現在の目標 ⇒ QGP中のパートンのエネルギー損失量やQGPの粘性といったQGPの**物性**を理解したい。

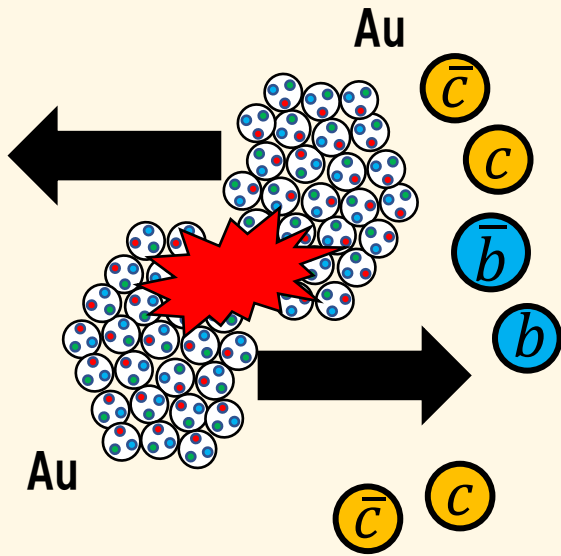
チャームやボトムクォークといった**重いクォーク**がQGP物性を測定する上で非常に良いプローブになる。

QGP物性の測定するためのプローブ～重いクォーク～

PHNEIX実験当初の目標 ⇒ QGPを発見すること。数多くの実験的証拠により達成済み。

現在の目標 ⇒ QGP中のパートンのエネルギー損失量やQGPの粘性といったQGPの**物性**を理解したい。

チャームやボトムクォークといった**重いクォーク**がQGP物性を測定する上で非常に良いプローブになる。



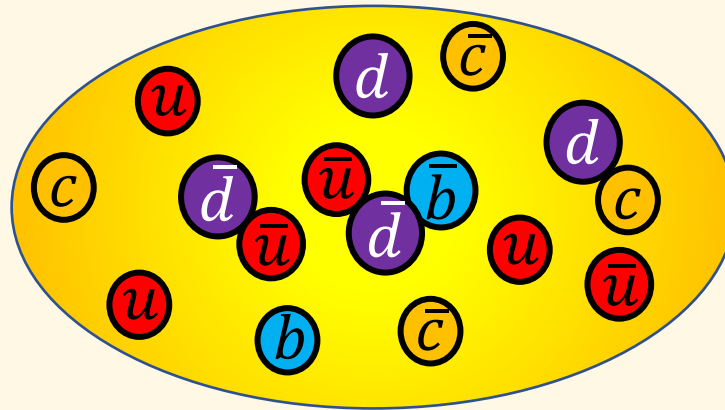
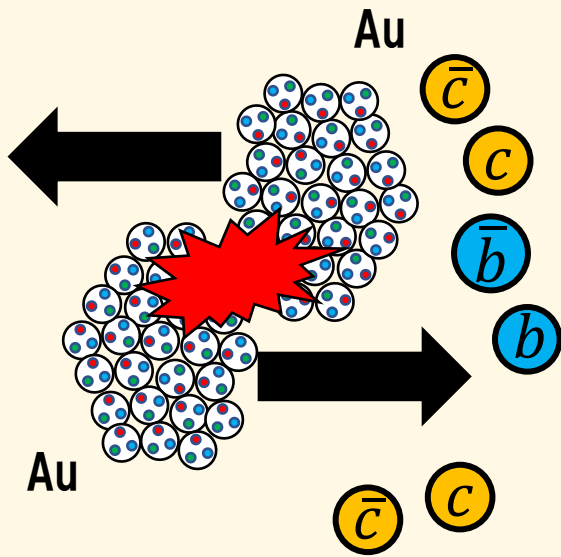
重いクォークは
反応初期に作られる。

QGP物性の測定するためのプローブ～重いクォーク～

PHNEIX実験当初の目標 ⇒ QGPを発見すること。数多くの実験的証拠により達成済み。

現在の目標 ⇒ QGP中のパートンのエネルギー損失量やQGPの粘性といったQGPの物性を理解したい。

チャームやボトムクォークといった**重いクォーク**がQGP物性を測定する上で非常に良いプローブになる。



QGP と 相互作用

$$\begin{aligned} m_c &\approx 1.3 \text{ GeV} \\ m_b &\approx 4.2 \text{ GeV} \end{aligned} \gg T_{QGP} \approx 400 \text{ MeV}$$

重いクォークは
反応初期に作られる。

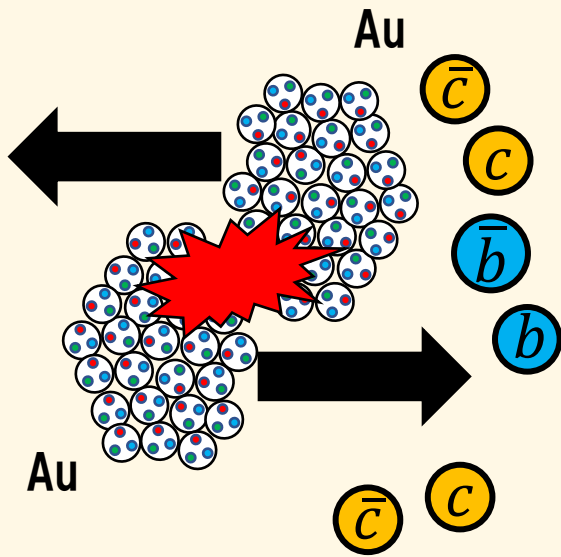
QGPの熱エネルギーでは重いクォーク対を生成できない。
重いクォーク対は数が非常に少ないので対消滅も滅多に起きない。

QGP物性の測定するためのプローブ～重いクォーク～

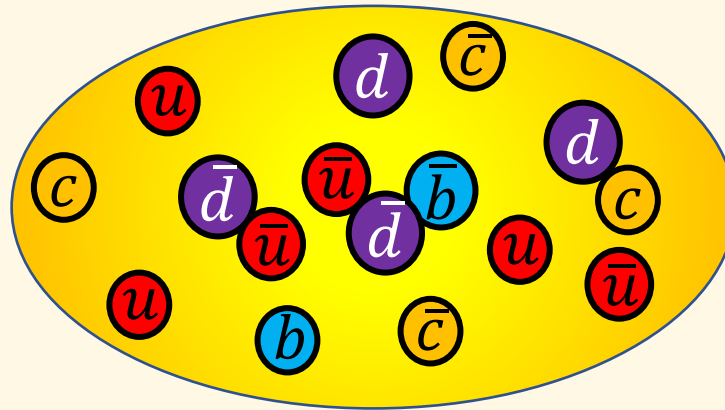
PHNEIX実験当初の目標 ⇒ QGPを発見すること。数多くの実験的証拠により達成済み。

現在の目標 ⇒ QGP中のパートンのエネルギー損失量やQGPの粘性といったQGPの**物性**を理解したい。

チャームやボトムクォークといった**重いクォーク**がQGP物性を測定する上で非常に良いプローブになる。



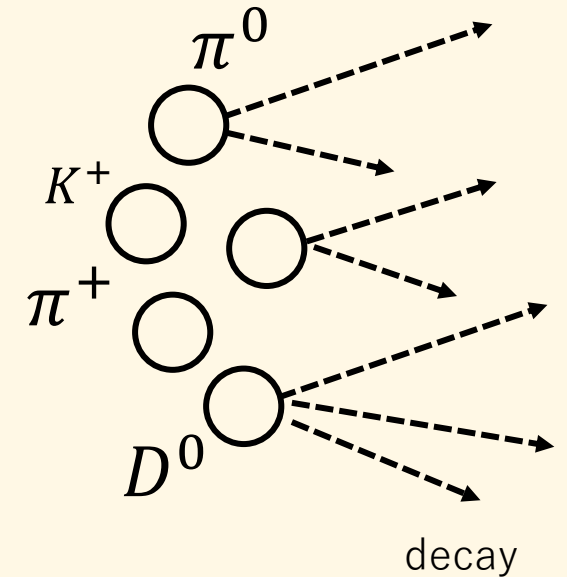
重いクォークは
反応初期に作られる。



QGP と 相互作用

$$\begin{aligned} m_c &\approx 1.3 \text{ GeV} \\ m_b &\approx 4.2 \text{ GeV} \end{aligned} \gg T_{QGP} \approx 400 \text{ MeV}$$

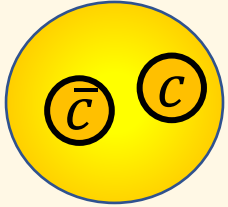
QGPの熱エネルギーでは重いクォーク対を生成できない。
重いクォーク対は数が非常に少ないので対消滅も滅多に起きない。



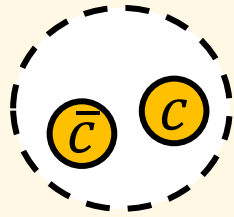
ハドロンガス

重いクォークの測定方法

Au+Au

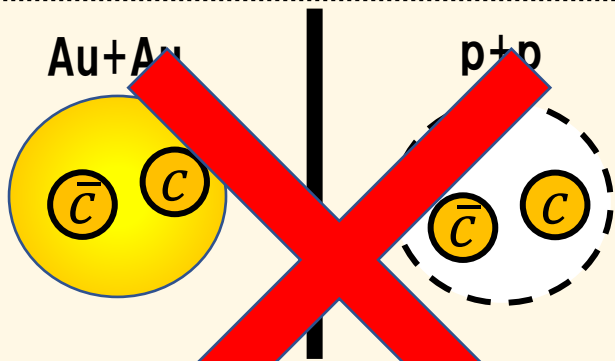


p+p



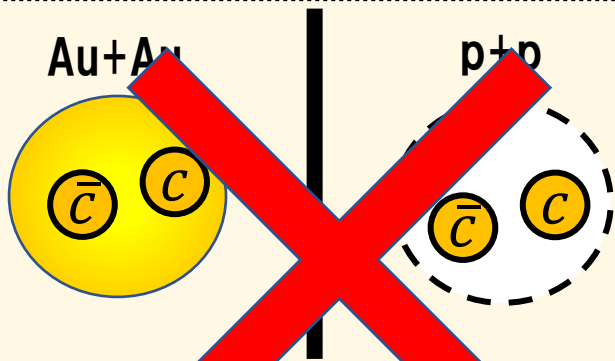
測定器でチャームクォークの運動量を直接測定し、
Au+Auとp+pで比較。

重いクォークの測定方法

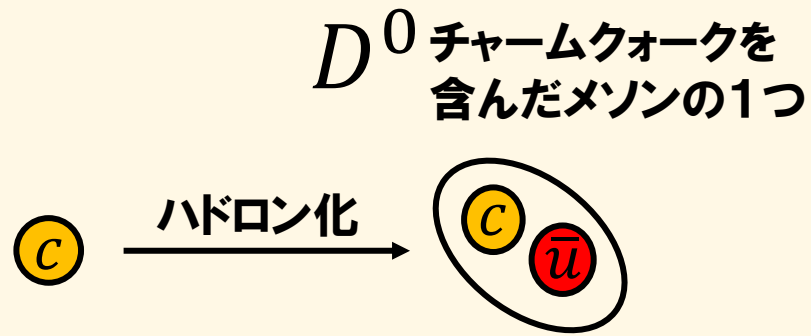


測定器でチャームクォークの運動量を直接測定し、
Au+Auとp+pで比較。

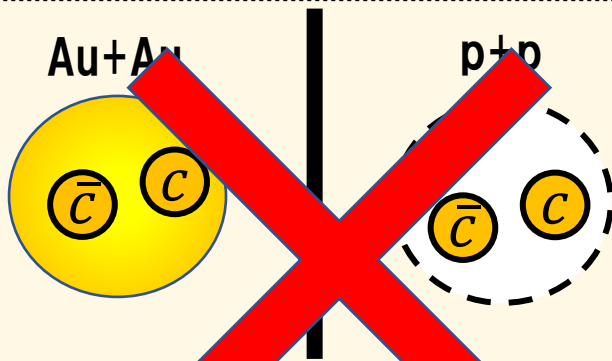
重いクォークの測定方法



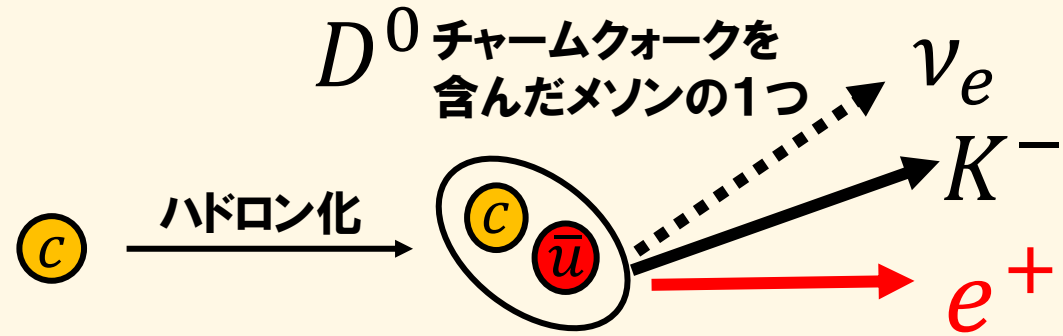
測定器でチャームクォークの運動量を直接測定し、
Au+Auとp+pで比較。



重いクォークの測定方法

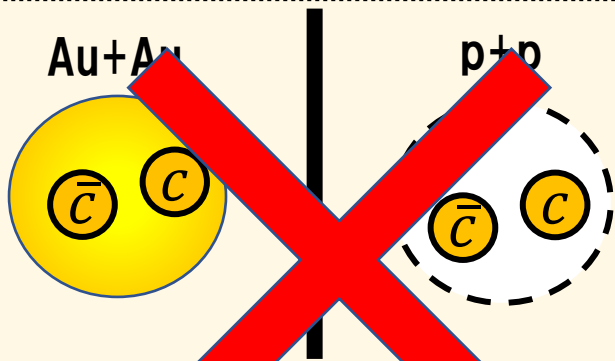


測定器でチャームクォークの運動量を直接測定し、
Au+Auとp+pで比較。

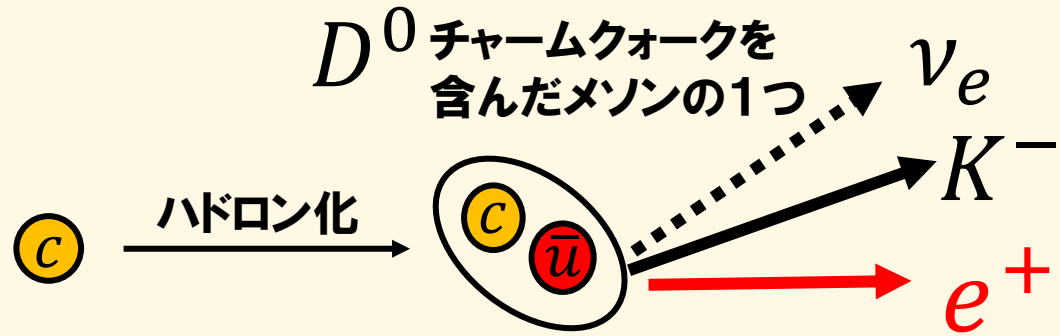


PHNEIXでは3体崩壊して出てくる(陽)電子を測定することで
 D^0 メソンを間接的に測定してきた。

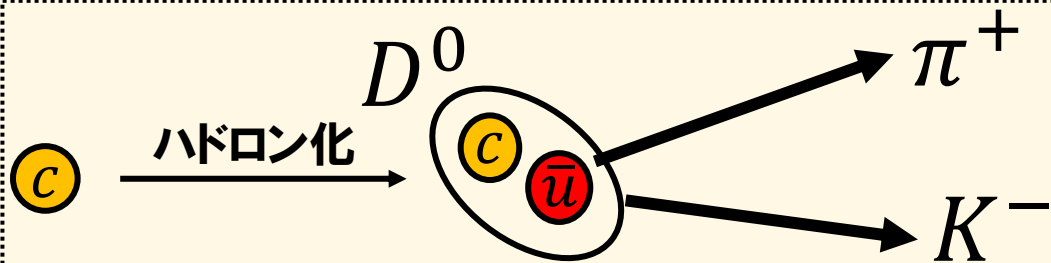
重いクォークの測定方法



測定器でチャームクォークの運動量を直接測定し、Au+Auとp+pで比較。

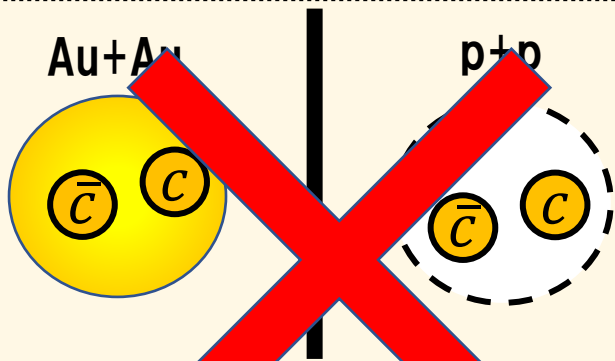


PHNEIXでは3体崩壊して出てくる(陽)電子を測定することで D^0 メソンを**間接的**に測定してきた。

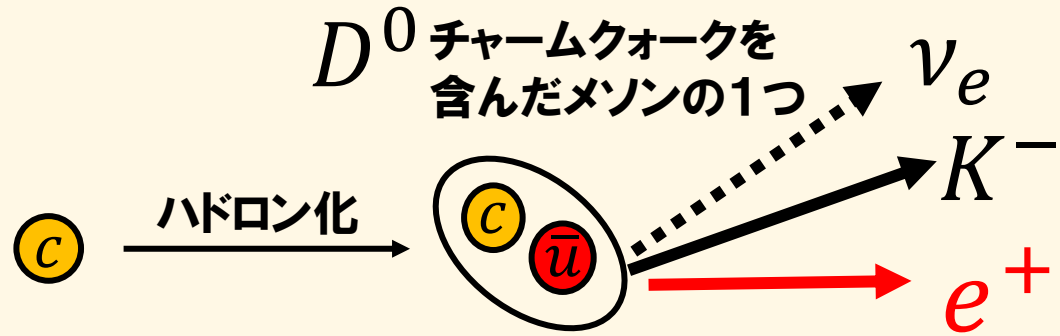


2体崩壊して出てくるパイオンとケイオンをもちいて D^0 メソンを再構成することで**直接的に測定**する方法がある。

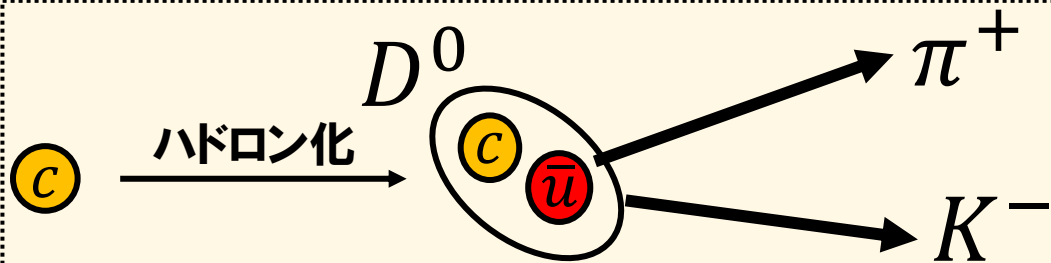
重いクォークの測定方法



測定器でチャームクォークの運動量を直接測定し、Au+Auとp+pで比較。



PHNEIXでは3体崩壊して出てくる(陽)電子を測定することで D^0 メソンを間接的に測定してきた。



2体崩壊して出てくるパイオンとケイオンをもちいて D^0 メソンを再構成することで直接的に測定する方法がある。

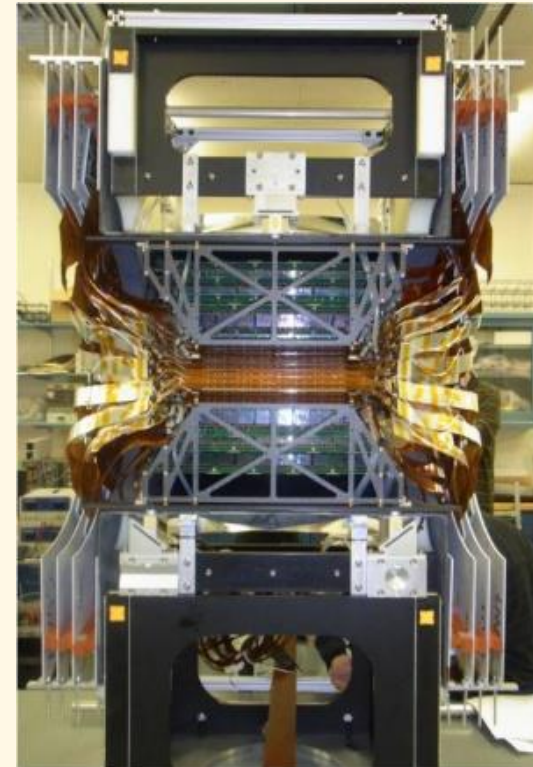
PHENIXでは、この崩壊モードでの D^0 メソン測定は確立していない。

本研究の目的

- QGP物性を明らかにする上でチャームクォークを持つ D^0 メソンを測定することは非常に重要であるが、PHENIXでは D^0 メソンを再構成することはできていない。

本研究の目的

- QGP物性を明らかにする上でチャームクォークを持つ D^0 メソンを測定することは非常に重要であるが、PHENIXでは D^0 メソンを再構成することはできていない。
- D^0 メソンを再構成するためには後に紹介する崩壊長の測定が必須である。
⇒PHENIXでは崩壊長を測定するために2011年にシリコン検出器 (VTX) をインストール。



本研究の目的

- QGP物性を明らかにする上でチャームクォークを持つ D^0 メソンを測定することは非常に重要であるが、PHENIXでは D^0 メソンを再構成することはできていない。
- D^0 メソンを再構成するためには後に紹介する崩壊長の測定が必須である。
⇒PHENIXでは崩壊長を測定するために2011年にシリコン検出器 (VTX) をインストール。
- これによりPHENIXで D^0 メソンを再構成できる可能性が生まれた。
そこで本研究の目的は2015年に取得されたp+pのデータを解析し、 D^0 メソンを再構成に挑戦した。

D^0 メソン再構成に向けた解析アウトライン

- PHENIX検出器について。

- D^0 メソン再構成の方法

1. 不変質量の計算

K^* メソンの再構成 ($K^* \rightarrow \pi^\pm + K^\mp$)

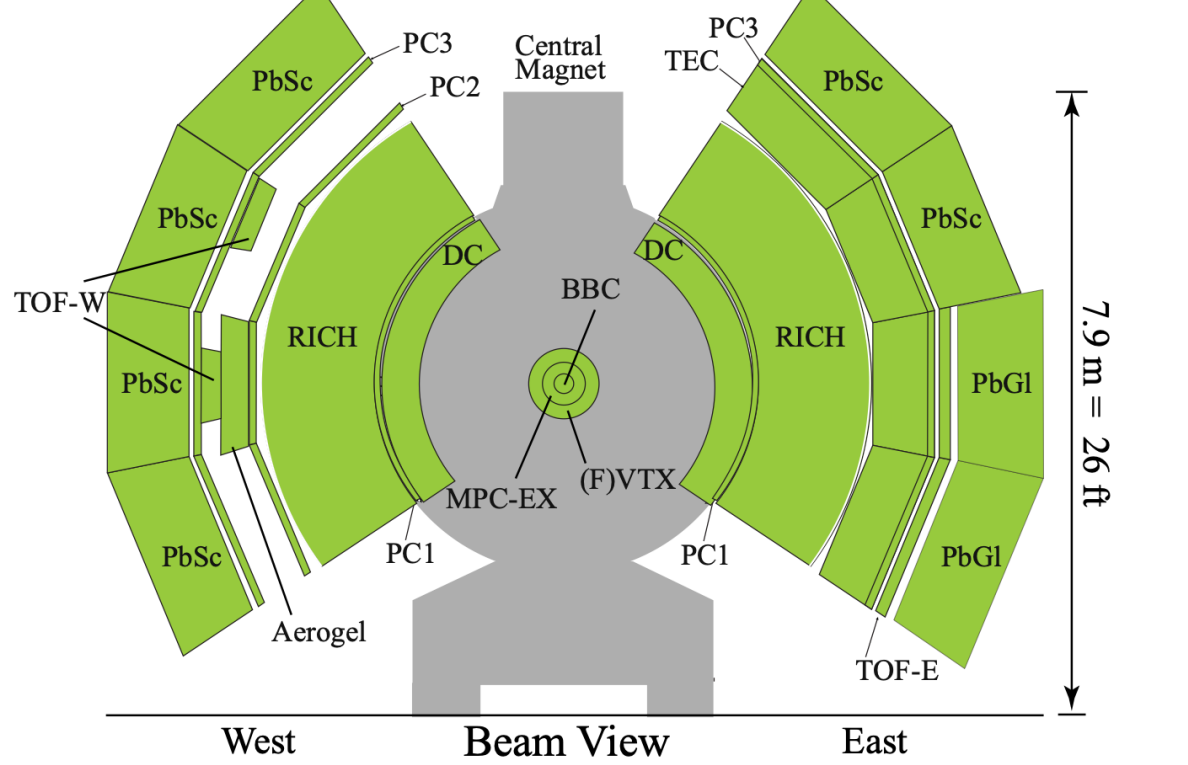
2. 崩壊長の決定し、崩壊長による解析カット K_S メソンの再構成 ($K_S \rightarrow \pi^+ + \pi^-$)

- D^0 メソン再構成の結果

PHENIX測定器

2015/2016

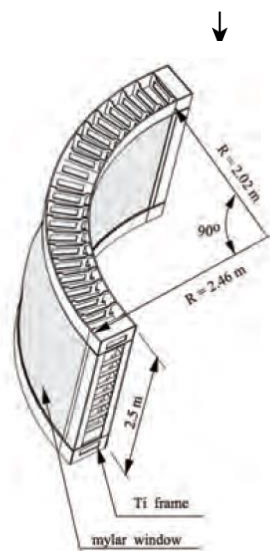
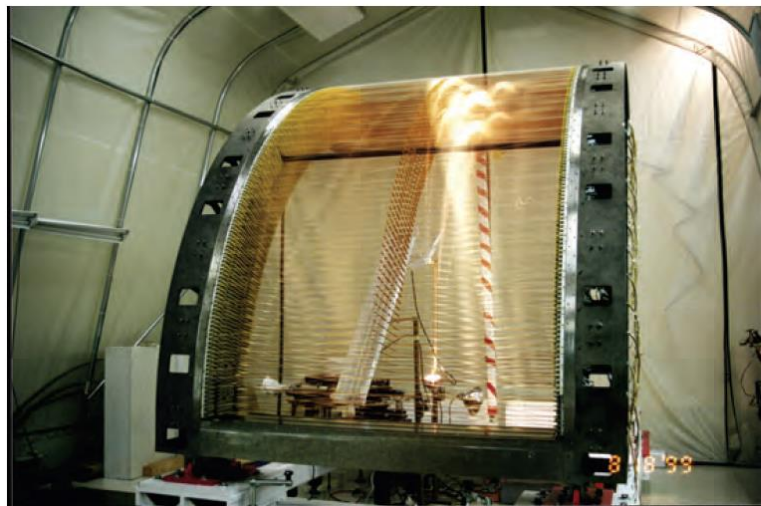
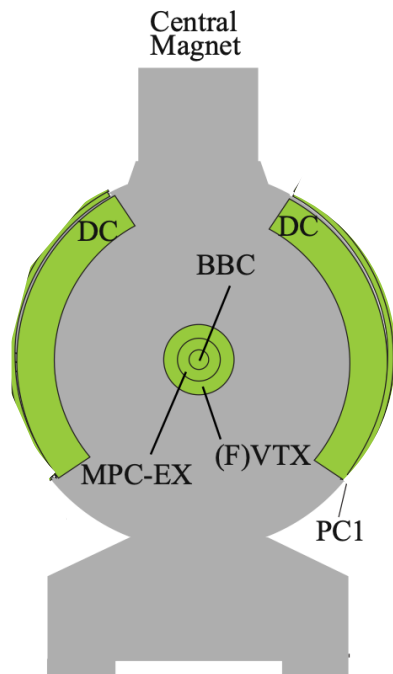
PHENIX Detector



PHENIX測定器

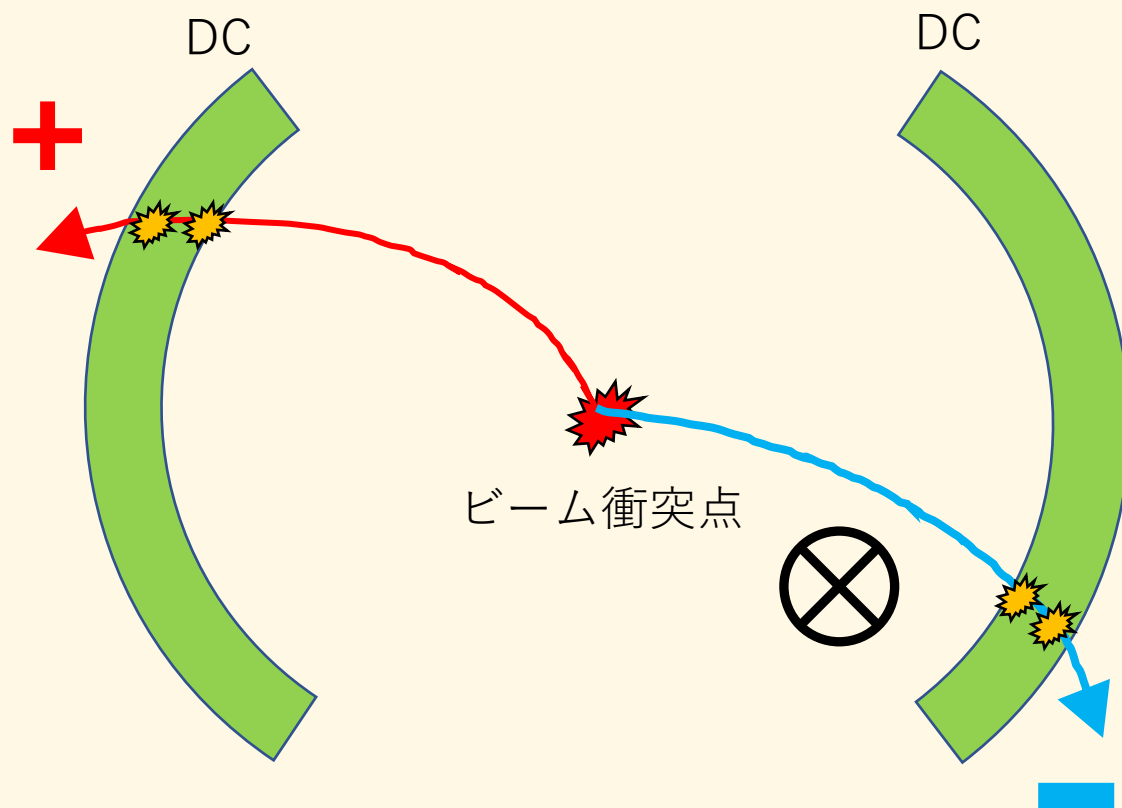
2015/2016

PHENIX Detector



1. Drift Chamber (DC)

磁場中の荷電粒子をトラッキングし、
その曲がり具合から粒子の**運動量**を測定する。

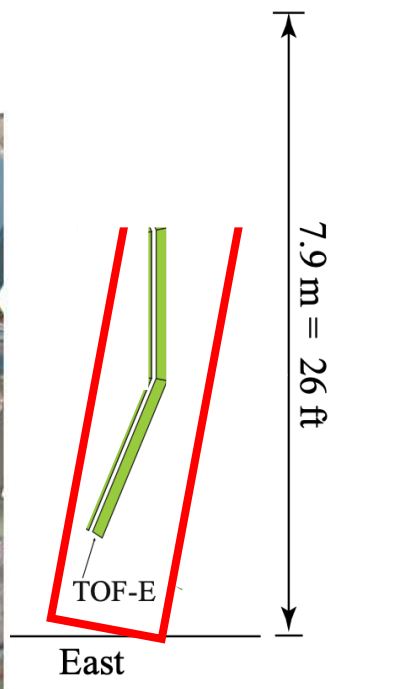


PHENIX測定器

2015/2016

PHENIX Detector

Central
Magnet



1. Drift Chamber (DC)

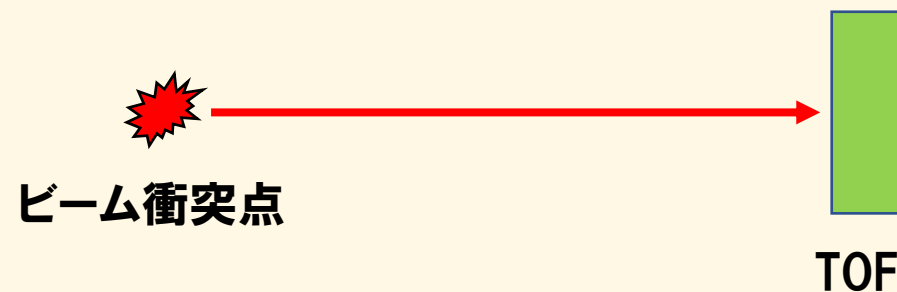
磁場中の荷電粒子をトラッキングし、その曲がり具合から粒子の**運動量**を測定する。

2. Time of flight(TOF)

ハドロン粒子識別装置。
ビーム衝突点からTOFまでの時間を測定することで**速度**
 β を求める。

$$\frac{m^2}{p^2} = \frac{1}{\beta^2} - 1$$

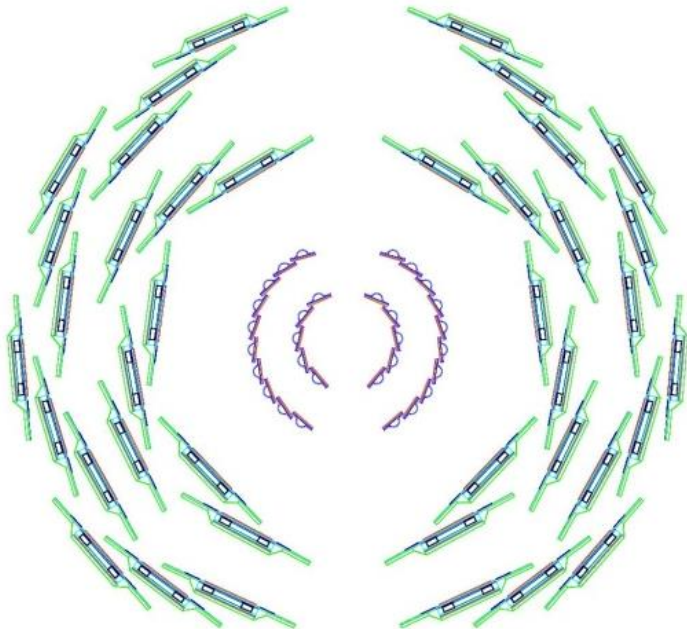
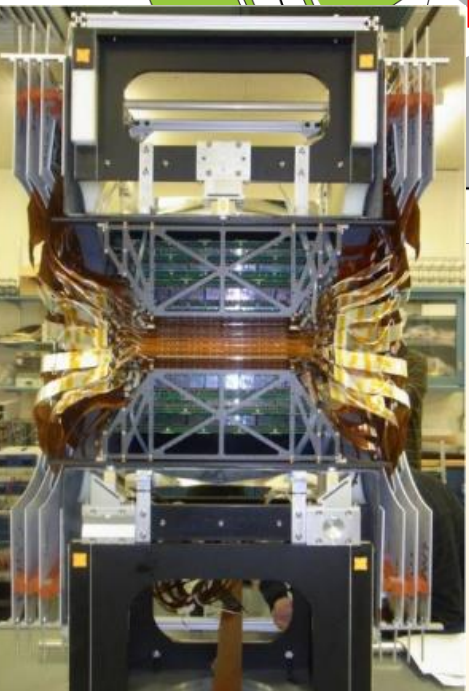
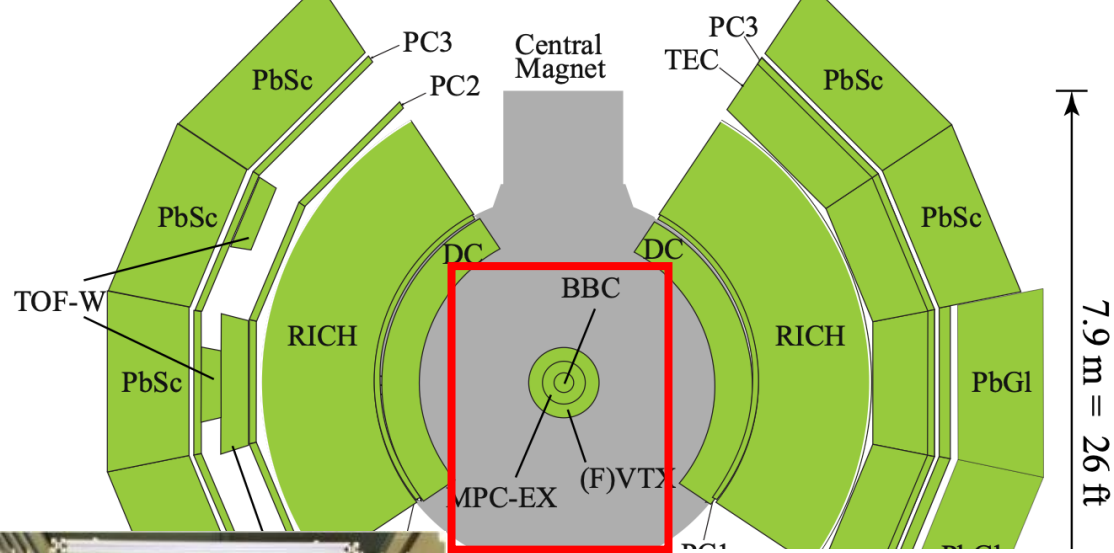
という関係式からハドロン質量を求めることでIDする。



PHENIX測定器

2015/2016

PHENIX Detector



1. Drift Chamber (DC)

磁場中の荷電粒子をトラッキングし、その曲がり具合から粒子の**運動量**を測定する。

2. Time of flight (TOF)

ハドロン粒子識別装置。
ビーム衝突点からTOFまでの時間を測定することで**速度**
 β を求める。

$$\frac{m^2}{p^2} = \frac{1}{\beta^2} - 1$$

という関係式からハドロン質量を求めることでIDする。

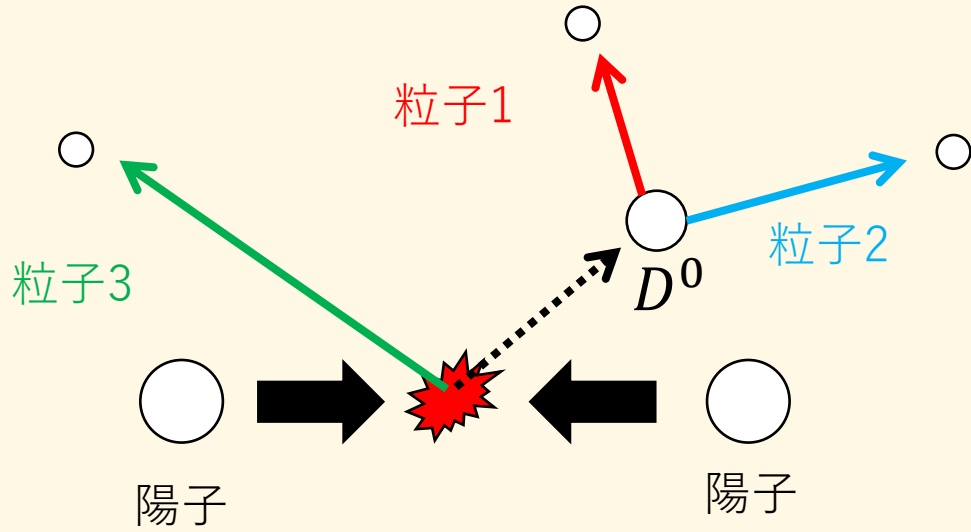
3. Silicon Vertex Tracker (VTX)

重クォーク測定のために2010年にインストール。
ビーム衝突点から崩壊点までの長さ(**崩壊長**)を
測定することで重クォークを測定する。

再構成 (不変質量)

D^0 の質量 1.86GeV

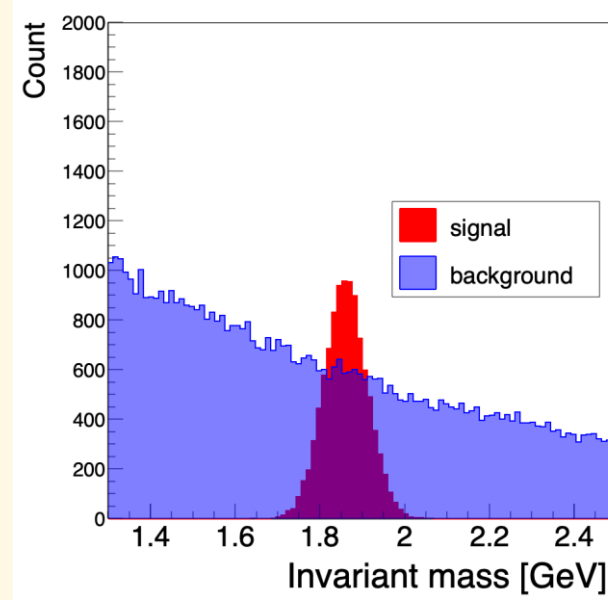
検出器が測定できるのは、decay後の娘粒子
→興味があるのは親粒子



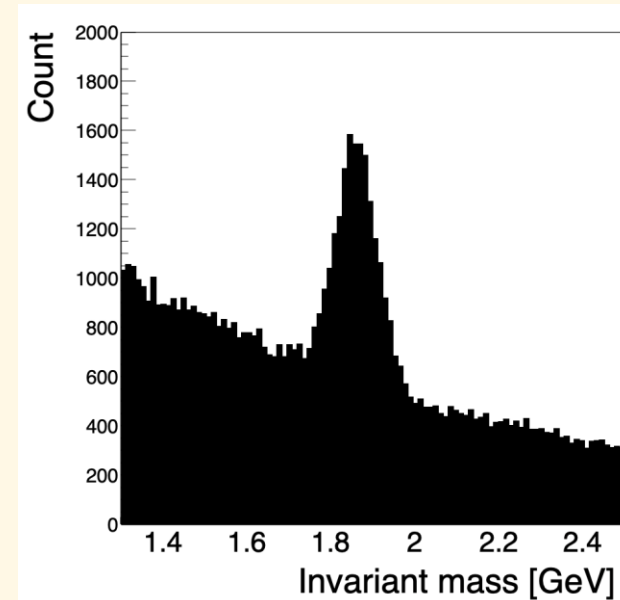
$$M_{ij} = \sqrt{(E_i + E_j)^2 - (\mathbf{p}_i + \mathbf{p}_j)^2}$$

粒子1と粒子2のペアで不変質量を計算 → $M_{12} = D^0$ の質量
粒子1と粒子3のペアで不変質量を計算 → $M_{13} =$ ランダムな値

娘粒子の組みから親粒子の質量がわかる
→ 測定できる娘粒子から親の粒子が決定できる。



signal → D^0 のペア
background → 無関係なペア



測定される不変質量分布の
予想図 (イメージ図)

本研究の目標

陽子-陽子衝突での D^0 の再構成を目標にする。

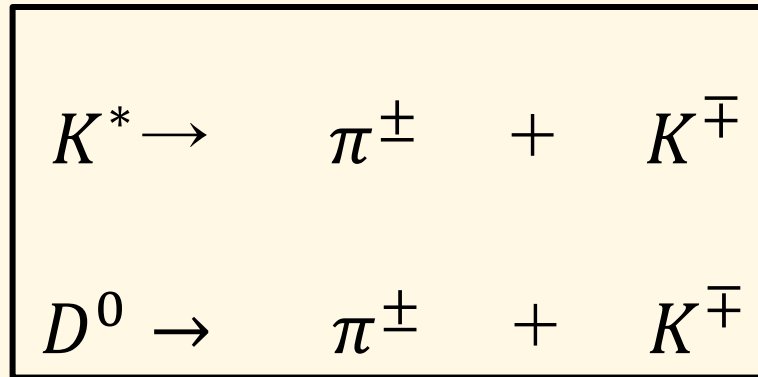
→ 不変質量分布にピークを見出すこと

K^* の再構成

- 不変質量で親粒子を再構成することを学ぶために **K^* の再構成**を行った。

K^* を選んだ理由

- 今回注目している D^0 の崩壊モードと同じ崩壊モードを持つ。

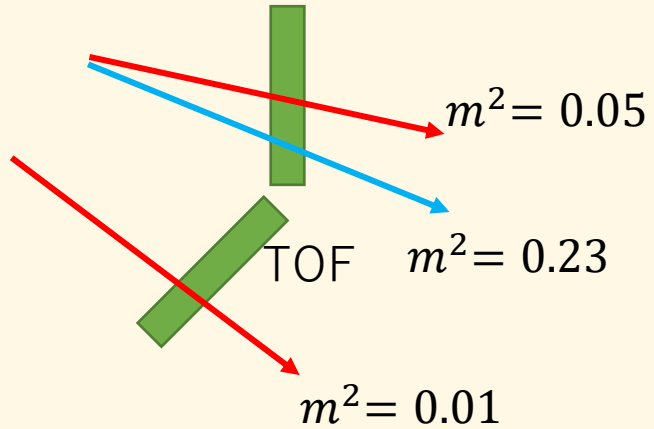


- K^* のcross-sectionは D^0 の約1000倍。ピークを見出しやすく、PHNEIXではすでに K^* の不変質量ピークの観測に成功している。
→正しく解析ができているか確認できる。

K^* の再構成

- 不変質量で親粒子を再構成することを学ぶために K^* の再構成を行った。

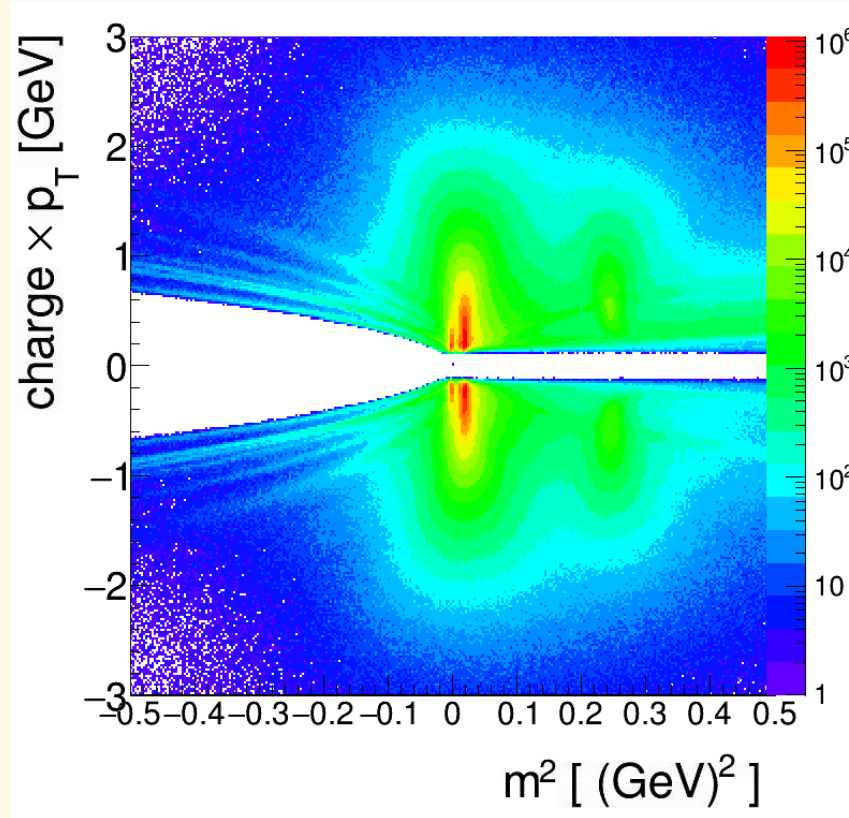
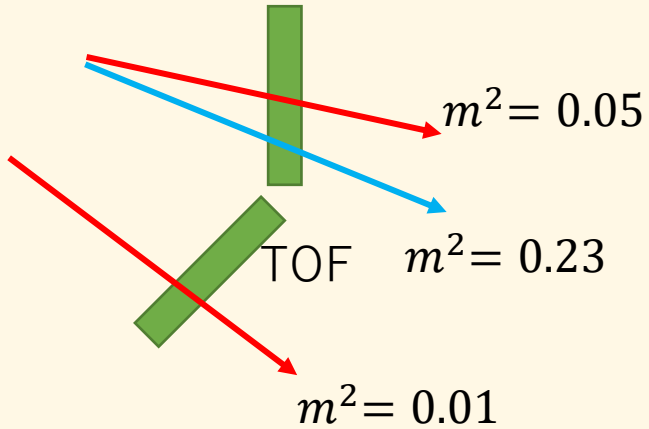
TOFが検出したトラックに注目



K^* の再構成

- 不変質量で親粒子を再構成することを学ぶために K^* の再構成を行った。

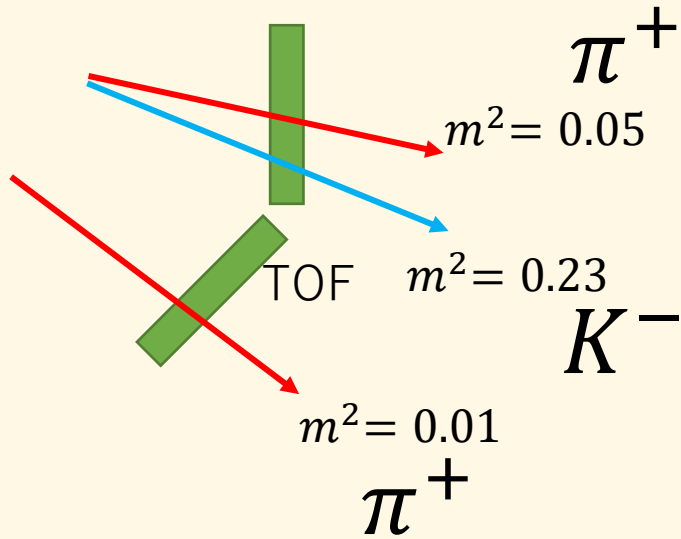
TOFが検出したトラックに注目



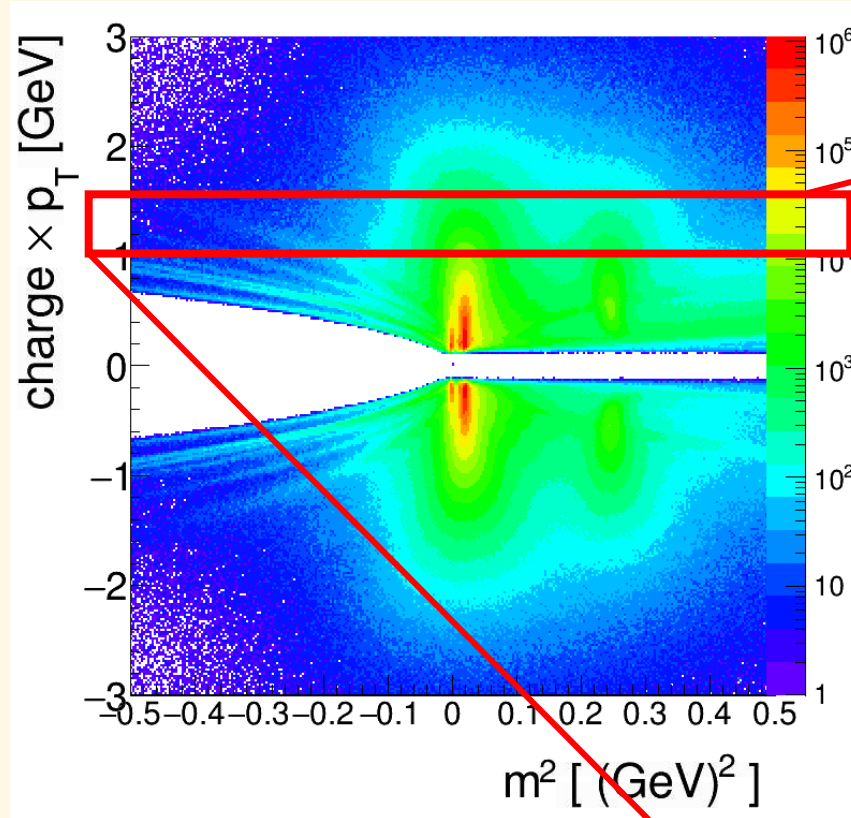
K^* の再構成

- 不変質量で親粒子を再構成することを学ぶために K^* の再構成を行った。

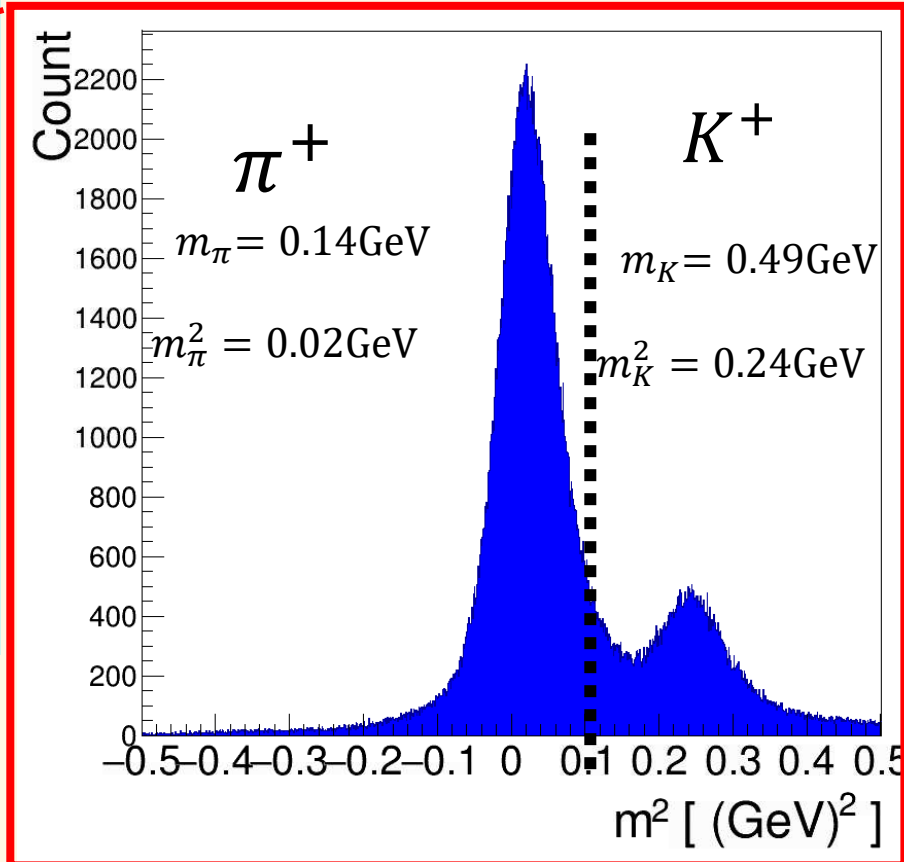
TOFが検出したトラックに注目



- TOFで測定された m^2 分布から粒子をPIDする。



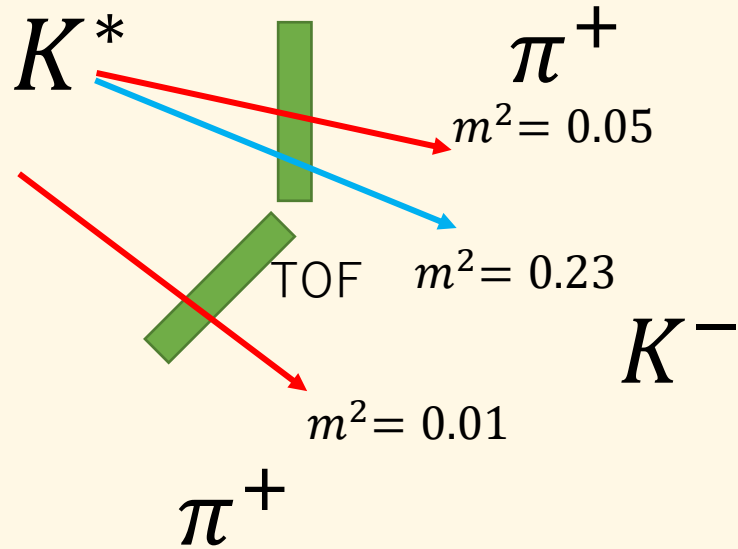
$1.5 \text{ GeV} < p_t < 1.6 \text{ GeV}$



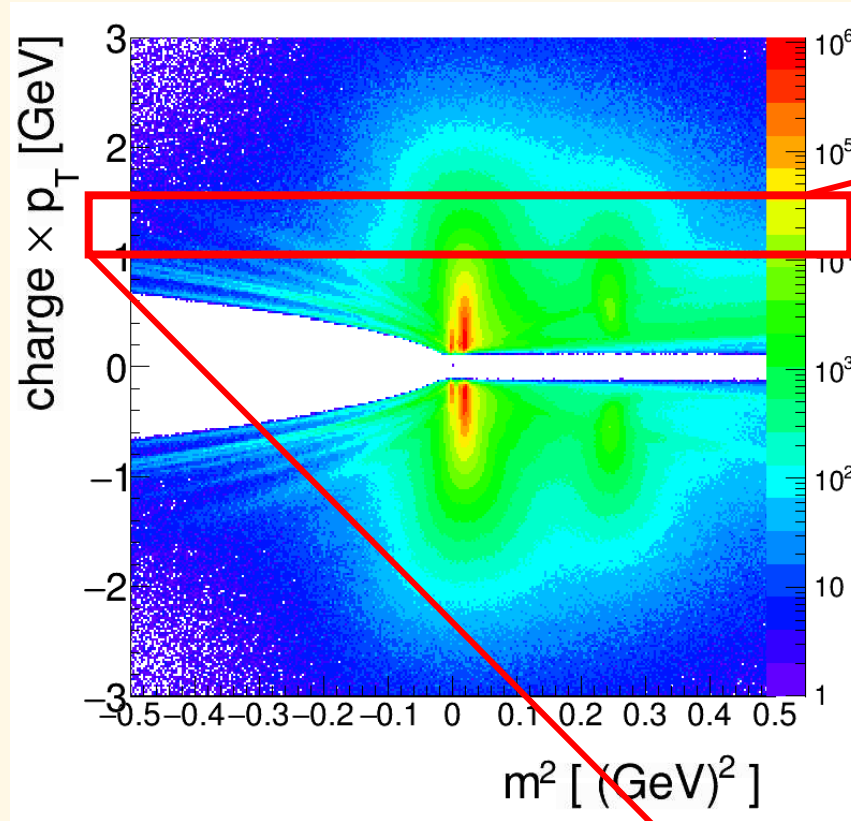
K^* の再構成

- 不変質量で親粒子を再構成することを学ぶために K^* の再構成を行った。

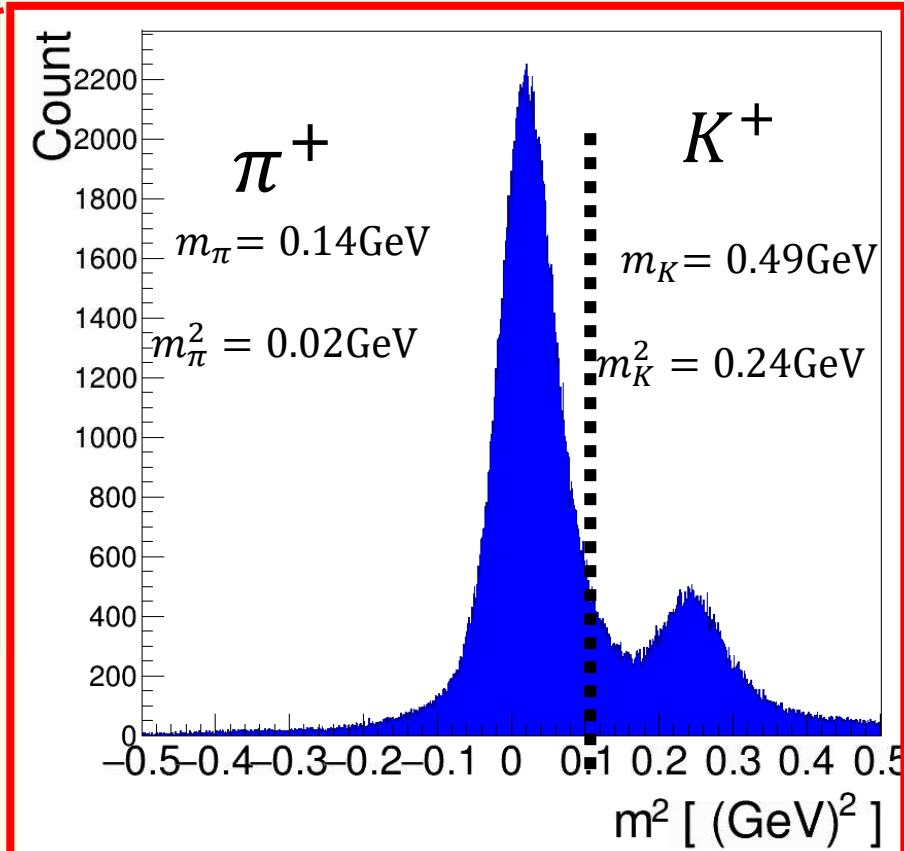
TOFが検出したトラックに注目



- TOFで測定された m^2 分布から粒子をPIDする。
- 電荷が違う π^+ と K^- 、もしくは π^- と K^+ で不変質量を計算

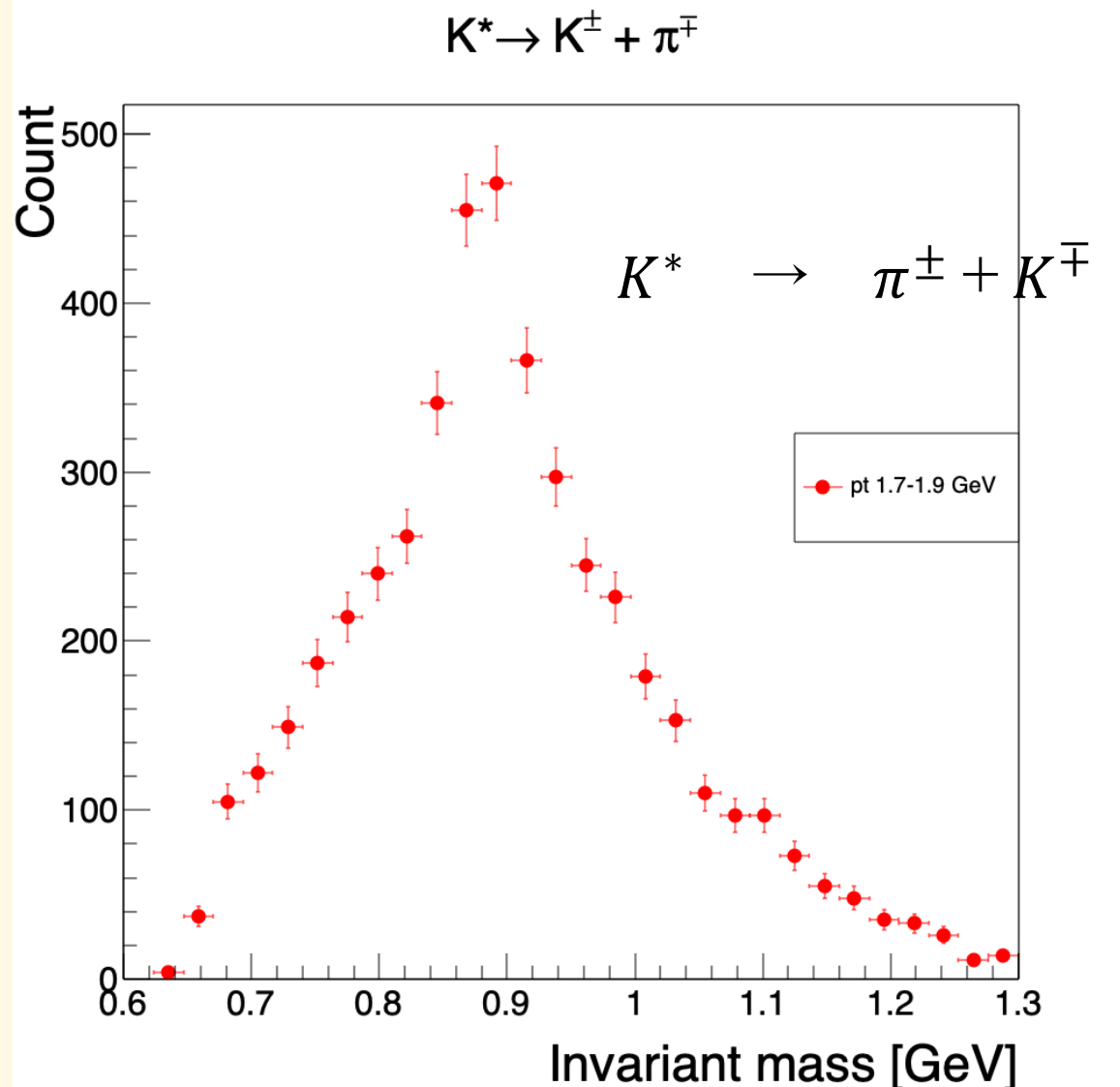
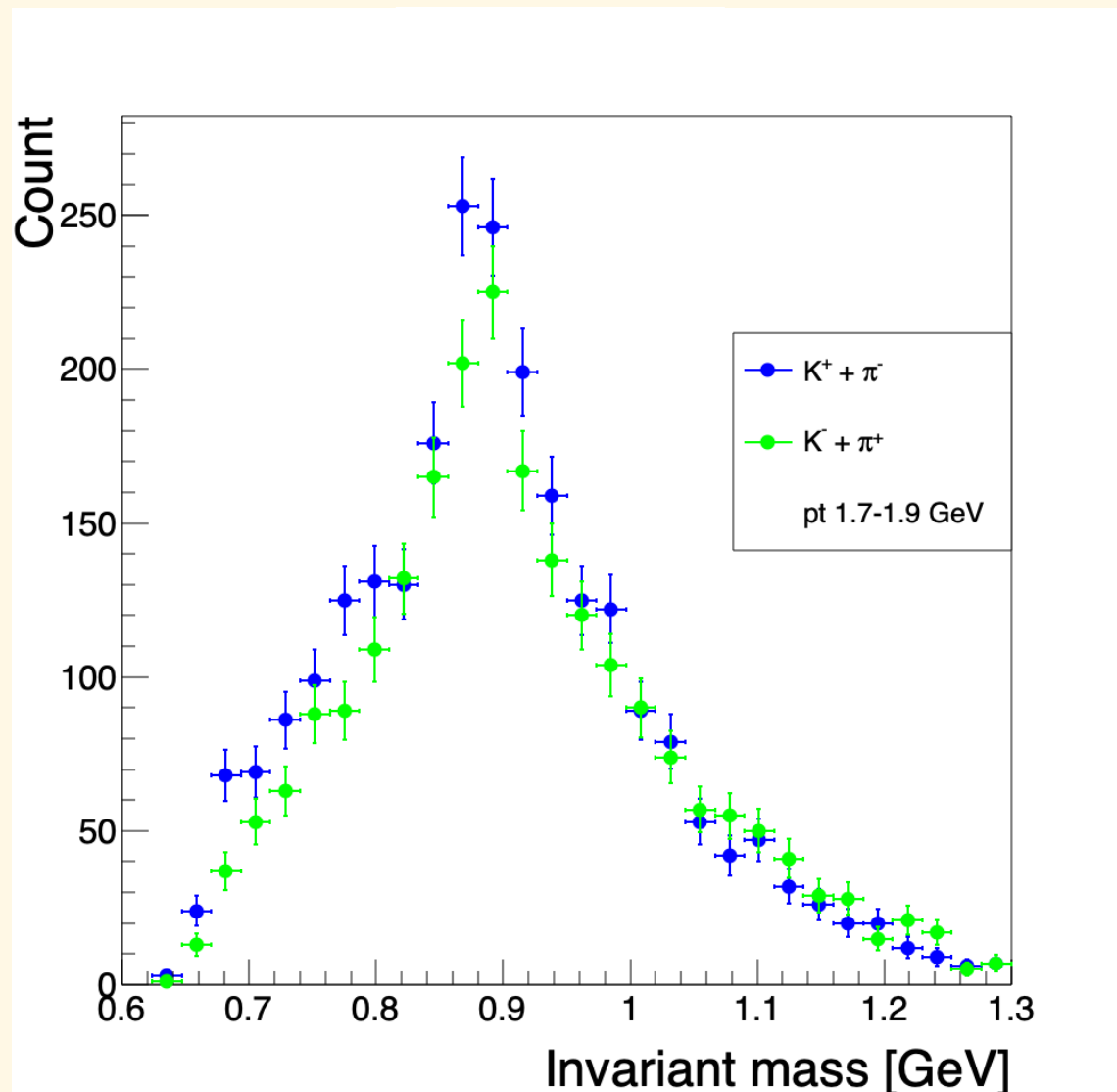


$1.5 \text{ GeV} < p_T < 1.6 \text{ GeV}$



K^* の再構成の結果

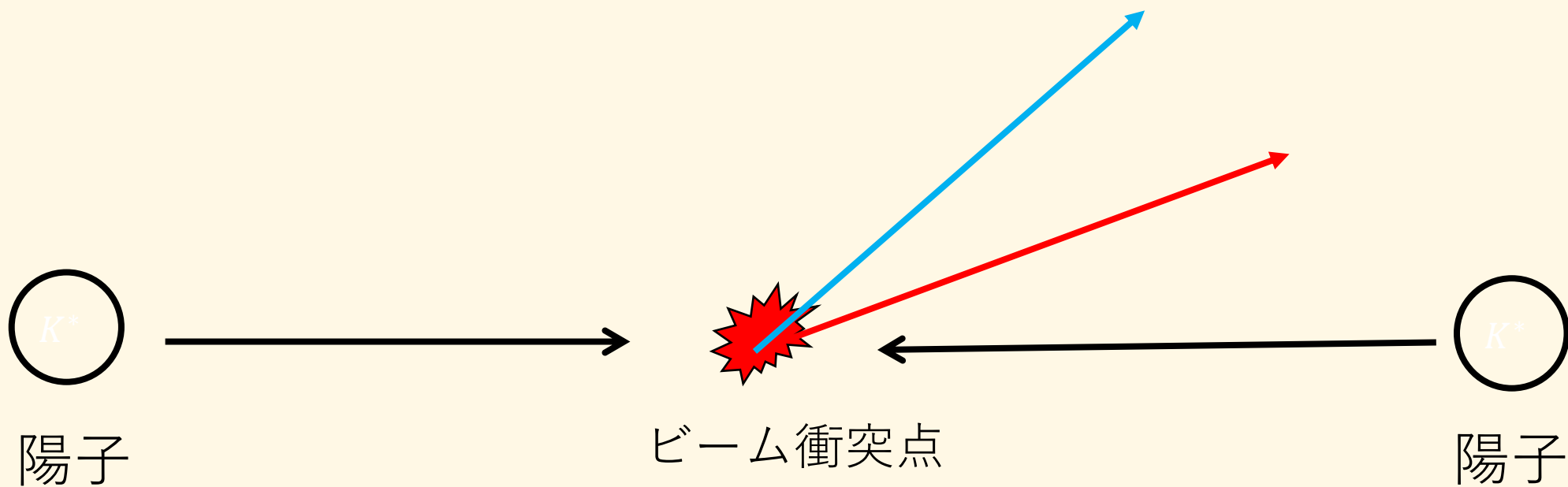
K^* の質量 0.892 GeV



不変質量を計算することで K^* のピークを見ることに成功

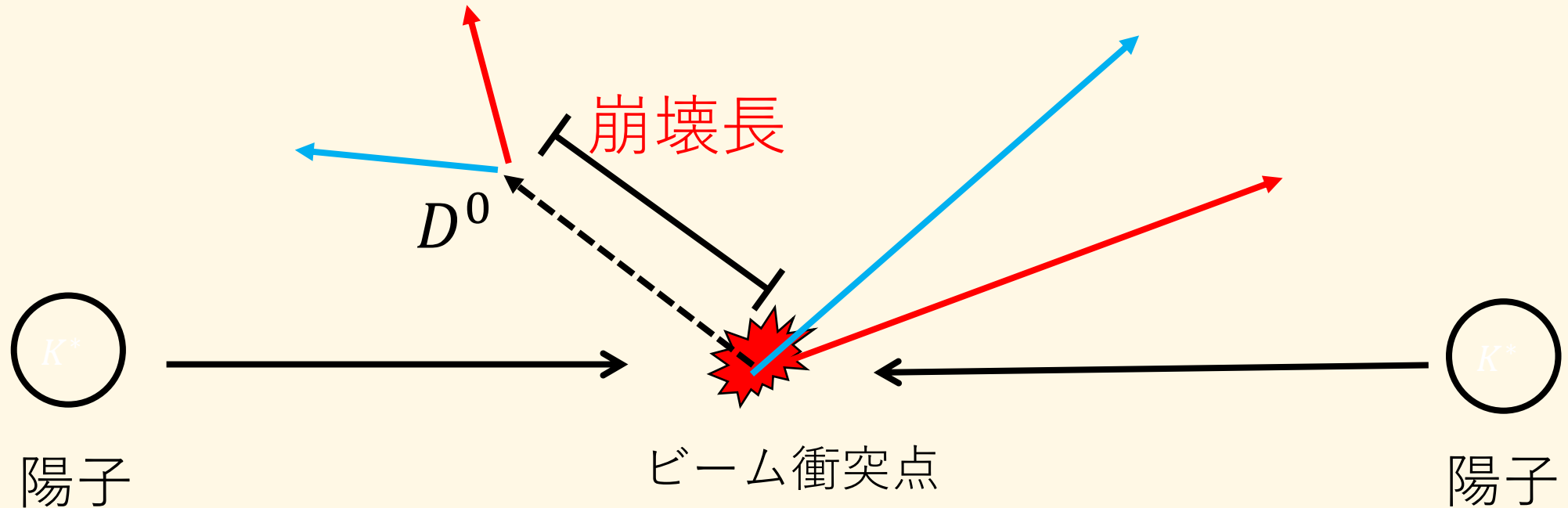
崩壊長

- ほとんどの粒子は、ビーム衝突点で発生して飛行している。



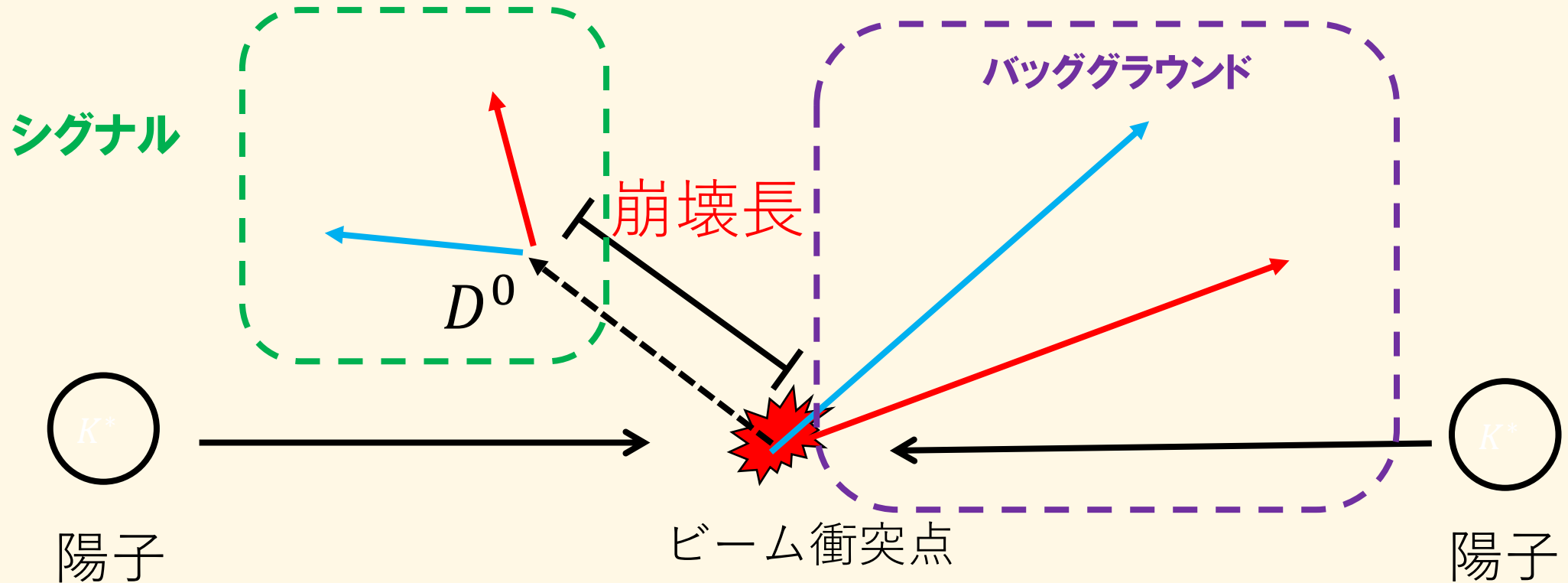
崩壊長

- ほとんどの粒子は、ビーム衝突点で発生して飛行している。
- しかし、 D^0 などはある程度飛行してから崩壊する。→**崩壊長**を持つ。

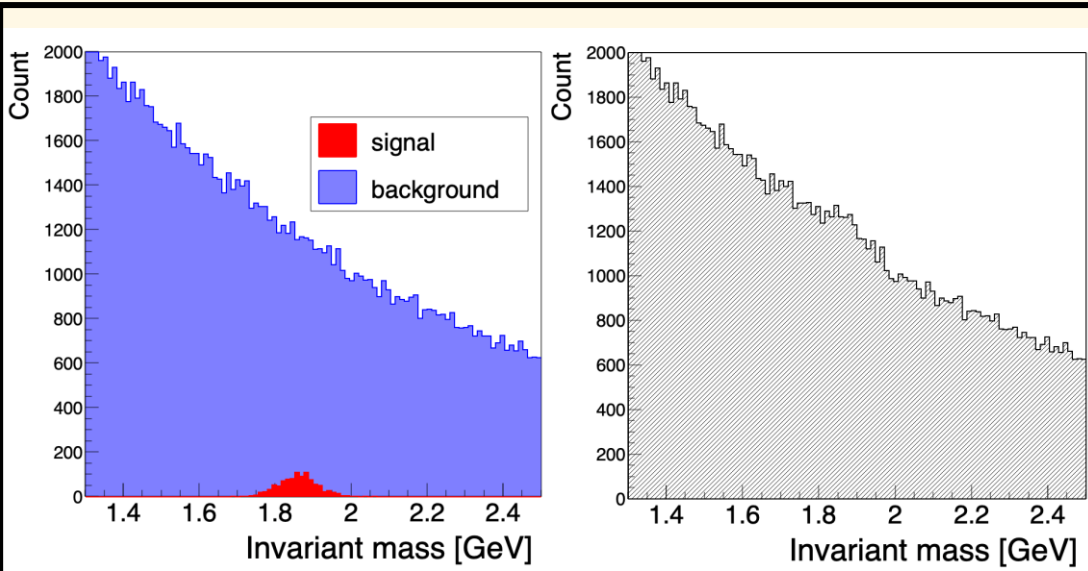


崩壊長

- ほとんどの粒子は、ビーム衝突点で発生して飛行している。
- しかし、 D^0 などはある程度飛行してから崩壊する。→**崩壊長**を持つ。
- 崩壊長を測定することでシグナルのペアとバックグラウンドのペアを区別することが可能



崩壊長による解析カット

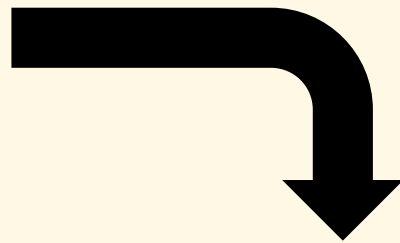
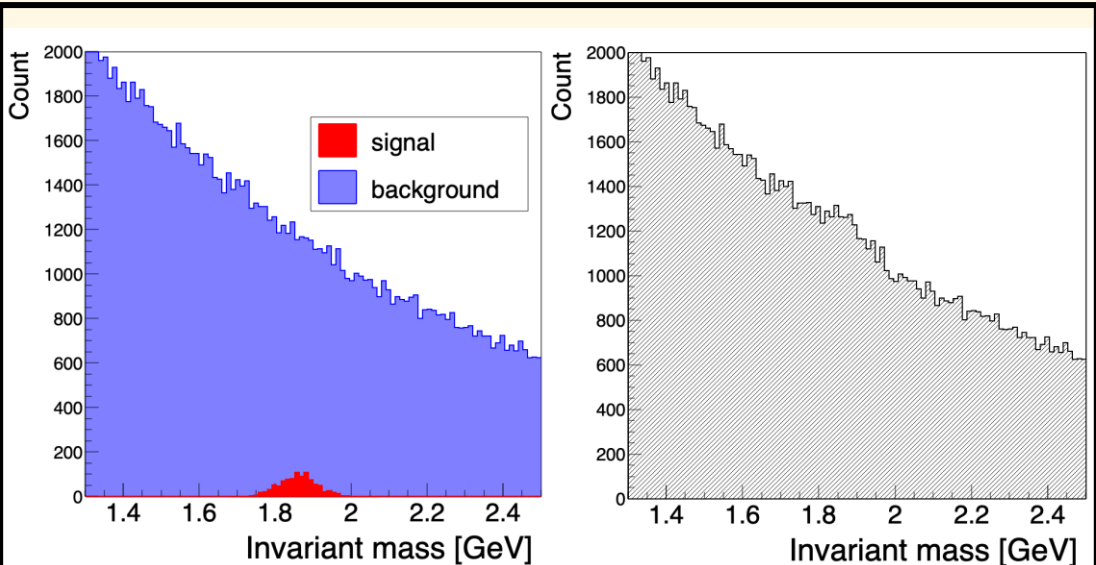


signal → D^0 のペア
background → 無関係なペア

測定される不変質量分布の
予想図 (イメージ図)

signalはbackgroundに比べて圧倒的に少ない
そのままではピークは見えない。

崩壊長による解析カット

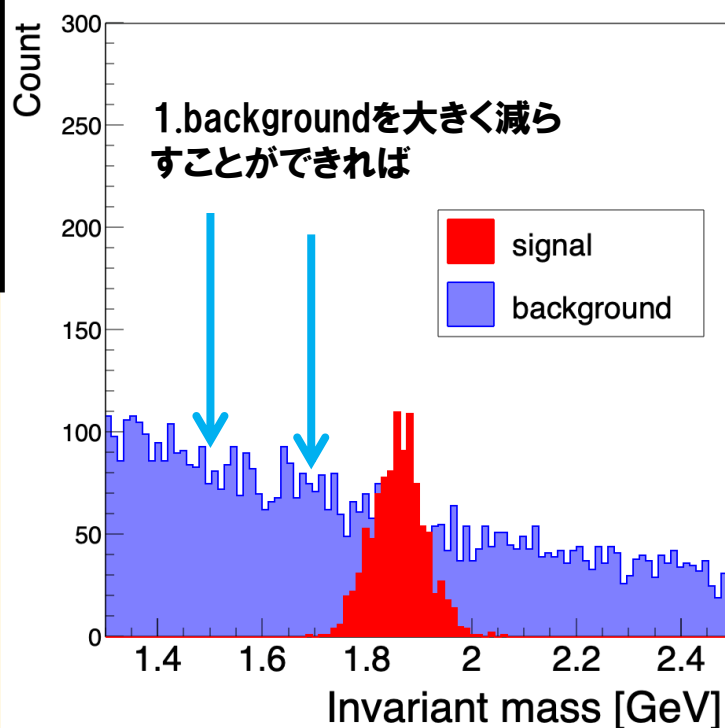


崩壊長が0では無いペアを選択する
という**解析カット**をかける。

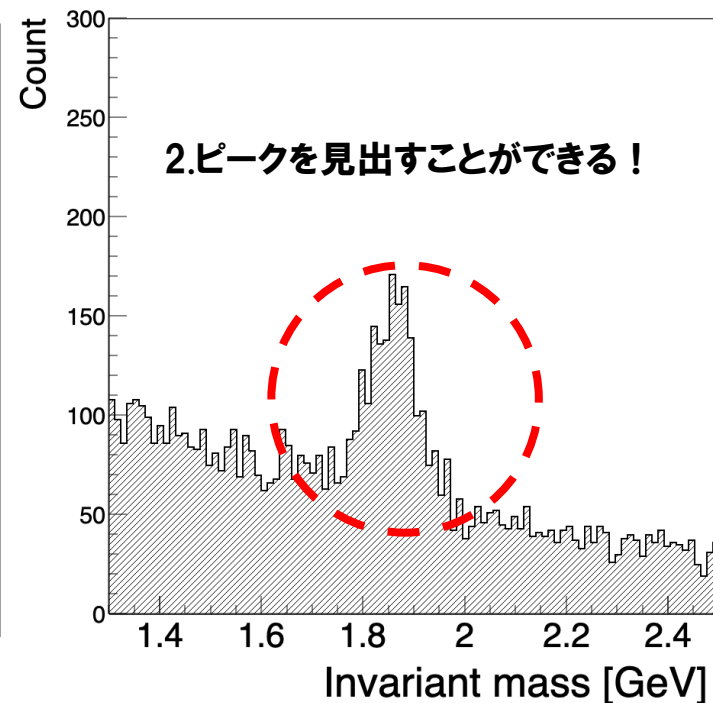
signal → D^0 のペア
background → 無関係なペア

測定される不変質量分布の
予想図 (イメージ図)

signalはbackgroundに比べて圧倒的に**少ない**
そのままではピークは見えない。



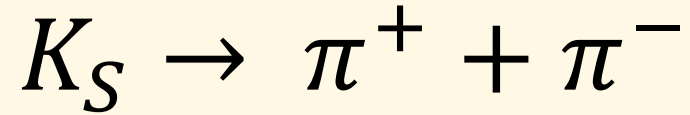
1.backgroundを大きく減ら
すことができれば



2.ピークを見出すことができる!

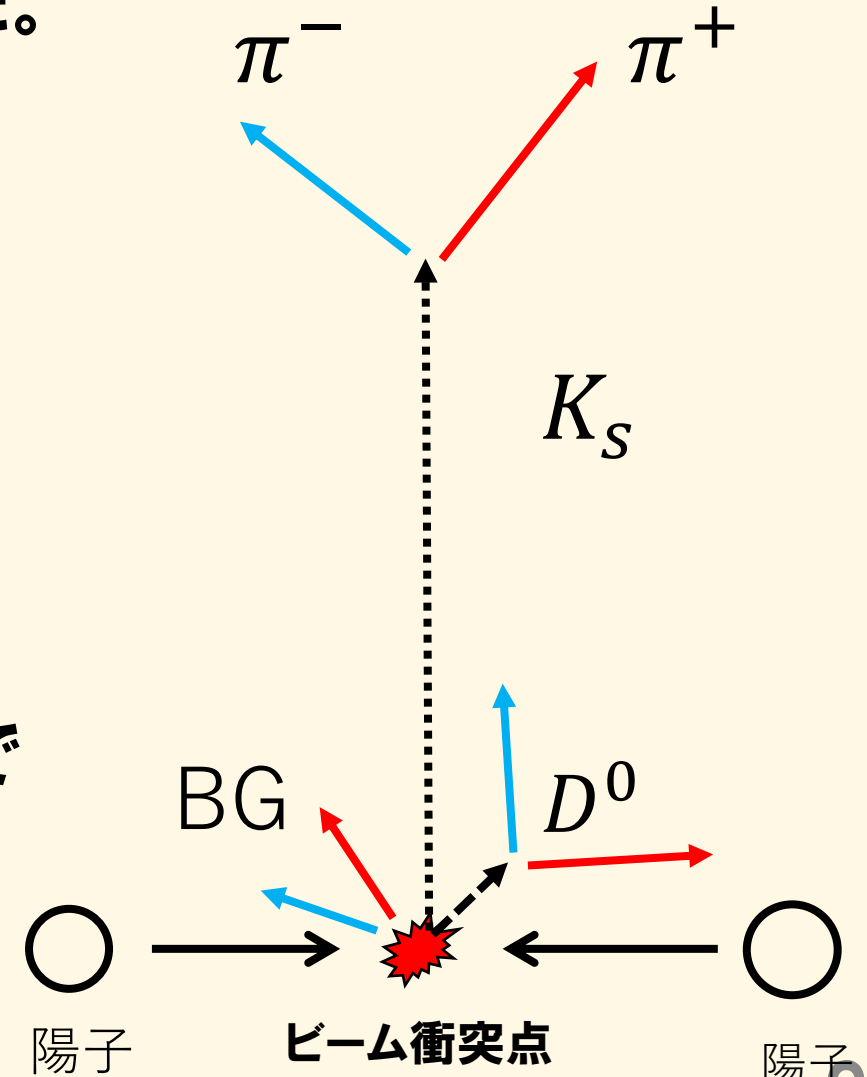
K_S について

- 崩壊長による解析カットがバックグラウンドを減らすことを確認するために K_S の再構成を行った。



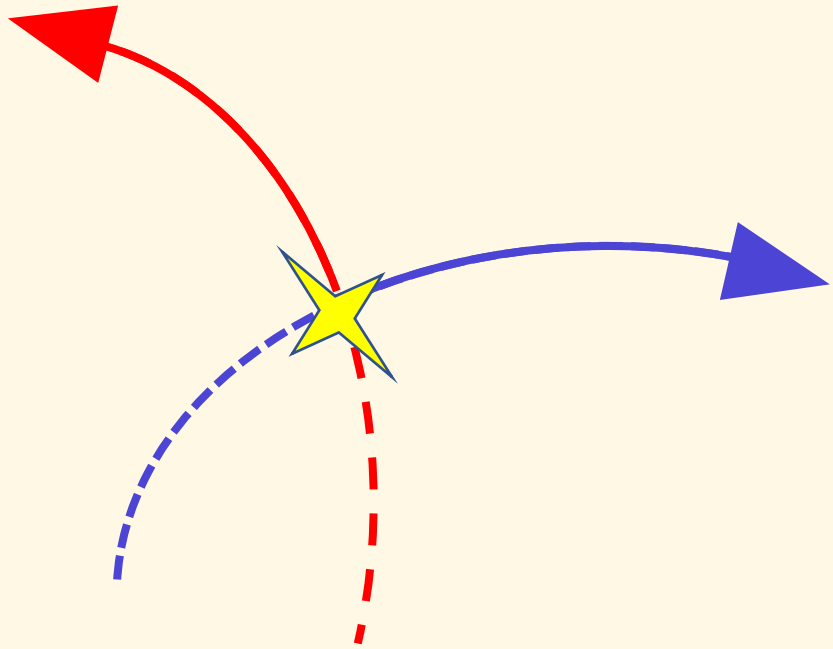
- K_S の平均飛行距離 ($c\tau$) は 2.6cm
 D^0 は $123\mu m$

→ K_S は D^0 と比べて、崩壊長による解析カットでバックグラウンドと見分けやすい。



崩壊点が正しく求められているかの確認

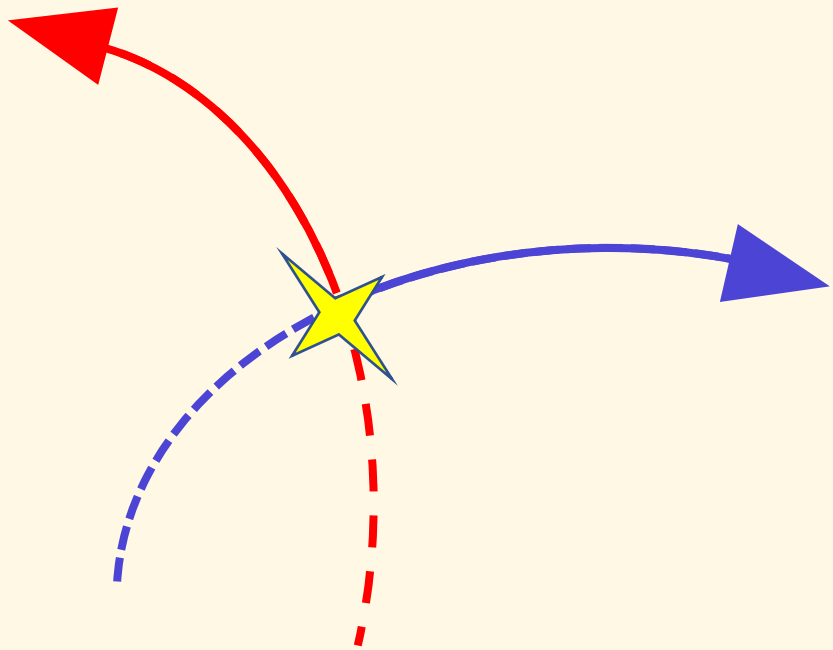
崩壊長を求めるためには、
プラスとマイナスのトラックの交点である
崩壊点を決定する必要がある。



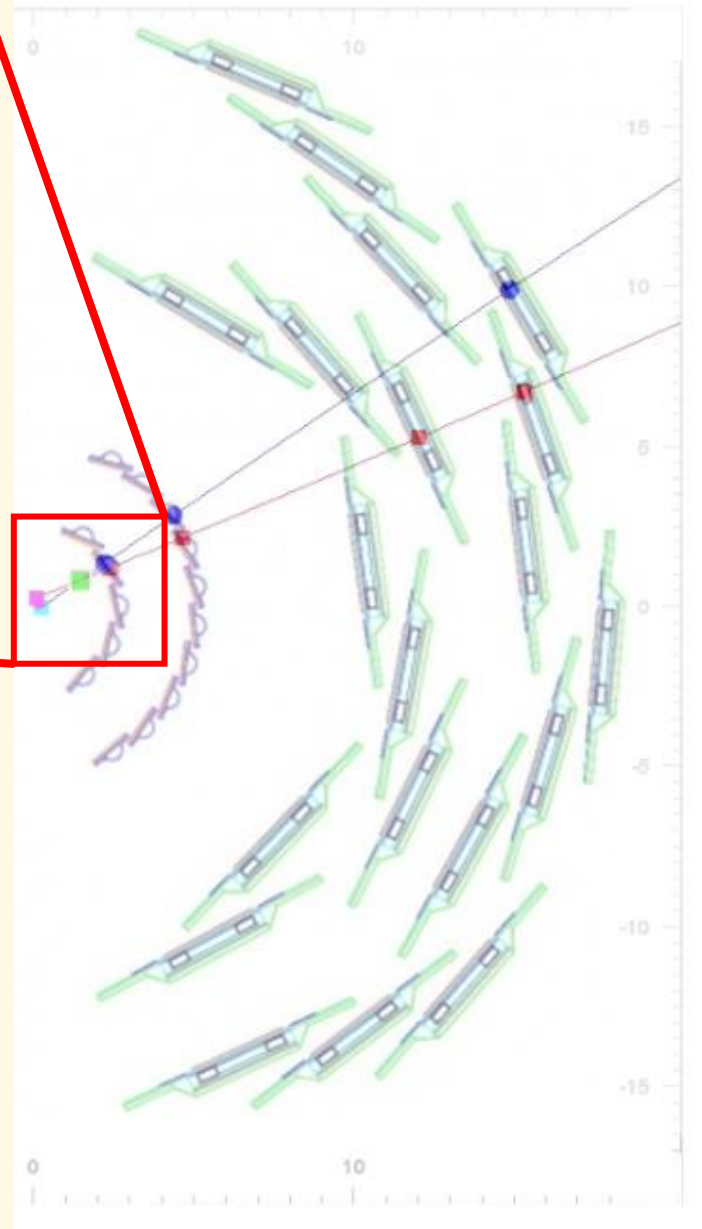
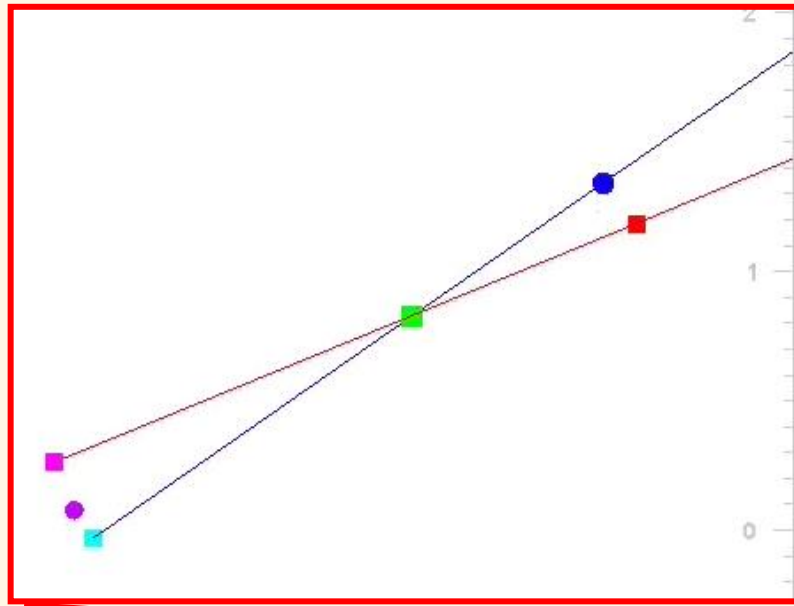
ビーム衝突点

崩壊点が正しく求められているかの確認

崩壊長を求めるためには、
プラスとマイナスのトラックの交点である
崩壊点を決定する必要がある。



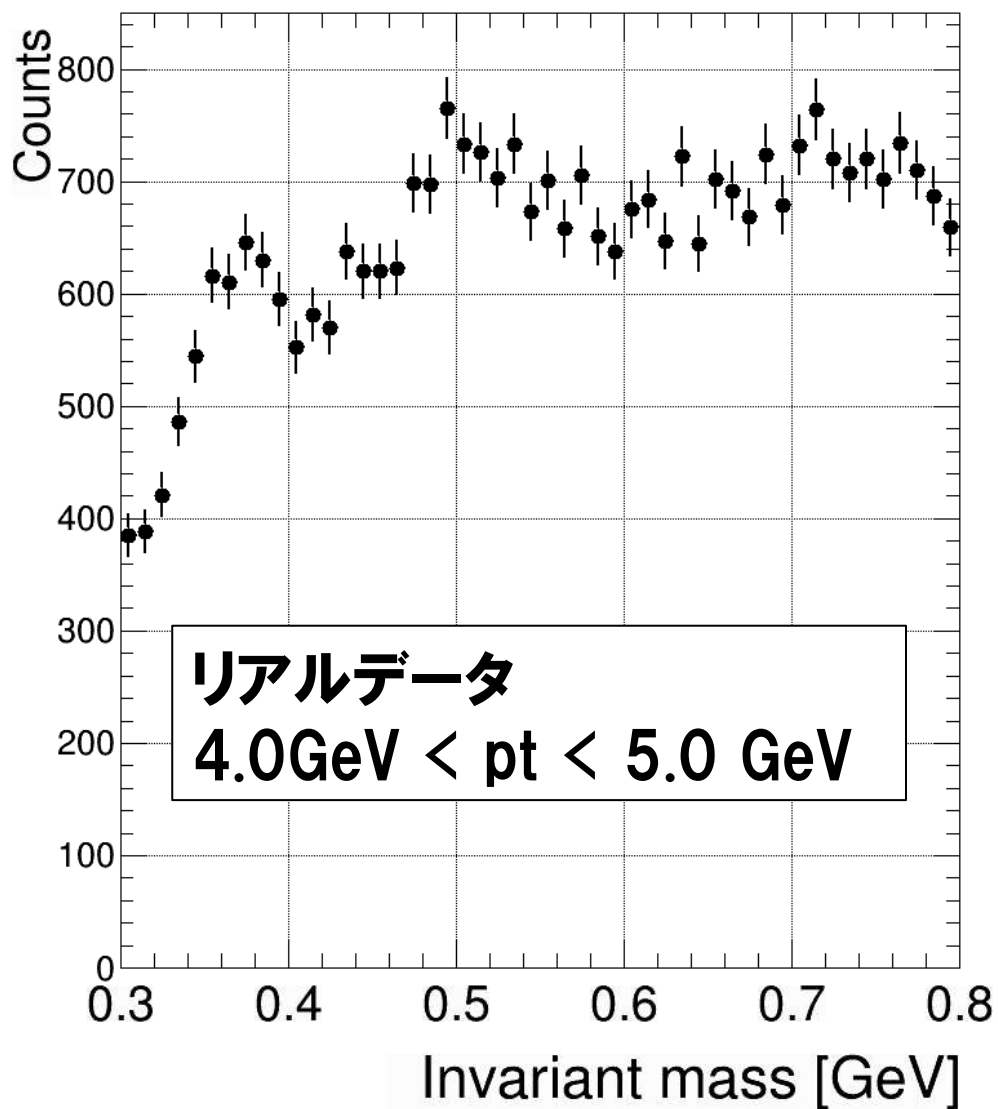
ビーム衝突点



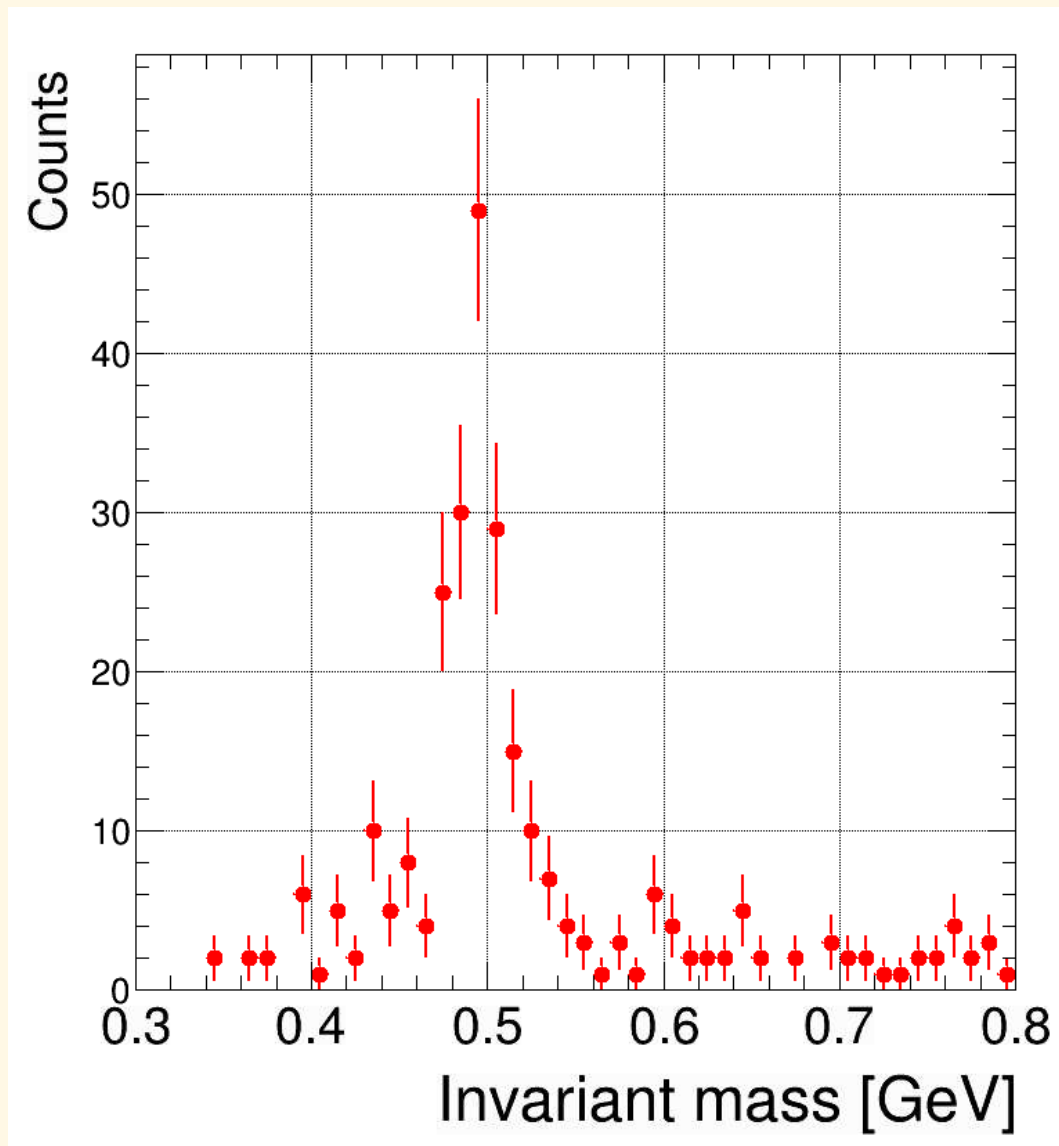
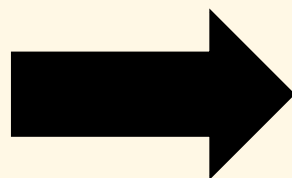
シミュレーションにて、1Eventにつき1個の K_S を発生させ、トラックとVTX上のヒット点を描画。

求めた**崩壊点**とトラックの交点が一致していることを確認。

K_S の再構成の結果

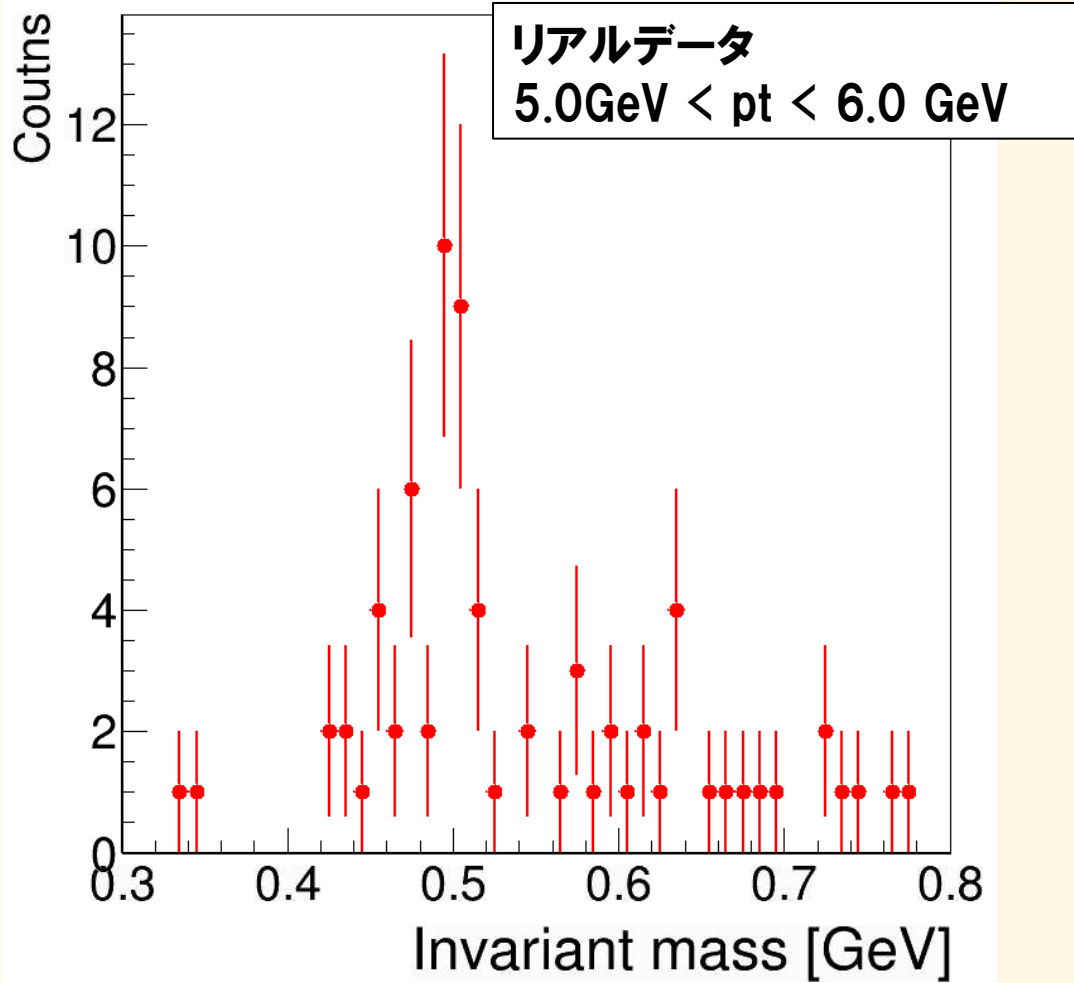


崩壊長の解析カットを
要求する

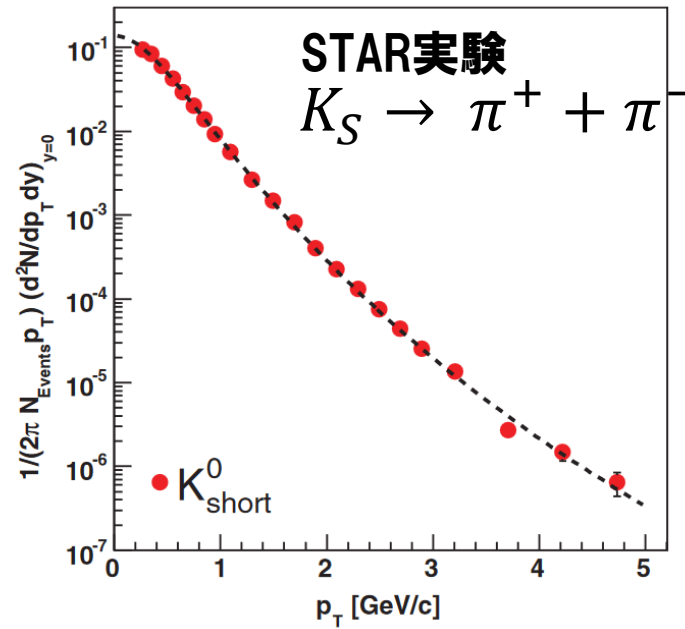


崩壊長の解析カットを要求することで、たしかにバックグラウンドを大幅に減らすことができた。

K_S の再構成の結果

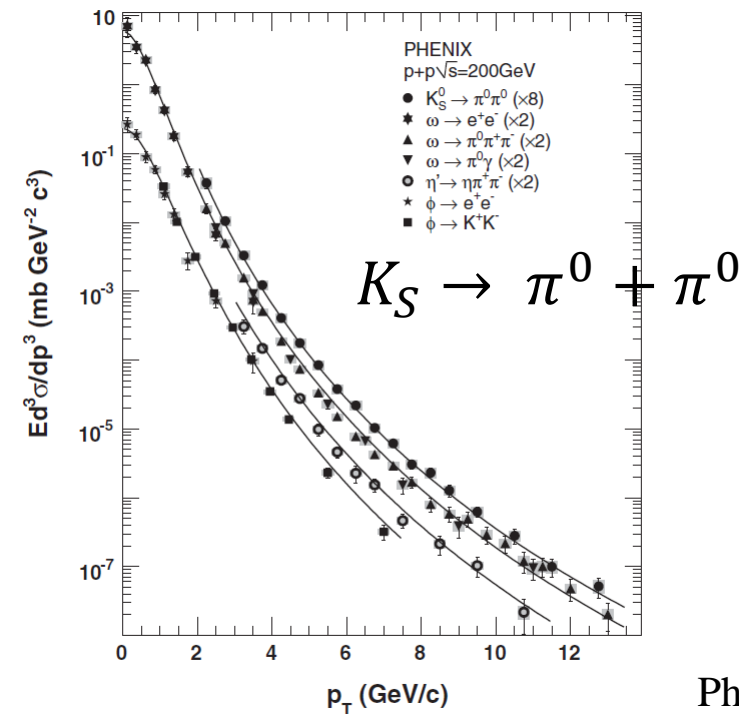


今回の解析を進めれば、6GeVまで
cross-sectionを求めることが可能



同じ崩壊モードでの
 K_S のcross-sectionの p_T の上限を
更新できることが期待できる。

Phys. Rev. C 75, 064901 (2007)

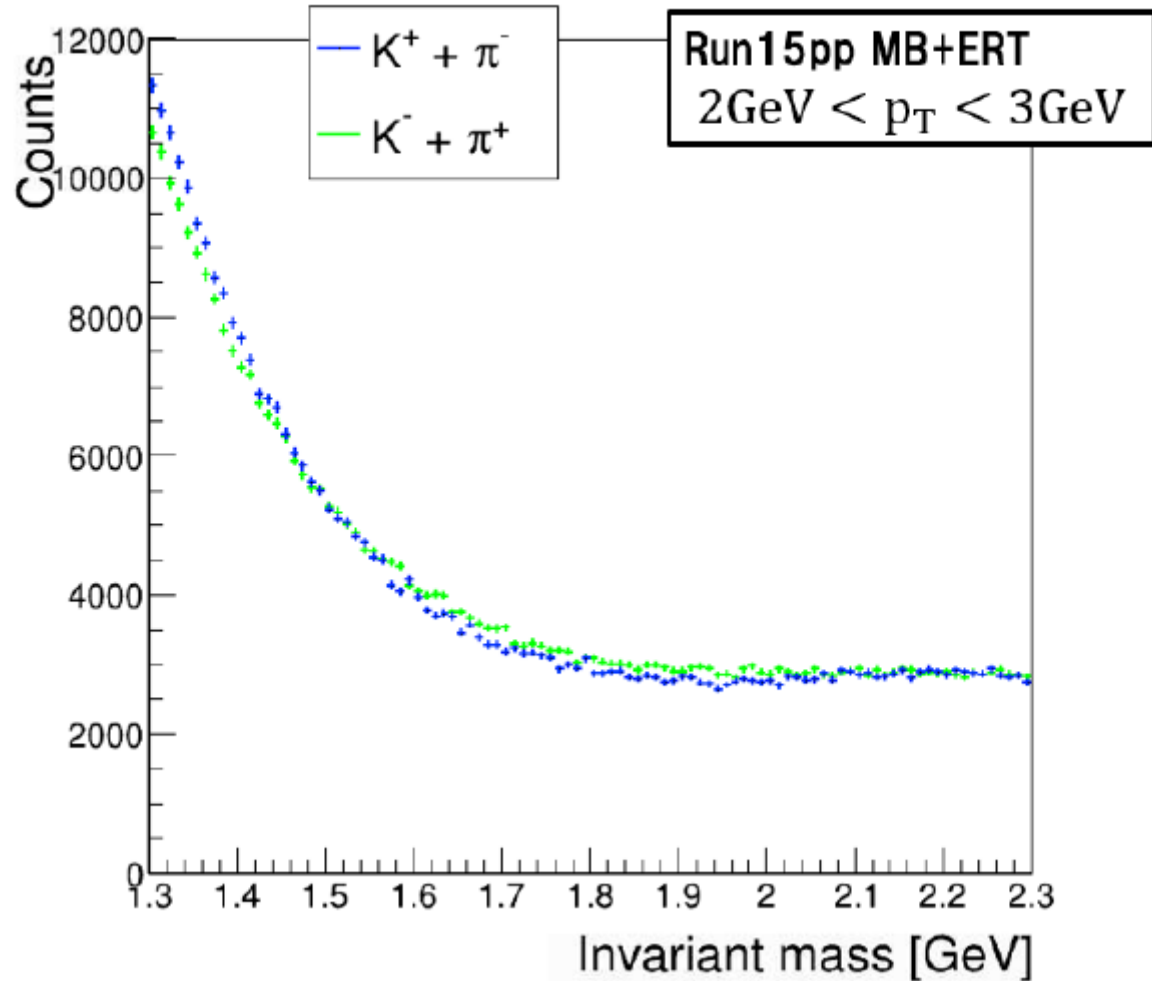


6GeVまでの結果を
検証することができる。

Phys. Rev. D 83, 052004 (2011)

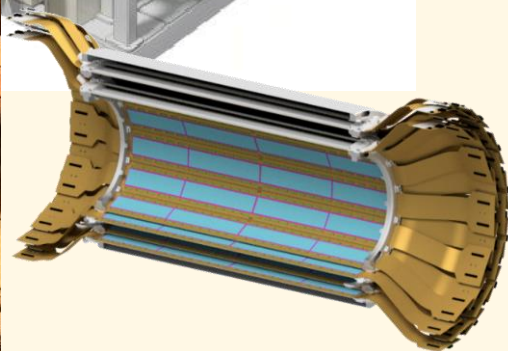
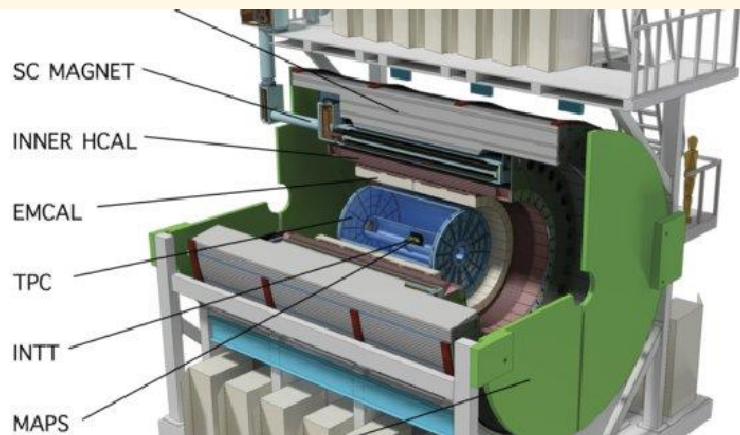
D^0 の再構成の結果

D^0 の質量 1.86GeV



D^0 メソンのピークを見出すことはできなかった

sPHENIX実験 と INTTについて



INTT

PHENIX実験のアップデート実験sPHENIX
で用いられる検出器、INTTの研究開発

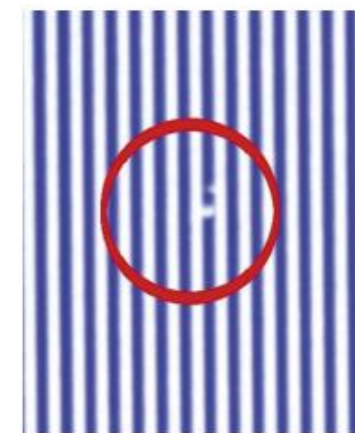
I. HIGHLIGHTS OF THE YEAR

RIKEN Accel. Prog. Rep. 55 (2022)

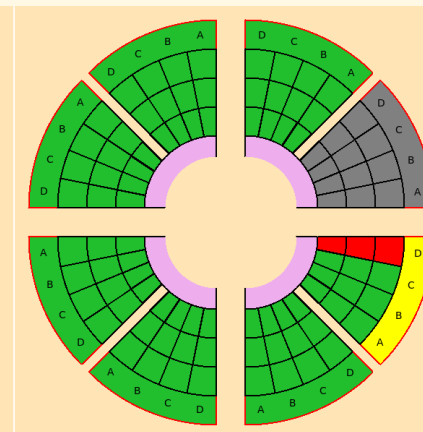
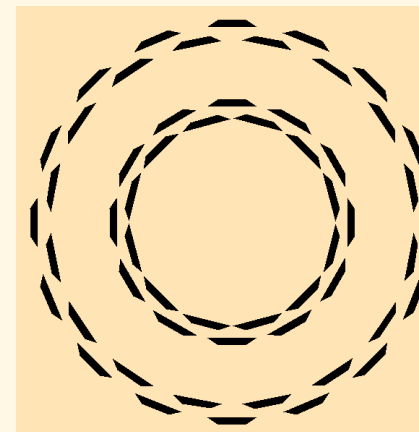
Development of inspection system for bus extender cable of RHIC-sPHENIX INTT detector

H. Imai,^{*1,*6} Y. Akiba,^{*1} D. Cacace,^{*2} K. Cheng,^{*3} H. En'yo,^{*1} T. Hachiya,^{*1,*4} S. Hasegawa,^{*1,*5} M. Hata,^{*4}
T. Kondo,^{*7} C. Kuo,^{*3} H. -S. Li,^{*8} R. -S. Lu,^{*9} E. Mannel,^{*2} C. Miraval,^{*2} M. Morita,^{*1,*6}
Y. Nakamura,^{*1,*6} G. Nakano,^{*1,*6} Y. Namimoto,^{*1,*4} R. Nouicer,^{*2} G. Nukazuka,^{*1} R. F.
C. Shih,^{*3} M. Shimomura,^{*4} M. Stojanovic,^{*8} Y. Sugiyama,^{*4} R. Takahama,^{*1,*4} W. -C.
and X. Wei^{*8}

INTTで用いられるデータ伝送ケーブルの製造中での 不良箇所を発見する画像処理アルゴリズム開発



INTTバレルをコントロールする ソフトウェアアプリケーションの 開発



まとめ

- QGP物性を理解する上で重要である重いクォーク、チャームクォークを持つハドロン D^0 メソンの直接的測定に挑戦した。
- D^0 メソンを再構成する上での、中間目標である K^* メソンと K_S メソンの不変質量ピークを観測することに成功。 D^0 メソンは現時点ではピークを観測することができないことがわかった。
- PHENIX実験のアップデート実験であるsPHENIX実験で用いられるシリコン検出器 INTTの開発も行ってきた。