



ハドロン化 Hadronization

Satoshi Yano

Laboratoire Quark Gluon Plasma
Département de Physique Nucléaire, IRFU, CEA

チュートリアル研究会
「高エネルギー重イオン衝突の物理」

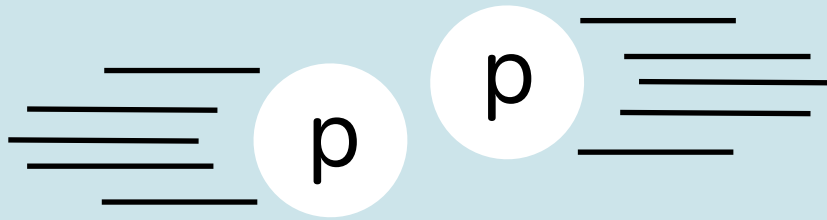
目次

- 基礎
 - 真空中におけるハドロン生成
 - 高エネルギー原子核衝突におけるバリオンの異常増加
 - ハドロン楕円集団運動の構成クォーク数スケーリング
- 発展
 - ハドロンの終状態相互作用
 - 楕円集団運動の構成クォーク数スケーリングの破綻
 - 小さな衝突系における新たなハドロン生成機構
- まとめ

ハドロン化

- ハドロン化=パートン（クォーク/グルーオン）がお互いに結びついてハドロンを構成すること

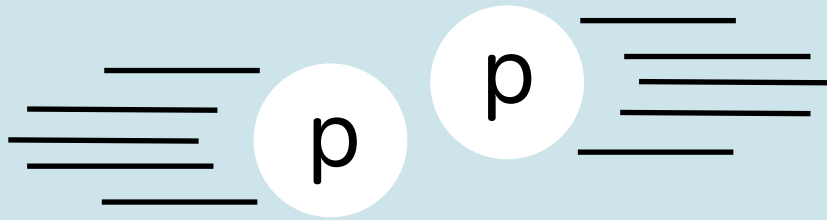
(1) 陽子+陽子の衝突



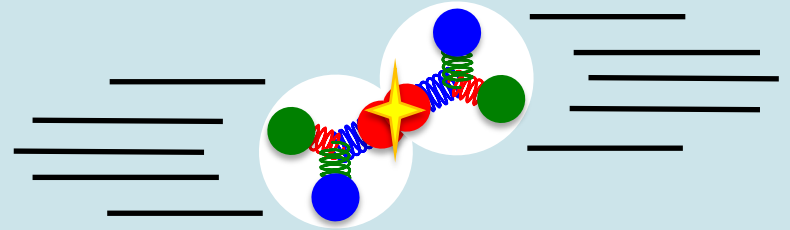
ハドロン化

- ハドロン化=パートン（クォーク/グルーオン）がお互いに結びついてハドロンを構成すること

(1) 陽子+陽子の衝突



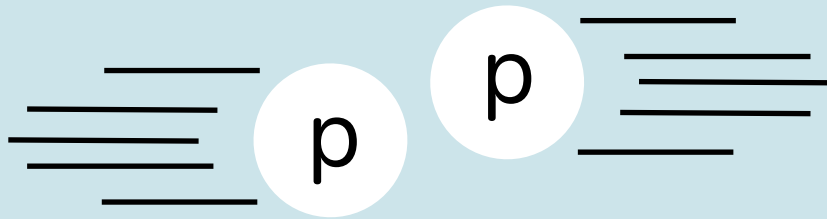
(2) 陽子内パートンの衝突



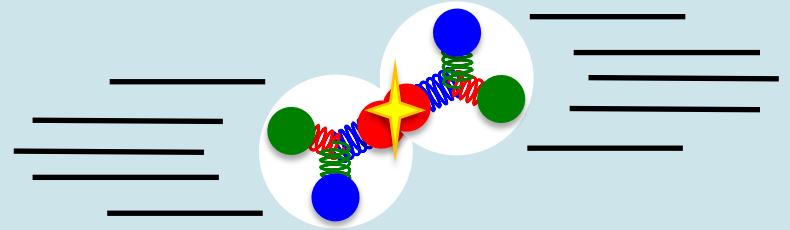
ハドロン化

- ハドロン化=パートン（クォーク/グルーオン）がお互いに結びついてハドロンを構成すること

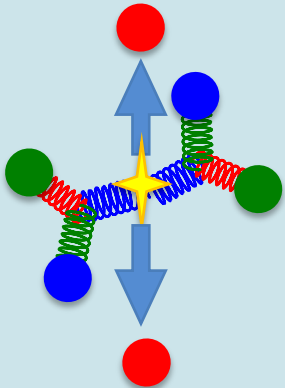
(1) 陽子+陽子の衝突



(2) 陽子内パートンの衝突



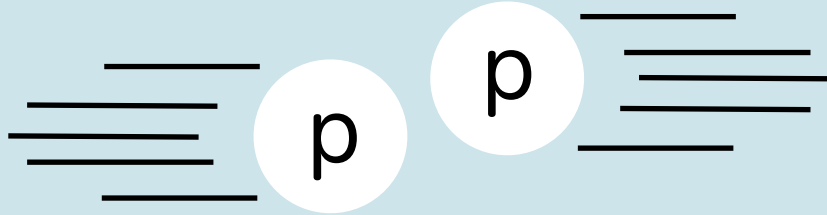
(3) カラーが無色でなくなる



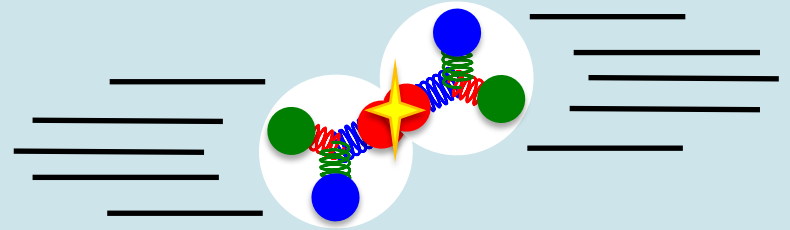
ハドロン化

- ハドロン化=パートン（クォーク/グルーオン）がお互いに結びついてハドロンを構成すること

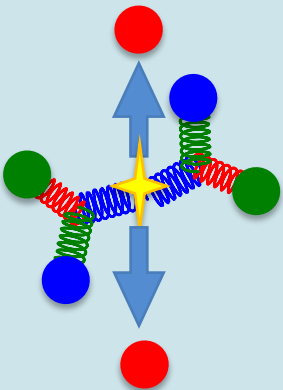
(1) 陽子+陽子の衝突



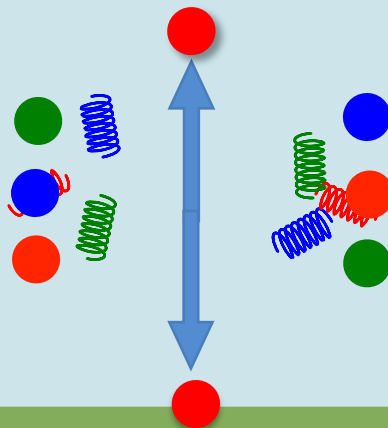
(2) 陽子内パートンの衝突



(3) カラーが無色でなくなる



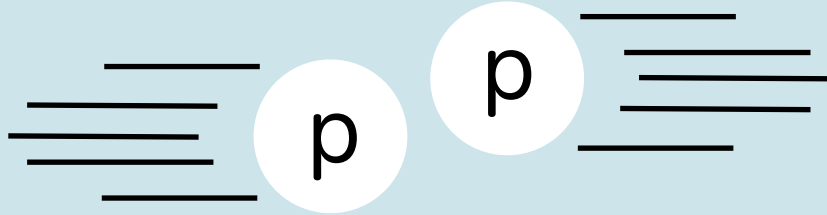
(4) 各パートンが無色になろうと努力する



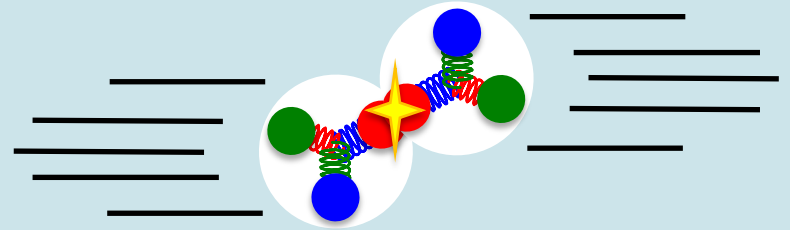
ハドロン化

- ハドロン化=パートン（クォーク/グルーオン）がお互いに結びついてハドロンを構成すること

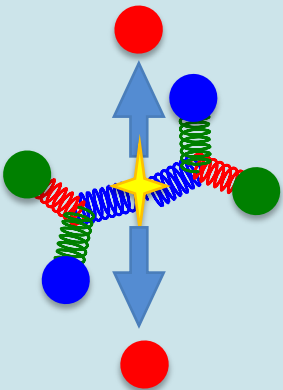
(1) 陽子+陽子の衝突



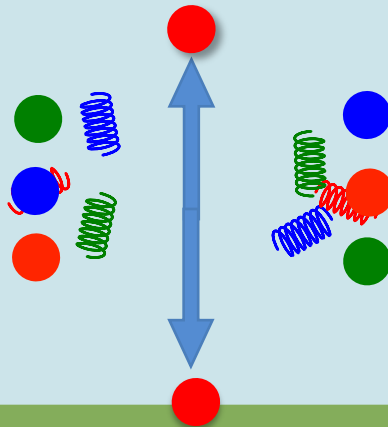
(2) 陽子内パートンの衝突



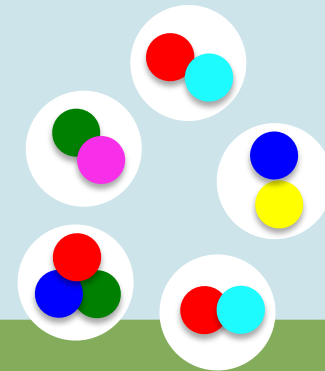
(3) カラーが無色でなくなる



(4) 各パートンが無色になろうと努力する



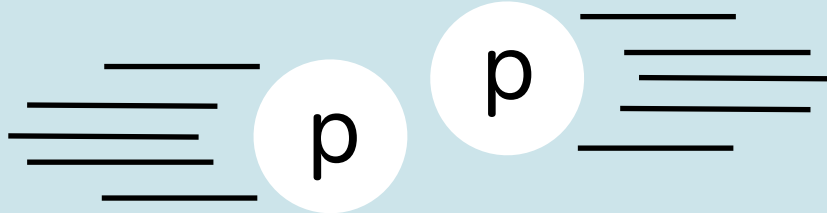
(5) なんとか無色のハドロンになれた



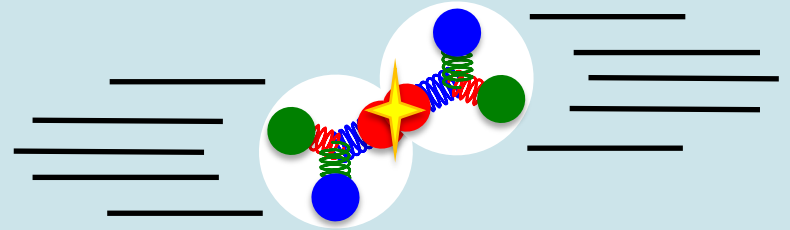
ハドロン化

- ハドロン化=パートン（クォーク/グルーオン）がお互いに結びついてハドロンを構成すること

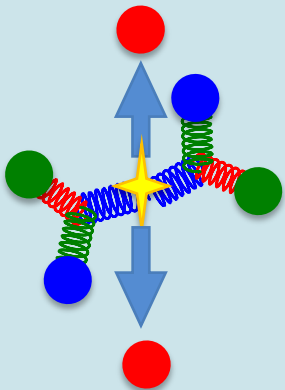
(1) 陽子+陽子の衝突



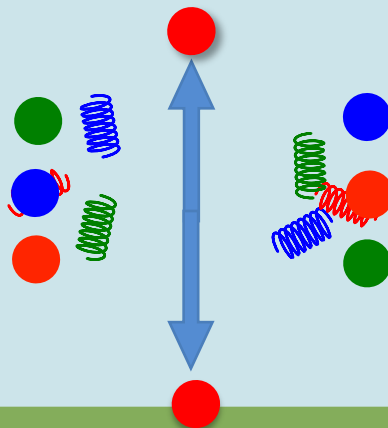
(2) 陽子内パートンの衝突



(3) カラーが無色でなくなる

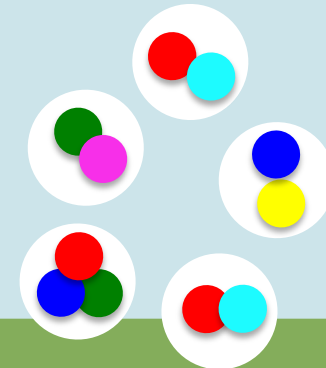


(4) 各パートンが無色になろうと努力する



(5) なんとか無色のハドロンになれた

ハドロン化

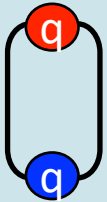




基礎

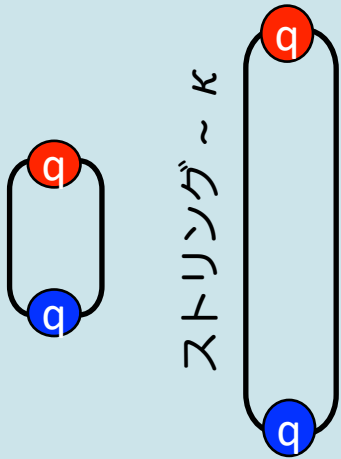
基礎 I : 真空中におけるハドロニ化 フラグメンテーション

- パートの破砕 (ストリングモデル)
 - 無色になるまで破砕が続く



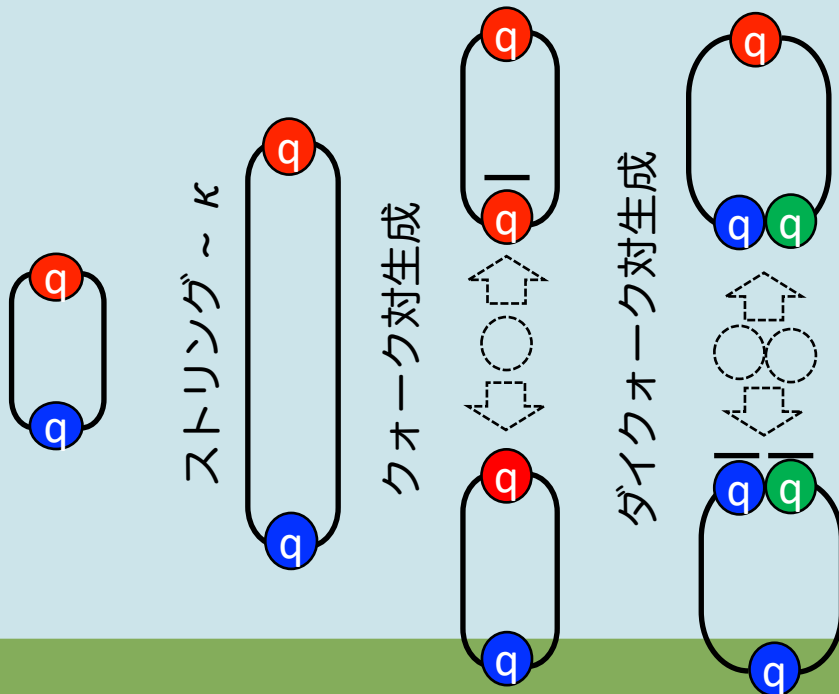
基礎 I : 真空中におけるハドロニ化 フラグメンテーション

- パートの破砕 (ストリングモデル)
 - 無色になるまで破砕が続く



基礎 I : 真空中におけるハドロニ化 フラグメンテーション

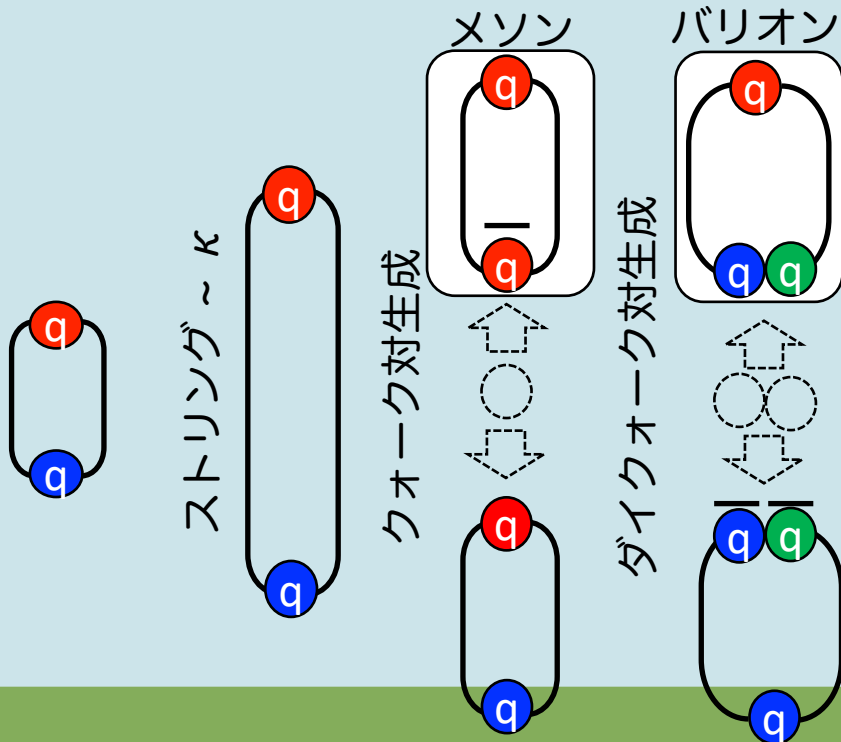
- パートの破砕 (ストリングモデル)
 - 無色になるまで破砕が続く
- クォーク対生成はシュウィンガー機構 $P \sim \kappa \exp(-Am_T^2/\kappa)$



クォーク対生成確率 $\propto \kappa \exp(-Am_T^2/\kappa)$

基礎 I : 真空中におけるハドロン化 フラグメンテーション

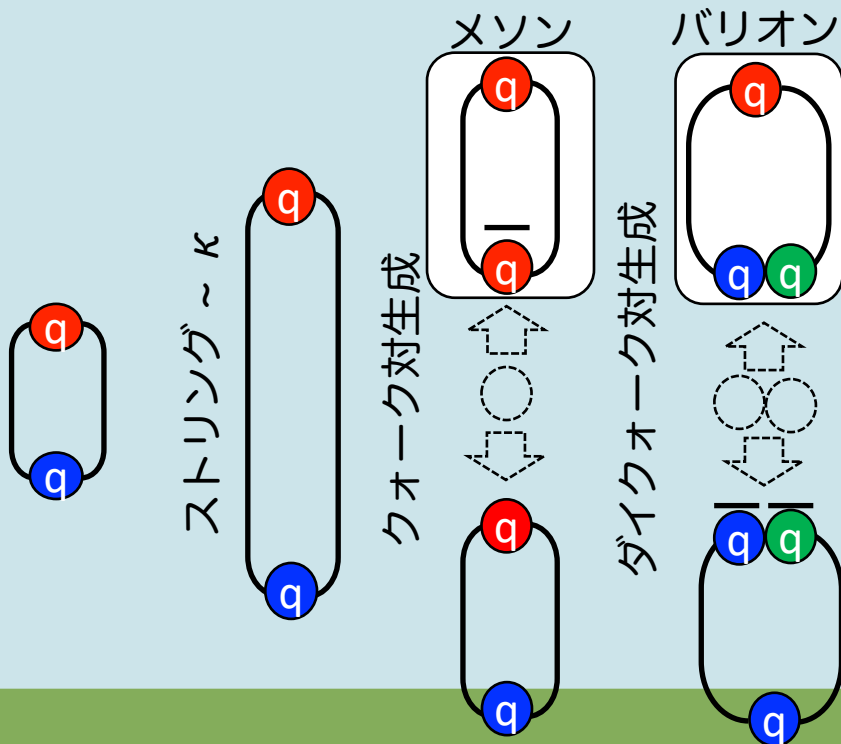
- パートの破砕 (ストリングモデル)
 - 無色になるまで破砕が続く
- クォーク対生成はシュウィンガー機構 $P \sim \kappa \exp(-Am_T^2/\kappa)$



クォーク対生成確率 $\propto \kappa \exp(-Am_T^2/\kappa)$
 陽子: π 中間子 = $\sim 0.2 : 1$

基礎 I : 真空中におけるハドロン化 フラグメンテーション

- パートの破砕 (ストリングモデル)
 - 無色になるまで破砕が続く
- クォーク対生成はシュウィンガー機構 $P \sim \kappa \exp(-Am_T^2/\kappa)$



クォーク対生成確率 $\propto \kappa \exp(-Am_T^2/\kappa)$

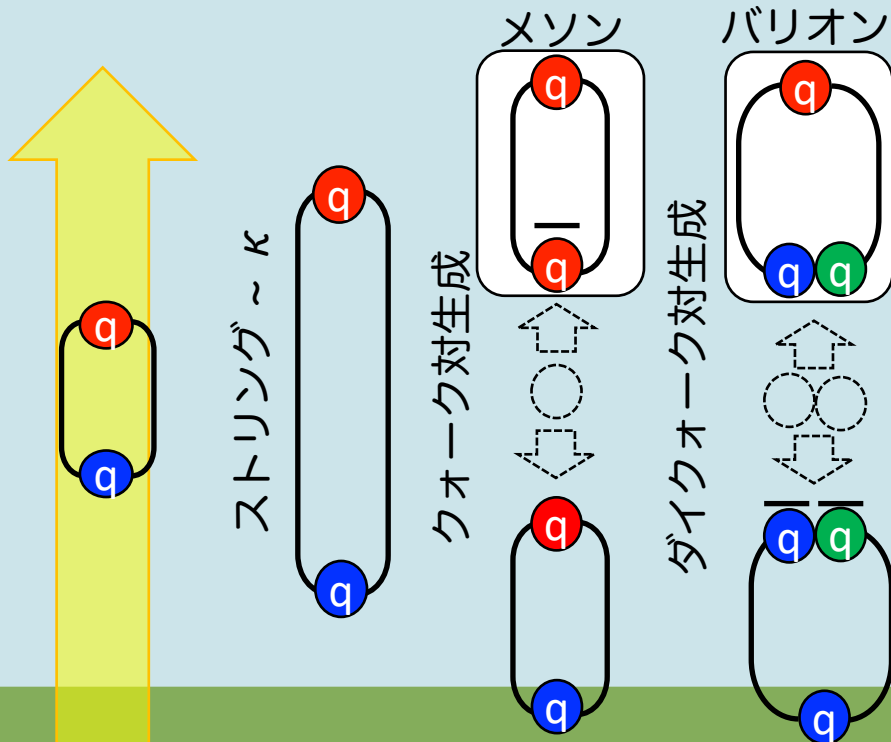
陽子: π 中間子 = $\sim 0.2 : 1$

各フレーバー対生成比率

$uu : dd : ss : cc = 1 : 1 : 0.3 : 10^{-11}$

基礎 I : 真空中におけるハドロニ化フラグメンテーション

- パートの破砕 (ストリングモデル)
 - 無色になるまで破砕が続く
- クォーク対生成はシュウィンガー機構 $P \sim \kappa \exp(-Am_T^2/\kappa)$



クォーク対生成確率 $\propto \kappa \exp(-Am_T^2/\kappa)$

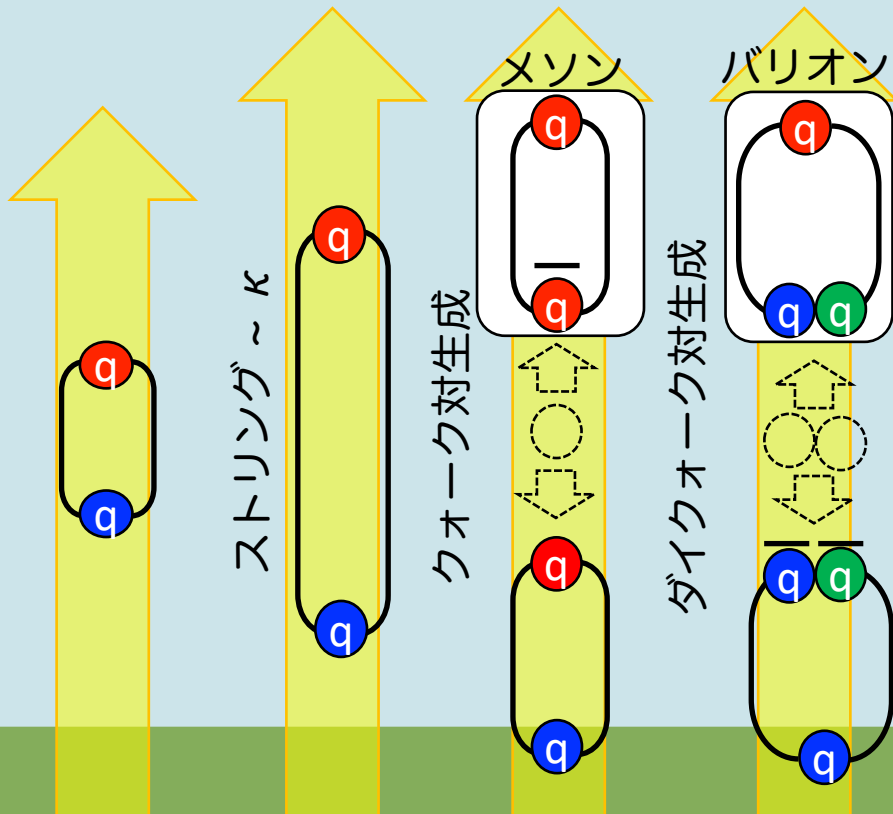
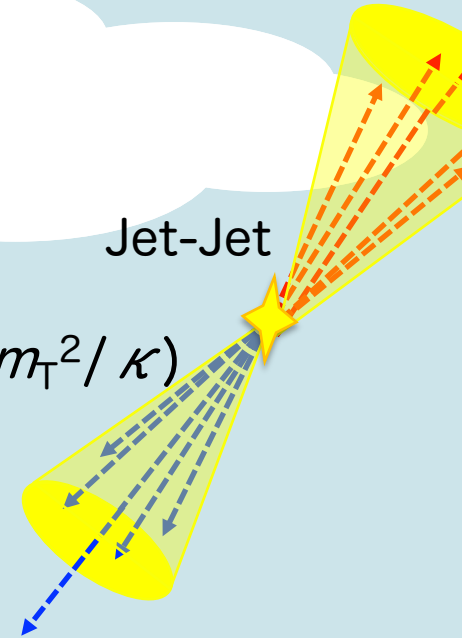
陽子: π 中間子 = $\sim 0.2 : 1$

各フレーバー対生成比率

$uu : dd : ss : cc = 1 : 1 : 0.3 : 10^{-11}$

基礎 I : 真空中におけるハドロン化 フラグメンテーション

- パートの破砕 (ストリングモデル)
 - 無色になるまで破砕が続く
- クォーク対生成はシュウィンガー機構 $P \sim \kappa \exp(-Am_T^2/\kappa)$
 - 高横運動量領域 : 衝突初期の p_T^{-n} の関数 (ジェット)



クォーク対生成確率 $\propto \kappa \exp(-Am_T^2/\kappa)$

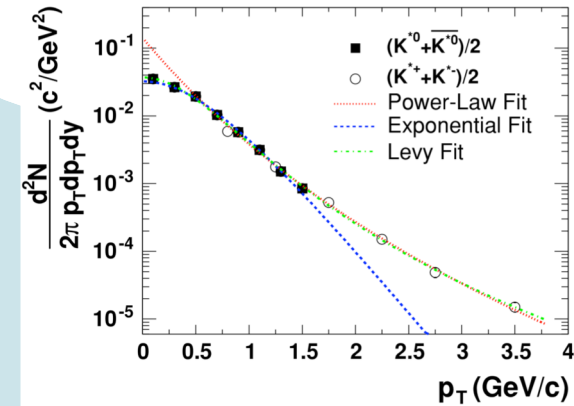
陽子: π 中間子 = $\sim 0.2 : 1$

各フレーバー対生成比率

$uu : dd : ss : cc = 1 : 1 : 0.3 : 10^{-11}$

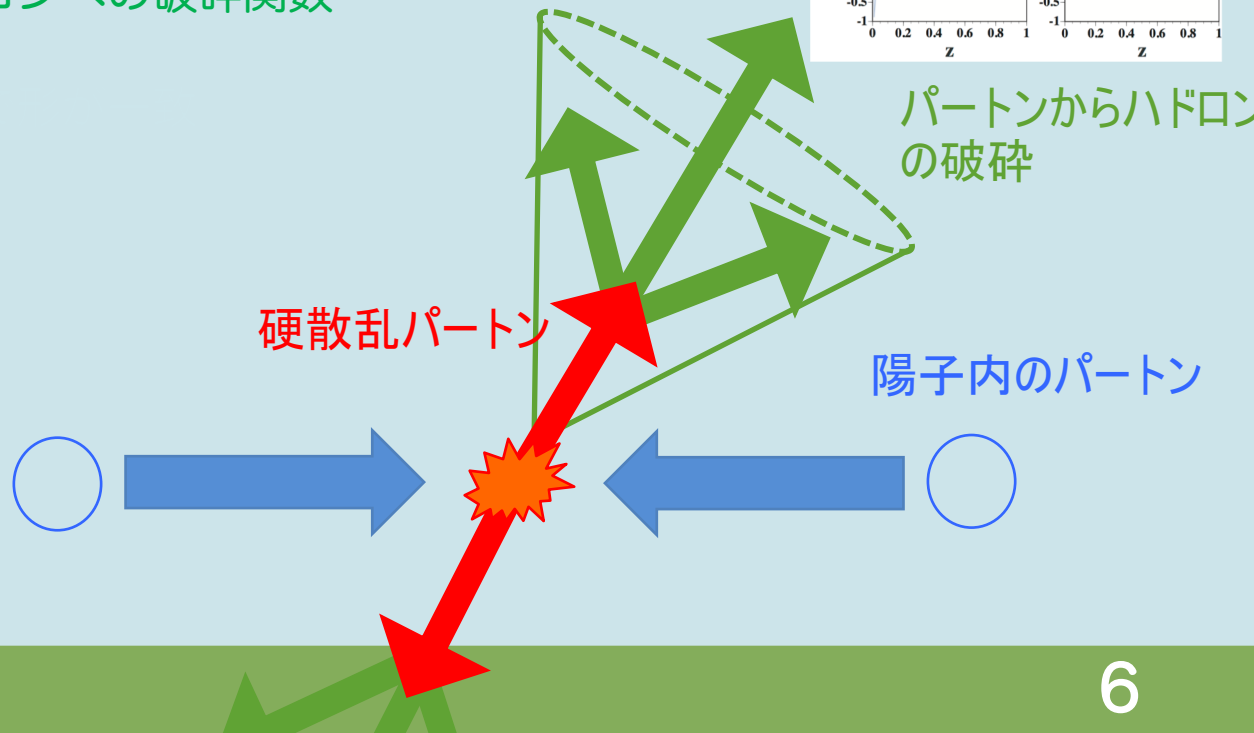
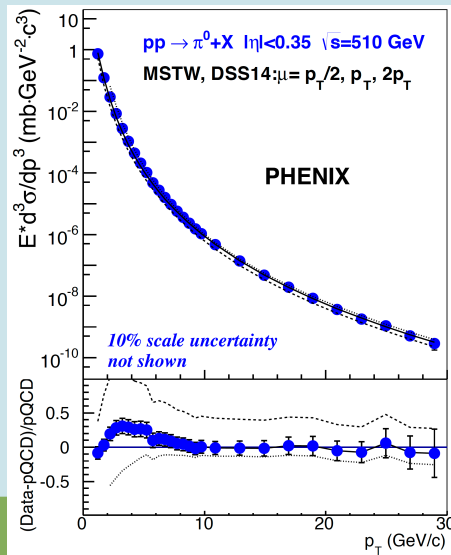
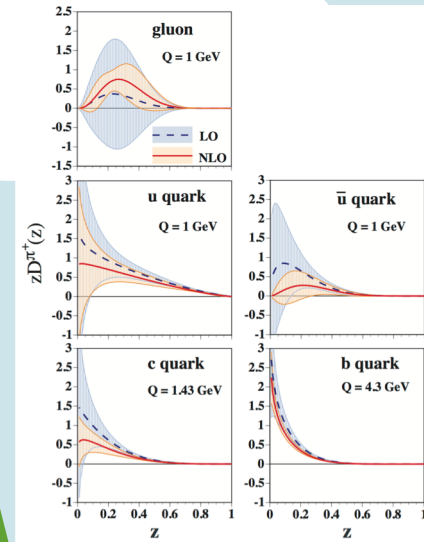
基礎 I : 真空中におけるハドロン化 測定結果

- 横運動量分布
 - 低横運動量領域 : Exponential分布
 - 高横運動量分布 : Power-law分布



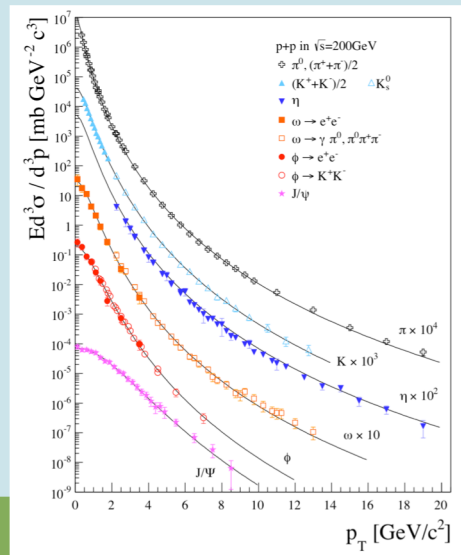
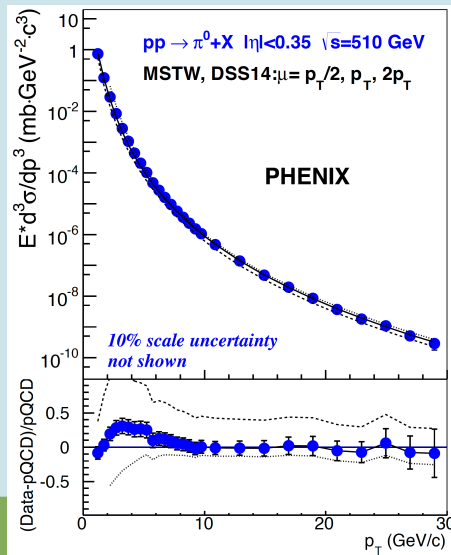
基礎 I : 真空中におけるハドロン化 測定結果

- 横運動量分布
 - 低横運動量領域 : Exponential分布
 - 高横運動量分布 : Power-law分布
- 高横運動量ハドロン生成モデル
 - 核子内パートン分布関数
 - 摂動QCD散乱
 - パートンからハドロンへの破砕関数



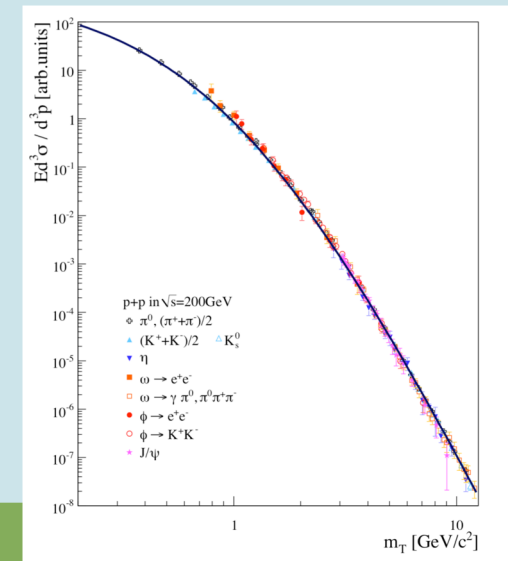
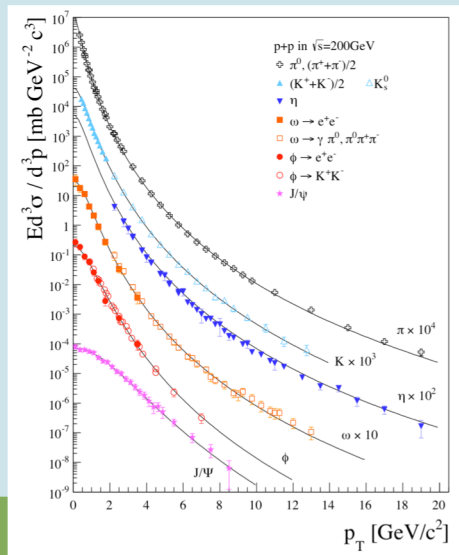
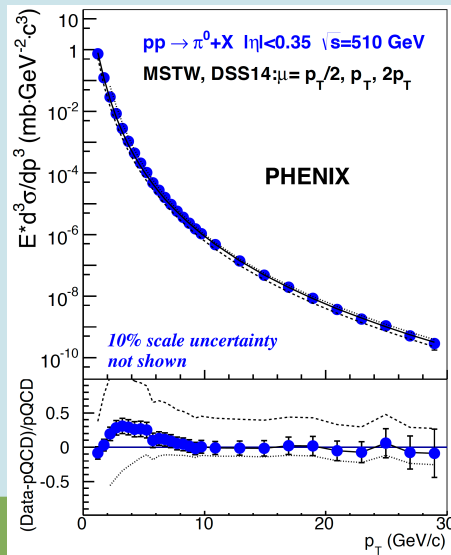
基礎 I : 真空中におけるハドロン化測定結果

- 横運動量分布
 - 低横運動量領域 : Exponential分布
 - 高横運動量分布 : Power-law分布
- 高横運動量ハドロン生成モデル
 - 核子内パートン分布関数
 - 摂動QCD散乱
 - パートンからハドロンへの破砕関数
- m_T -scaling

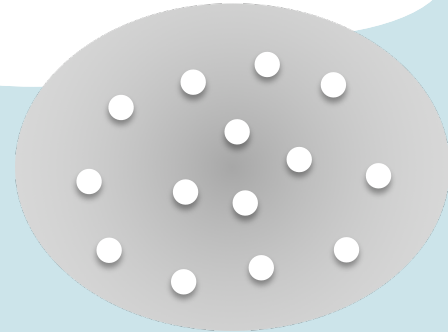
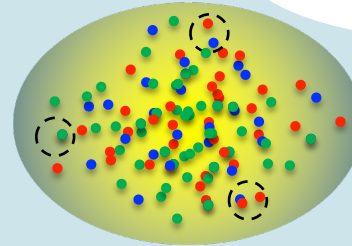
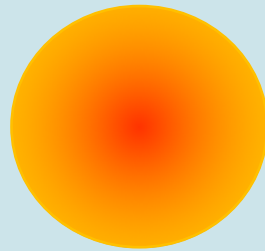
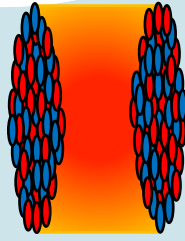


基礎 I : 真空中におけるハドロン化測定結果

- 横運動量分布
 - 低横運動量領域 : Exponential分布
 - 高横運動量分布 : Power-law分布
- 高横運動量ハドロン生成モデル
 - 核子内パートン分布関数
 - 摂動QCD散乱
 - パートンからハドロンへの破砕関数
- m_T -scaling
 - 幅広いハドロン種で形が一致



高エネルギー重イオン衝突における ハドロン生成



Collisions

Thermalize

Hydrodynamics

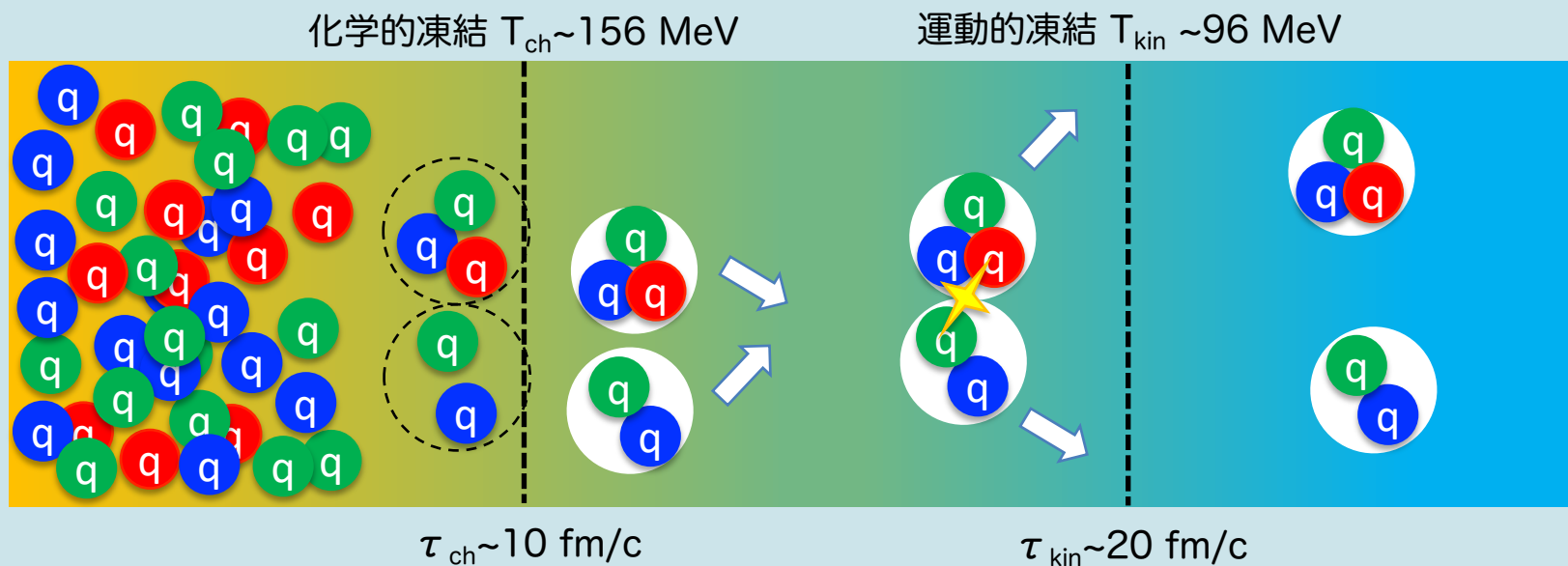
Hadronization

Freeze-out

- ハドロン化 (Hadronization)
 - クォークがハドロン内に閉じ込められること
 - 横運動量領域によりハドロン化のプロセスが異なる
 - QGPに関するプロセスは低～中横運動量領域
- 終状態相互作用 (Final-state interaction)
 - 化学凍結から運動学凍結までの間のハドロン間の相互作用
 - ハドロン共鳴ガス状態 (Hadron resonance gas)

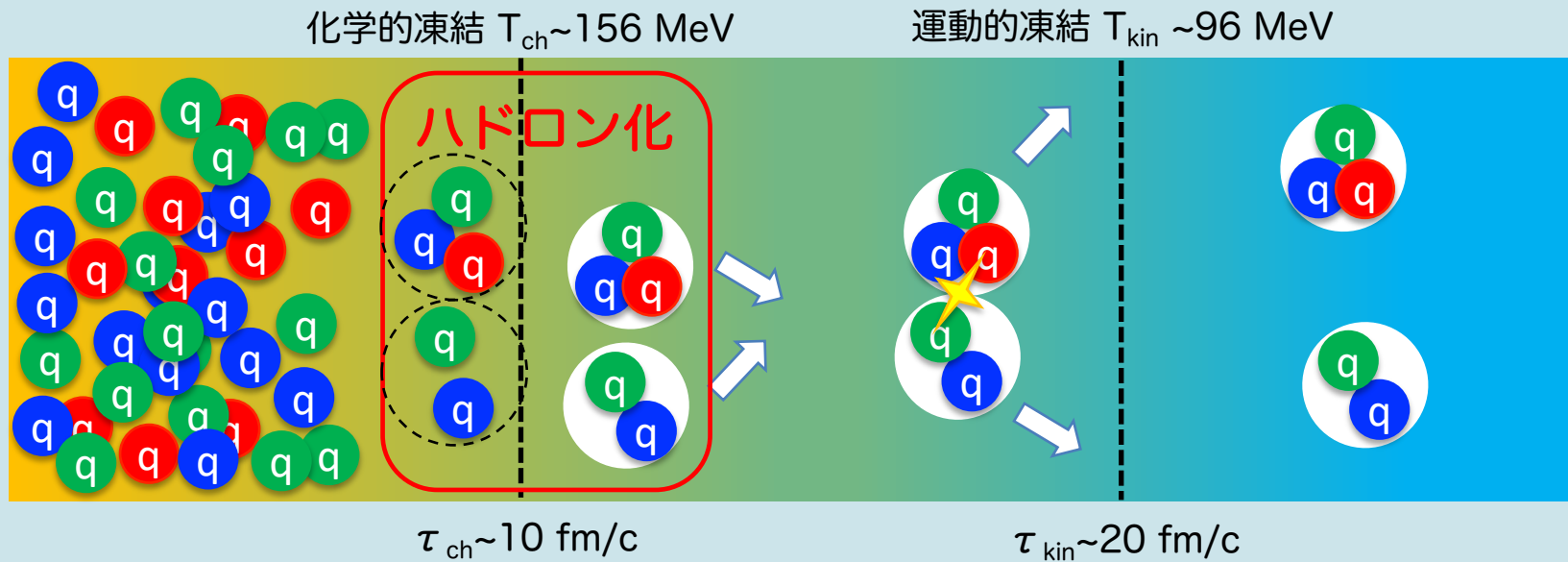
ハドロンの一生 (高エネルギー原子核衝突)

- クォーク再結合 (Recombination)
 - 同じような運動量を持ったクォークたちの結合
 - 3つの (反) クォークの場合: (反) バリオン
 - クォーク-反クォーク対の場合: メソン
 - 化学凍結温度は~156 MeV程度



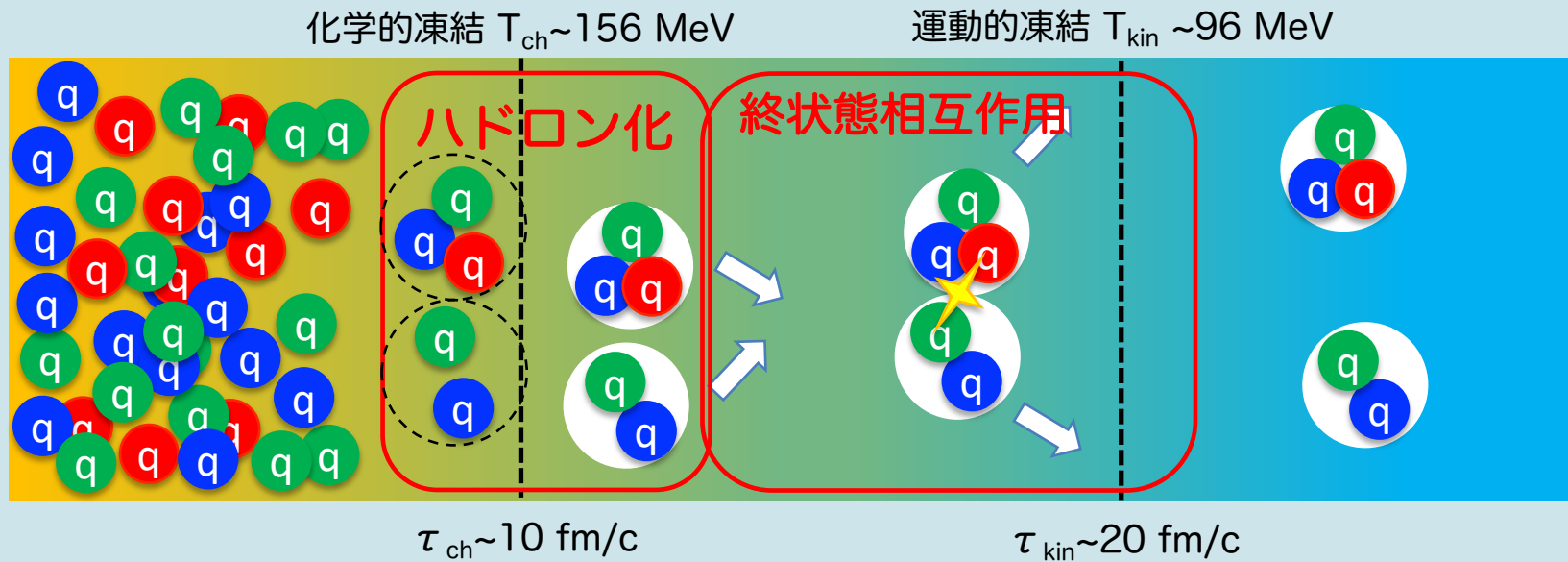
ハドロンの一生 (高エネルギー原子核衝突)

- クォーク再結合 (Recombination)
 - 同じような運動量を持ったクォークたちの結合
 - 3つの (反) クォークの場合: (反) バリオン
 - クォーク-反クォーク対の場合: メソン
 - 化学凍結温度は~156 MeV程度



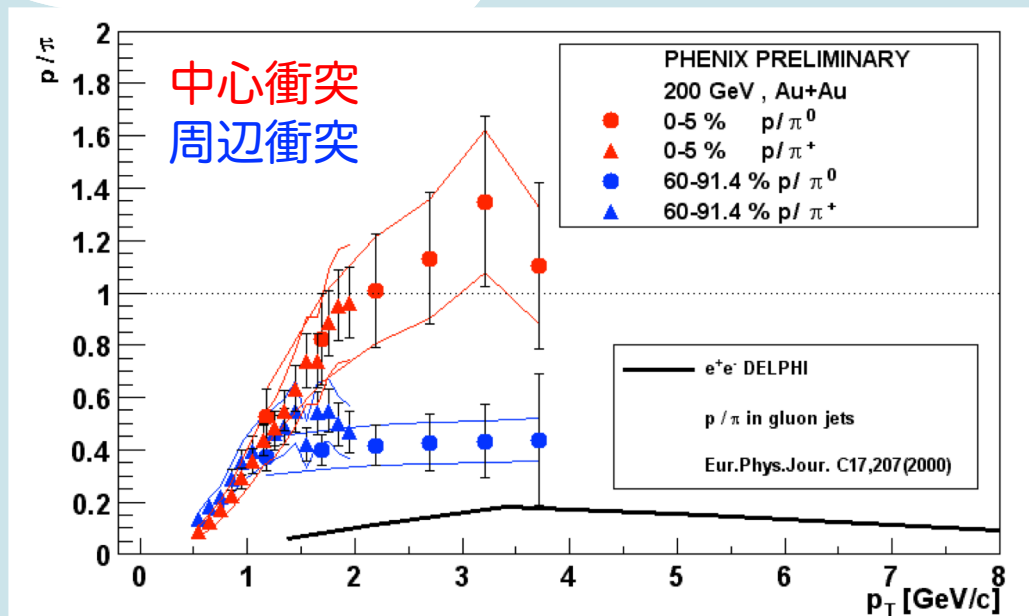
ハドロンの一生 (高エネルギー原子核衝突)

- クォーク再結合 (Recombination)
 - 同じような運動量を持ったクォークたちの結合
 - 3つの (反) クォークの場合: (反) バリオン
 - クォーク-反クォーク対の場合: メソン
 - 化学凍結温度は~156 MeV程度



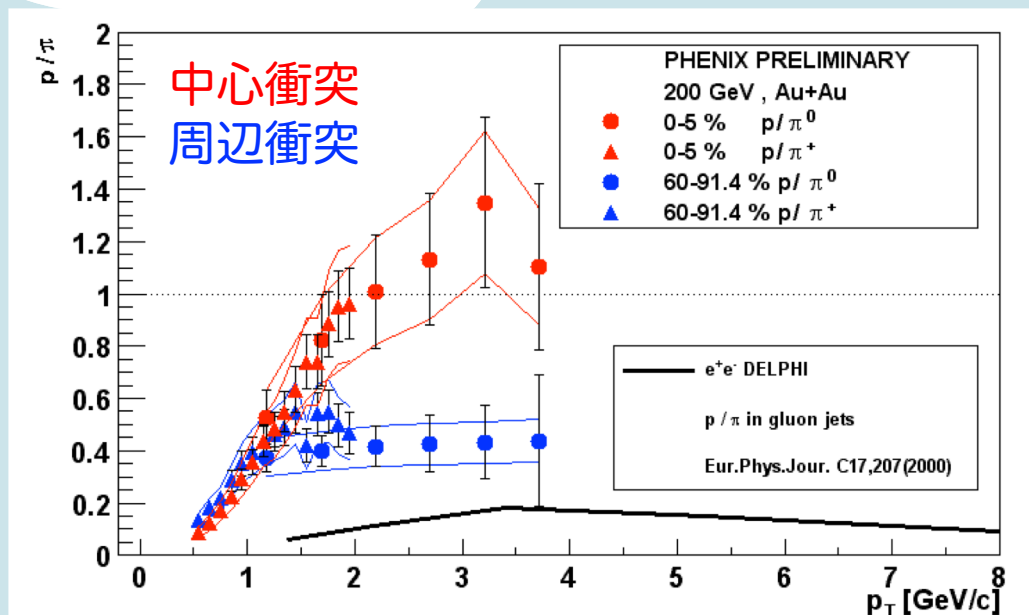
基礎 II : バリオンの異常増加

陽子/中性 π 中間子比

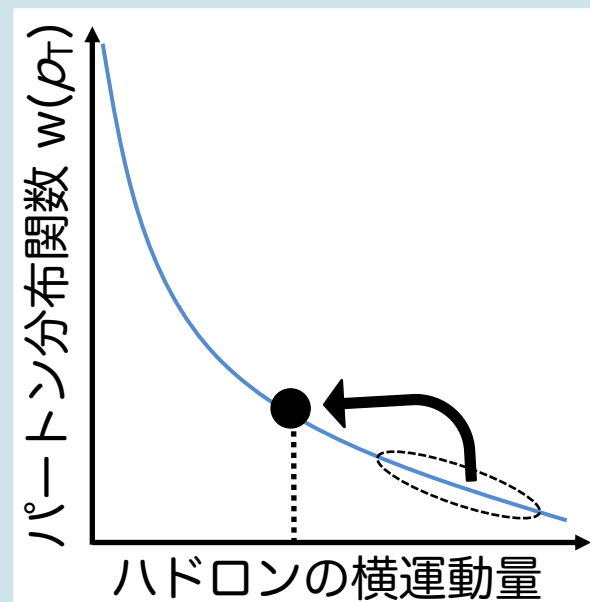


基礎 II : バリオンの異常増加

陽子/中性 π 中間子比



パートンの破砕
陽子: π 中間子 = $\sim 0.2 : 1$



$$\frac{dN_h}{dP_T}$$

ハドロン収量

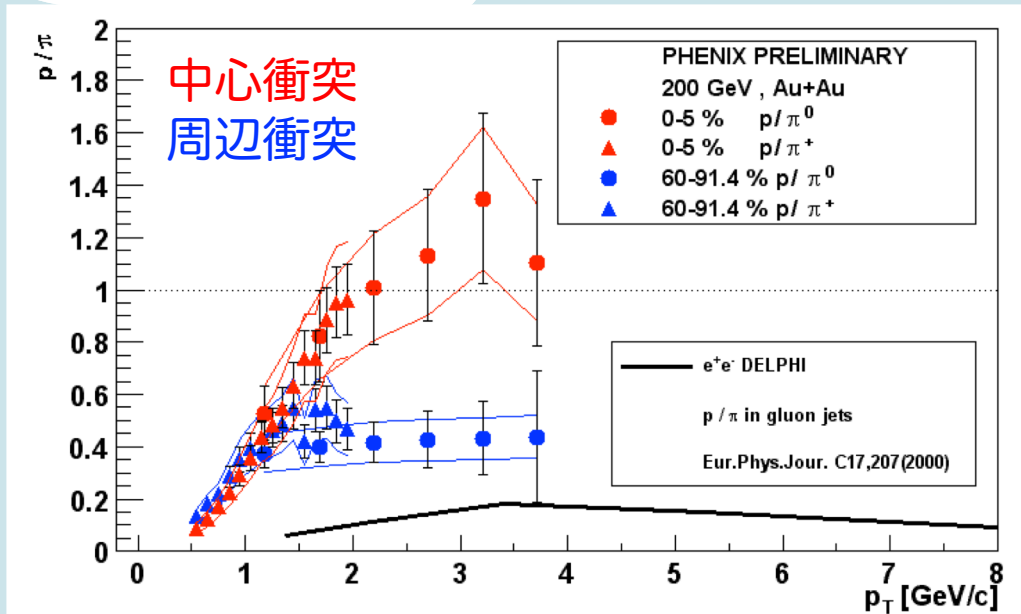
$$\sim w(P_T/z)$$

パートン分布

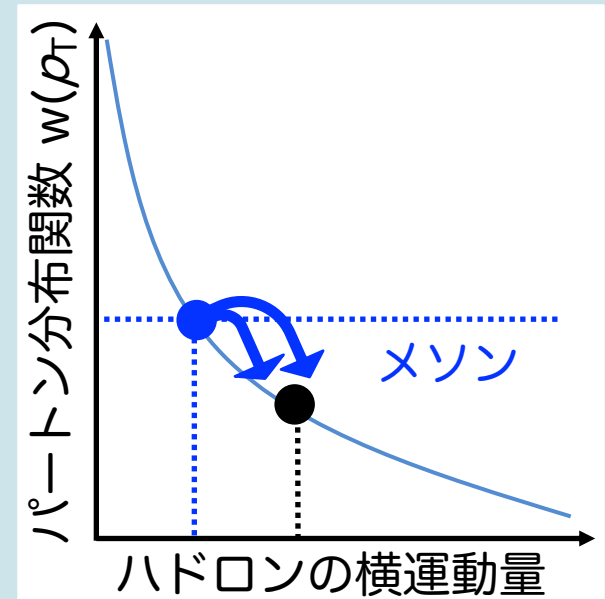
$$z = P_T/p_T < 1$$

基礎 II : バリオンの異常増加

陽子/中性 π 中間子比



例 : メソン @ 3 GeV/c
Quark: 1.5 GeV/c x 2



$$\frac{dN_h}{dP_T} \sim \left(w(P_T/N) \right)^N$$

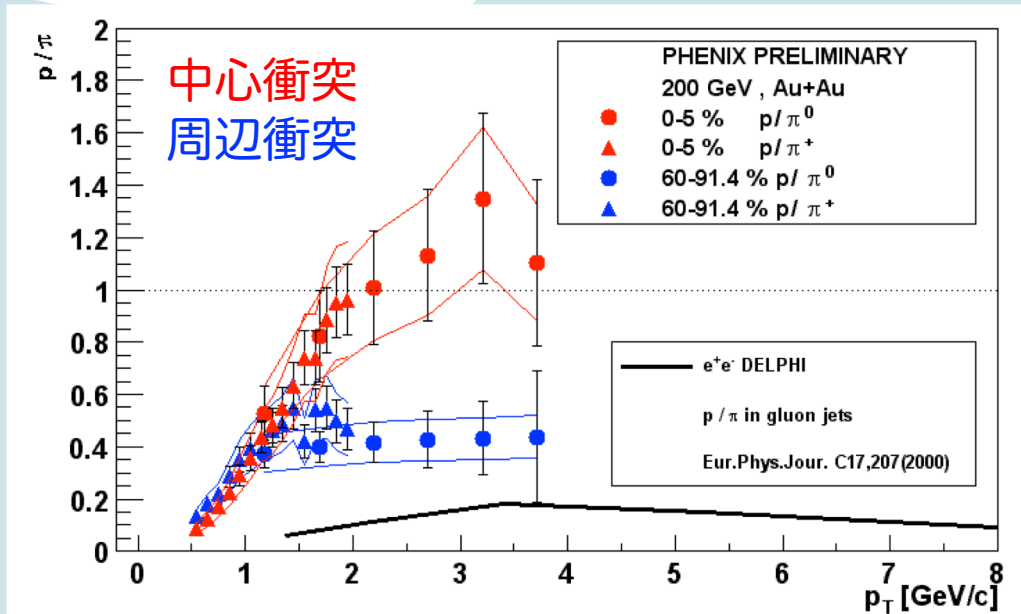
ハドロン収量

パートン分布

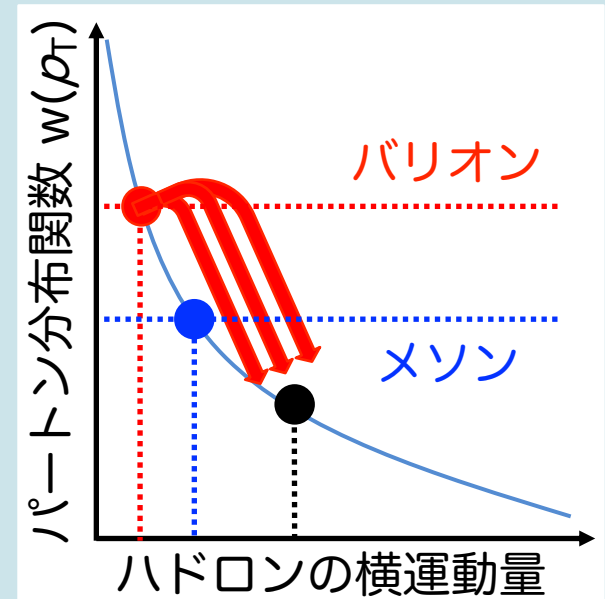
$N=2$

基礎 II : バリオンの異常増加

陽子/中性 π 中間子比



例 : メソン @ 3 GeV/c
Quark: 1.5 GeV/c x 2
例 : バリオン @ 3 GeV/c
Quark: 1 GeV/c x 3



$$\frac{dN_h}{dP_T} \sim \left(w(P_T/N) \right)^N$$

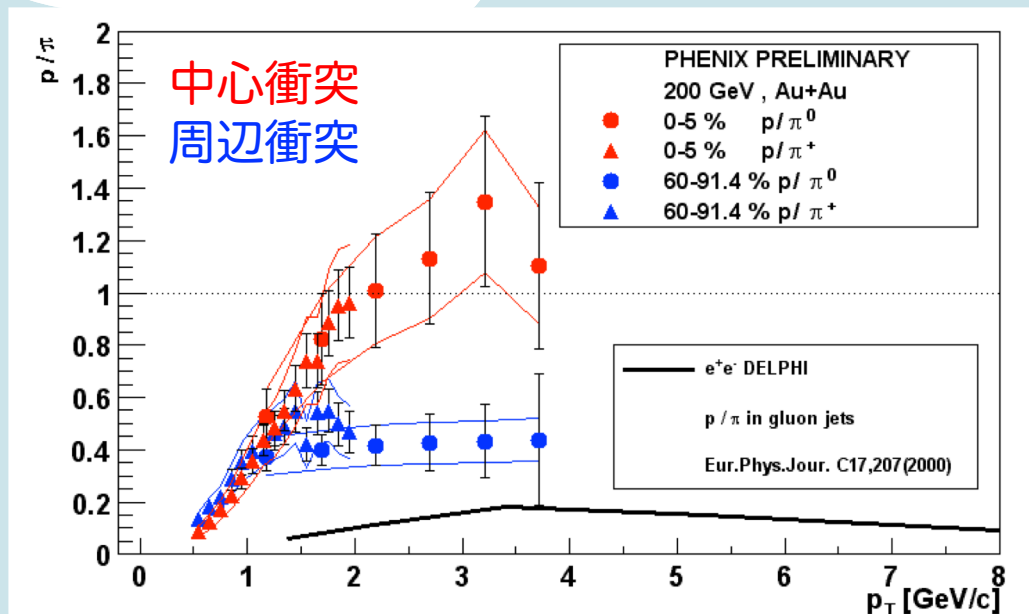
N=3

ハドロン収量

パートン分布

基礎 II : バリオンの異常増加

陽子/中性 π 中間子比

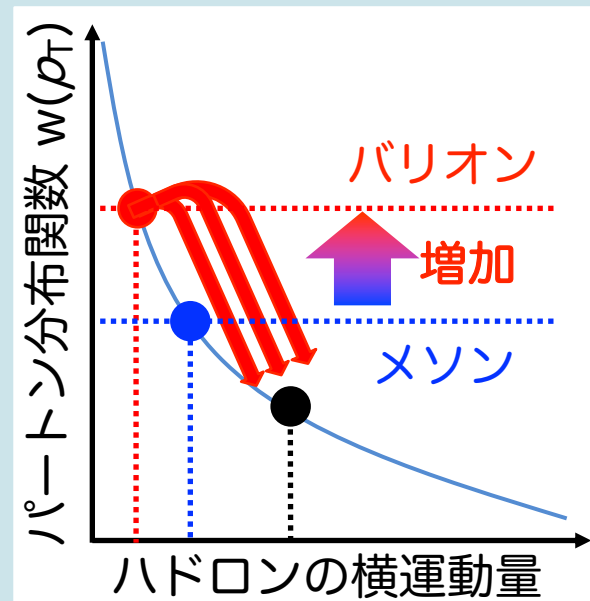


例 : メソン @ 3 GeV/c

Quark: 1.5 GeV/c x 2

例 : バリオン @ 3 GeV/c

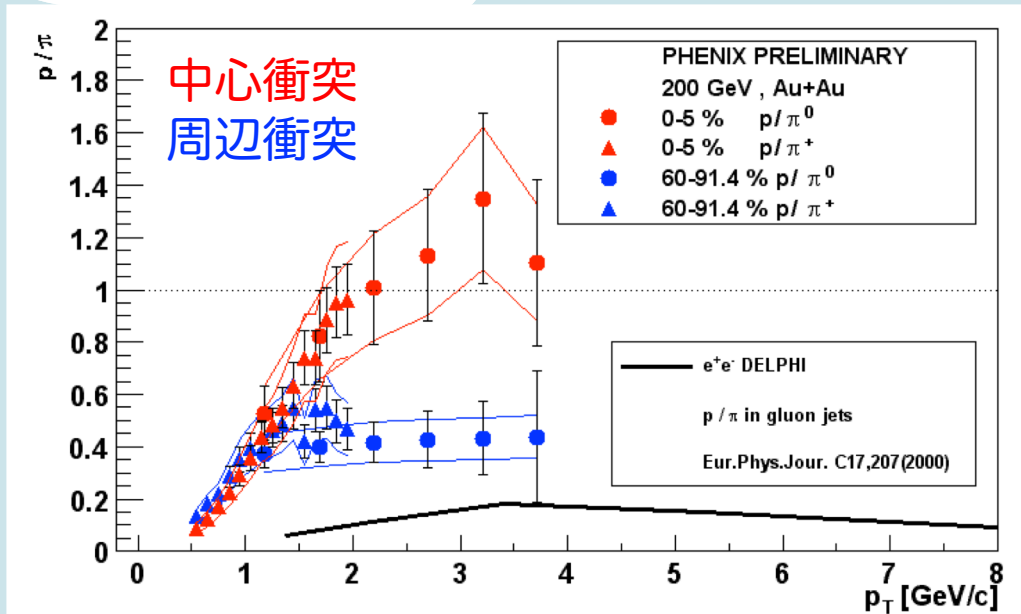
Quark: 1 GeV/c x 3



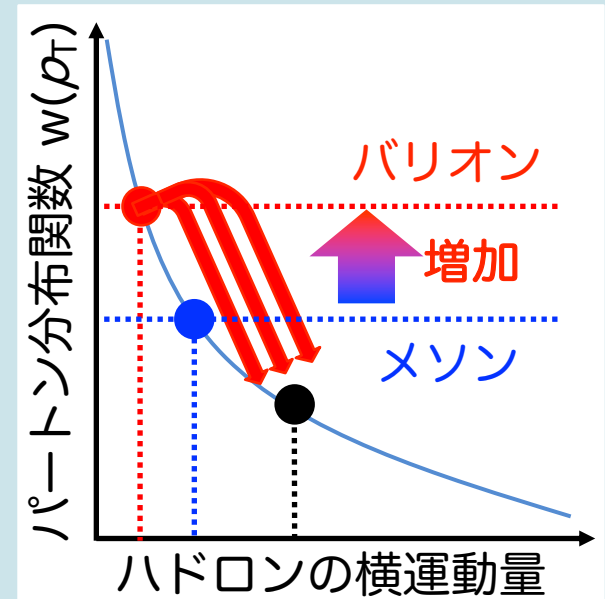
クォーク再結合の寄与が存在
バリオンの異常増加を説明できる

基礎 II : バリオンの異常増加

陽子/中性 π 中間子比



例 : メソン @ 3 GeV/c
Quark: 1.5 GeV/c x 2
例 : バリオン @ 3 GeV/c
Quark: 1 GeV/c x 3



パートン分布 : $w(p_T) \propto \exp(-p_T)$

$$\text{Recombination } \exp(-P_T) > \text{Fragmentation } \exp(-P_T/z)$$

パートン分布 : $w(p_T) \propto (p_T)^{-n}$

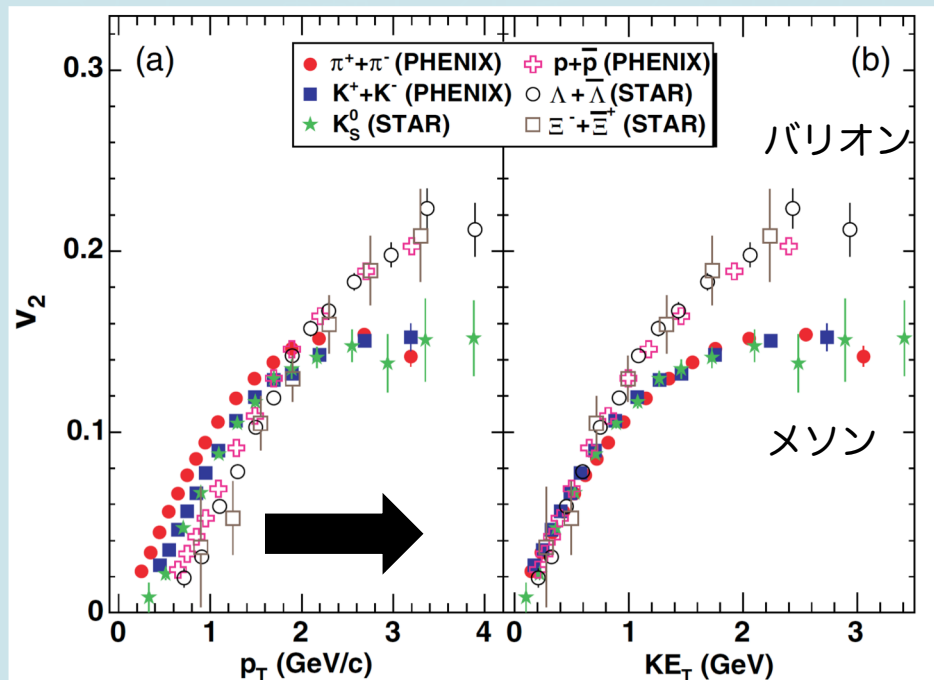
$$\text{Recombination } (P_T/N)^{-nN} < \text{Fragmentation } (P_T/z)$$

クォーク再結合の寄与が存在
バリオンの異常増加を説明できる

基礎III：楕円集団運動 (v_2) の質量依存性

- ハドロン集団運動の質量依存性

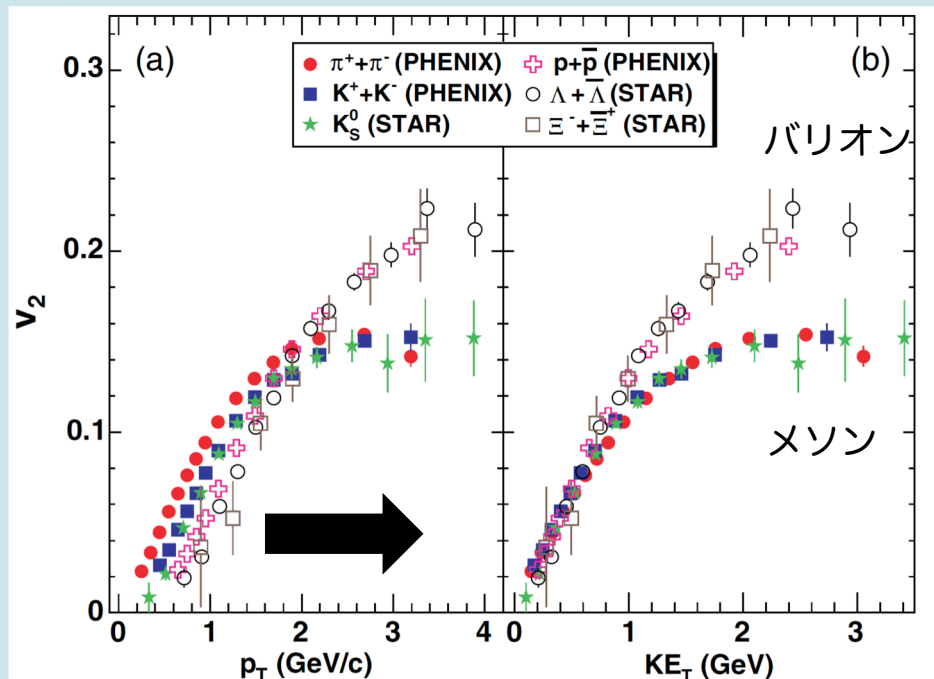
- $m_\pi=0.139, m_K=0.494, m_{K_S}=0.498, m_p=0.938, m_\Lambda=1.116, m_\Xi=1.135$ [GeV/ c^2]



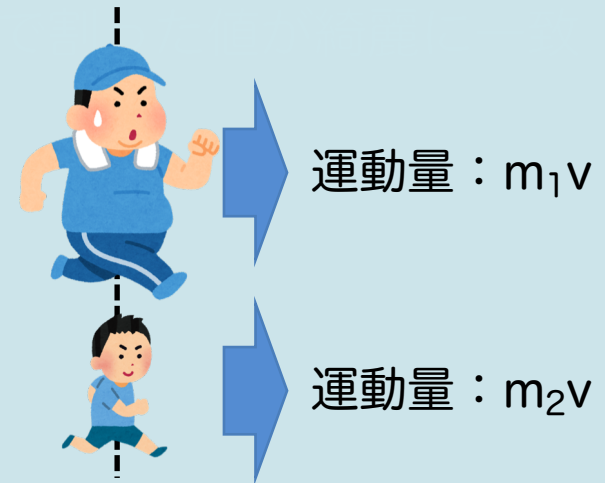
基礎III：楕円集団運動 (v_2) の質量依存性

• ハドロン集団運動の質量依存性

- $m_\pi=0.139$, $m_K=0.494$, $m_{K_S}=0.498$, $m_p=0.938$, $m_\Lambda=1.116$, $m_\Xi=1.135$ [GeV/c^2]
- 集団運動は粒子種に関係なく同じ速さ
- 重い粒子ほど運動量が大きくなる



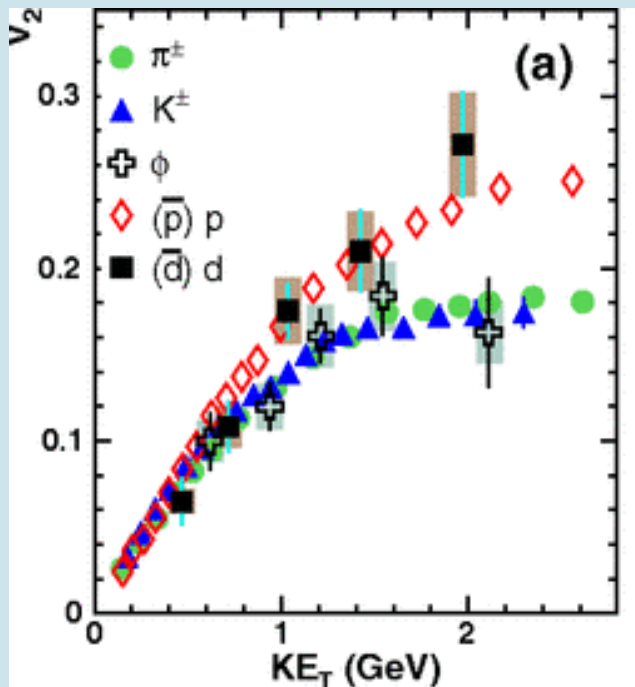
同じ速さ： v



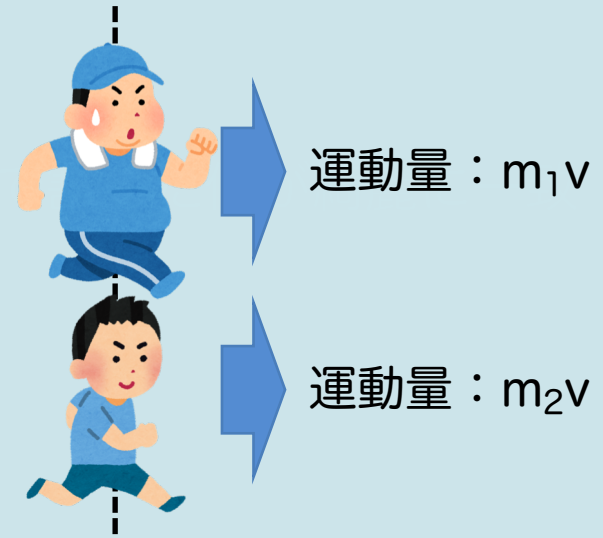
同じ速さの場合、運動量は重い粒子ほどブーストされる
ハドロンレベル？パートンレベル？

基礎III：楕円集団運動 (v_2) の質量依存性

- ハドロン集団運動の質量依存性
 - ハドロンの質量のみに依存していれば陽子と ϕ 中間子はほぼ同じはず
 - Proton: $0.938 \text{ GeV}/c^2$
 - ϕ -meson: $1.019 \text{ GeV}/c^2$



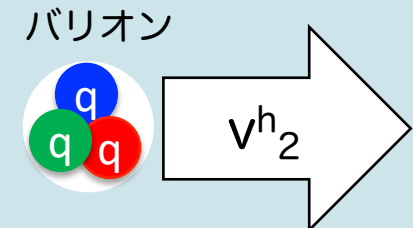
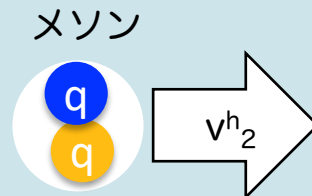
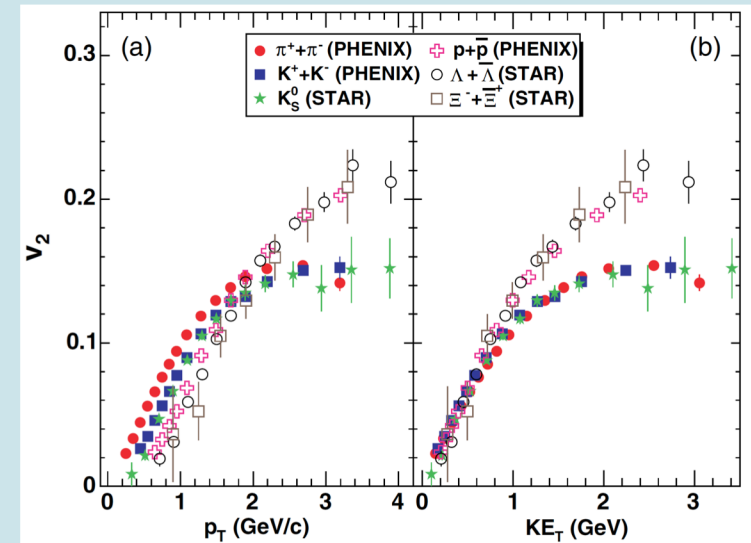
同じ速さ： v



ϕ 中間子はメソンの振る舞い
集団運動の起源はハドロンレベルではない？

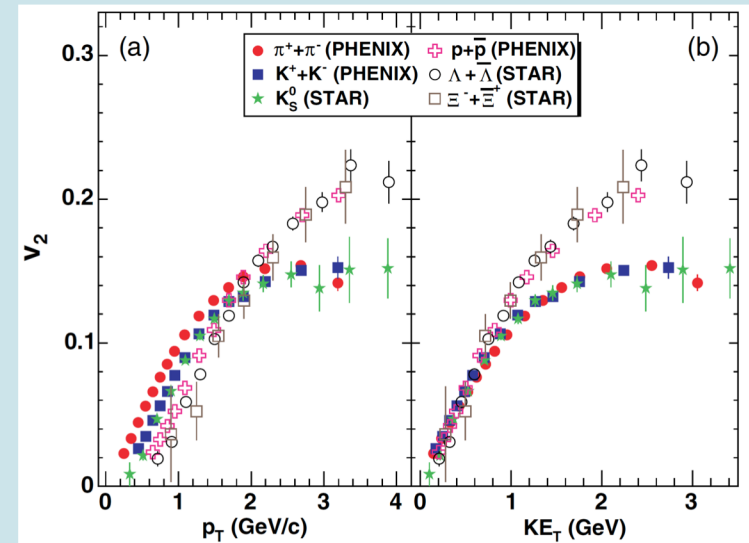
基礎Ⅳ：楕円集団運動 (v_2) の 構成クォーク数スケーリング

- ハドロン集団運動の質量依存性
 - 集団運動は粒子種に関係なく同じ速さ
 - 重い粒子ほど運動量が大きくなる

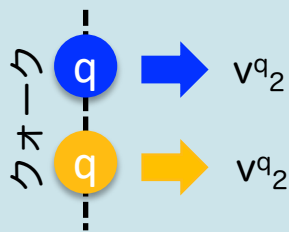


基礎Ⅳ：楕円集団運動 (v_2) の 構成クォーク数スケーリング

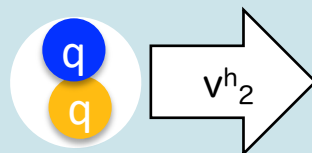
- ハドロン集団運動の質量依存性
 - 集団運動は粒子種に関係なく同じ速さ
 - 重い粒子ほど運動量が大きくなる



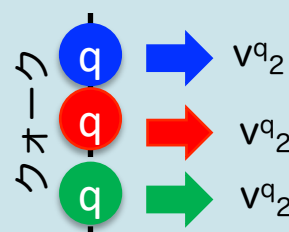
同じ速さ： v



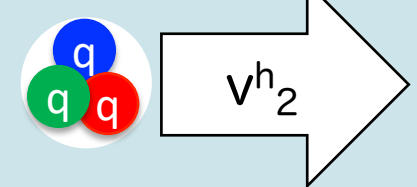
メソン



同じ速さ： v



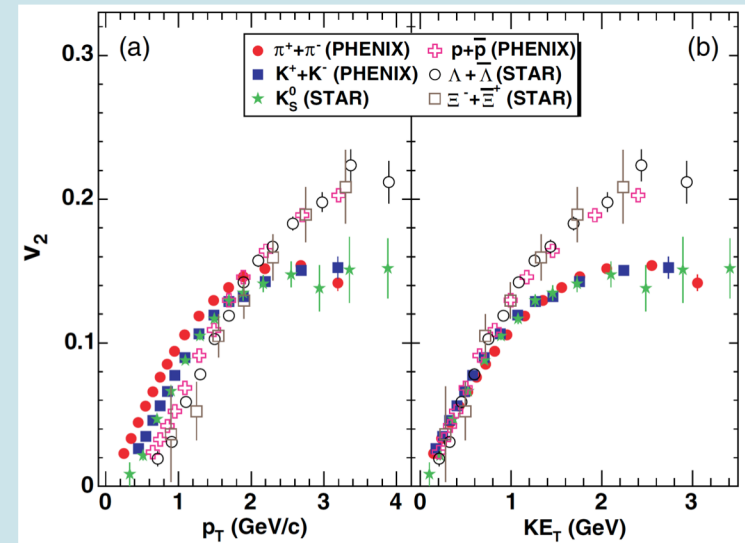
バリオン



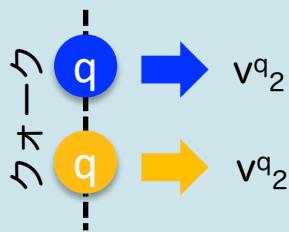
基礎Ⅳ：楕円集団運動 (v_2) の 構成クォーク数スケーリング

- ハドロン集団運動の質量依存性
 - 集団運動は粒子種に関係なく同じ速さ
 - 重い粒子ほど運動量が大きくなる

クォーク数スケーリング
(Quark number scaling)



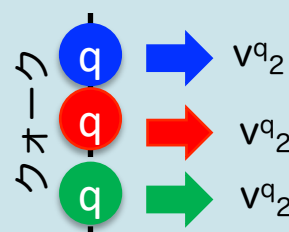
同じ速さ：v



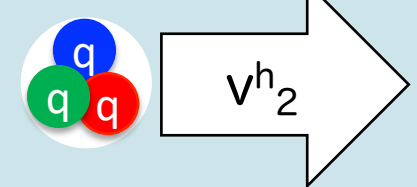
メソン



同じ速さ：v



バリオン

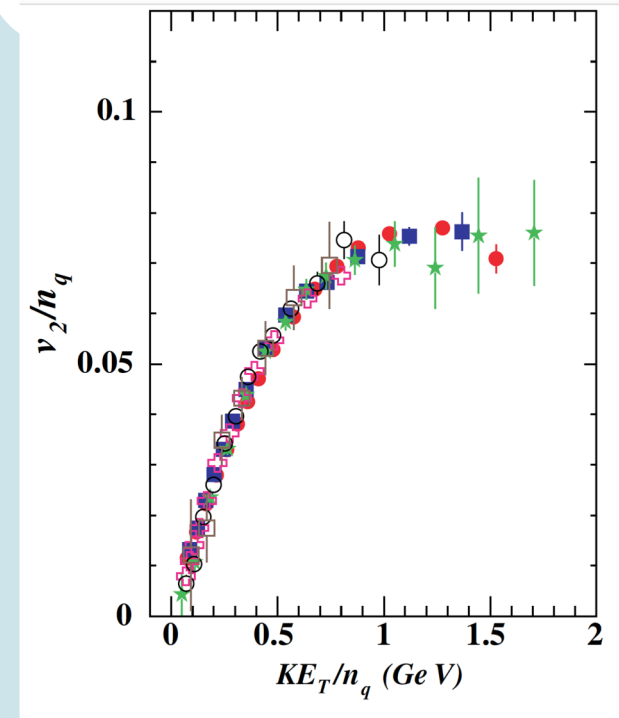


基礎Ⅳ：楕円集団運動 (v_2) の 構成クォーク数スケーリング

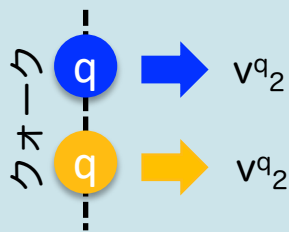
- ハドロン集団運動の質量依存性
 - 集団運動は粒子種に関係なく同じ速さ
 - 重い粒子ほど運動量が大きくなる

クォーク数スケーリング (Quark number scaling)

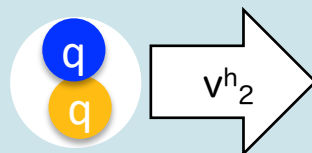
- 集団運動はハドロンレベルではなく、構成クォークレベルの現象である
- QGP中のクォーク再結合モデルの予想と一致



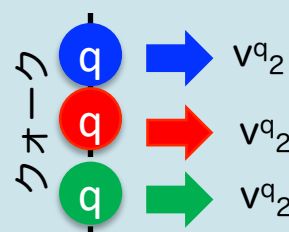
同じ速さ： v



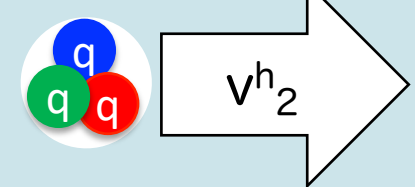
メソン



同じ速さ： v



バリオン





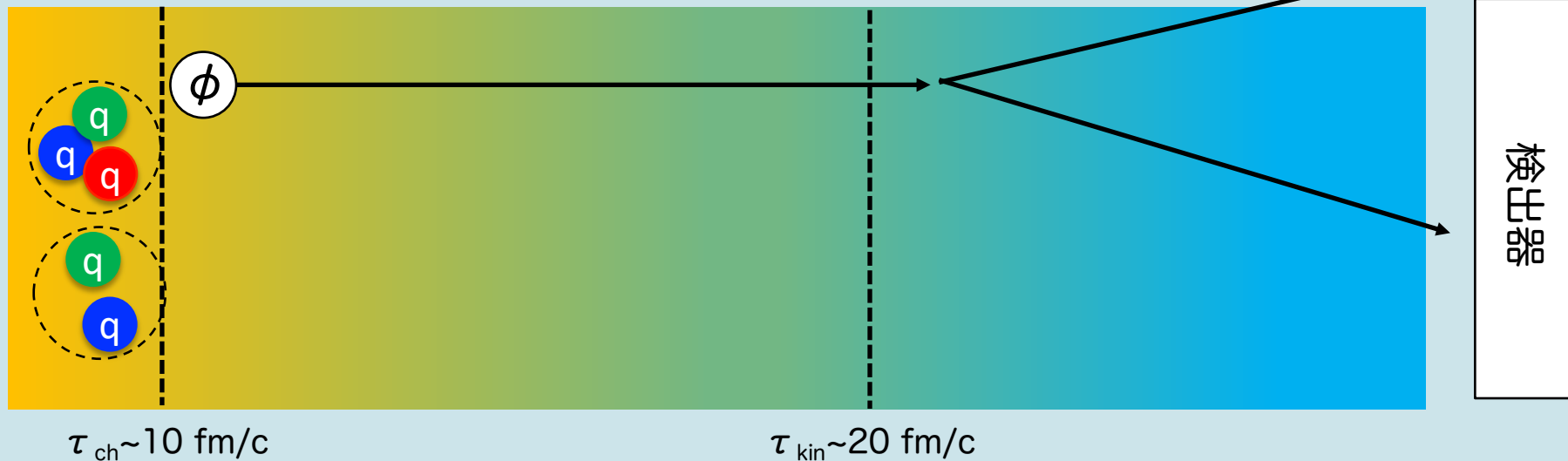
発展 最新の研究成果

発展I：ハドロンの最後

- 終状態相互作用
 - 化学的凍結後から運動学的凍結まで
- 寿命の短いハドロンは終状態相互作用の影響が大きい
 - $\rho(1.3) < K^{*0}(4.2) < \Sigma(5.5) < \Lambda(12.6) < \Xi(21.7) < \varphi(46.4)$ [fm/c]

化学的凍結 $T_{ch} \sim 156$ MeV

運動的凍結 $T_{kin} \sim 96$ MeV

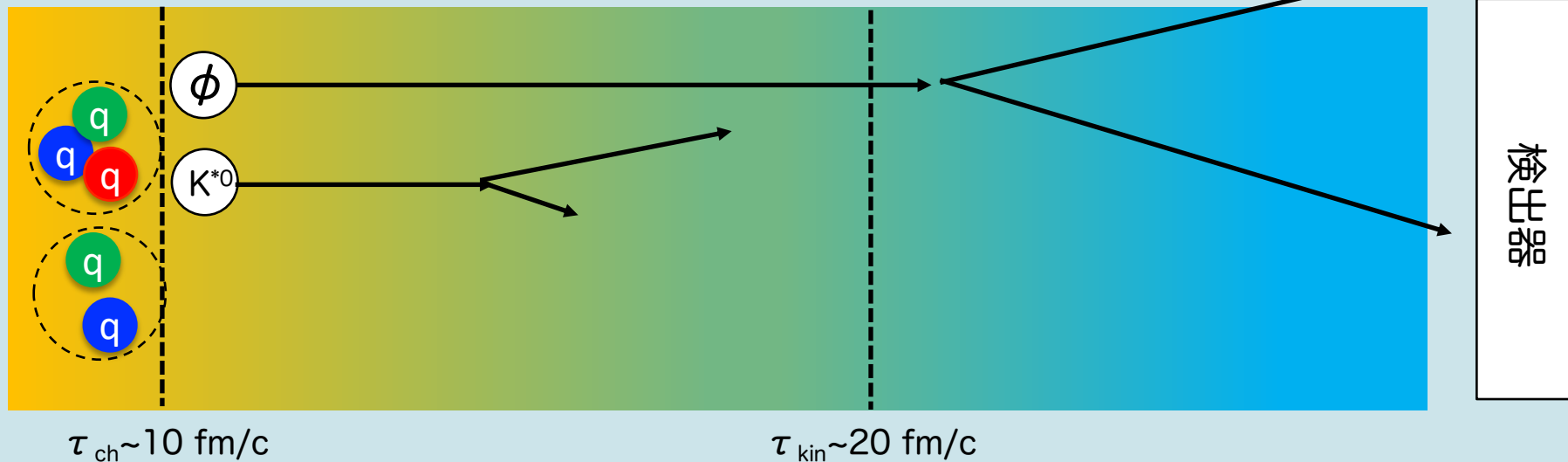


発展I：ハドロンの最後

- 終状態相互作用
 - 化学的凍結後から運動学的凍結まで
- 寿命の短いハドロンは終状態相互作用の影響が大きい
 - $\rho(1.3) < K^{*0}(4.2) < \Sigma(5.5) < \Lambda(12.6) < \Xi(21.7) < \varphi(46.4)$ [fm/c]

化学的凍結 $T_{ch} \sim 156$ MeV

運動的凍結 $T_{kin} \sim 96$ MeV

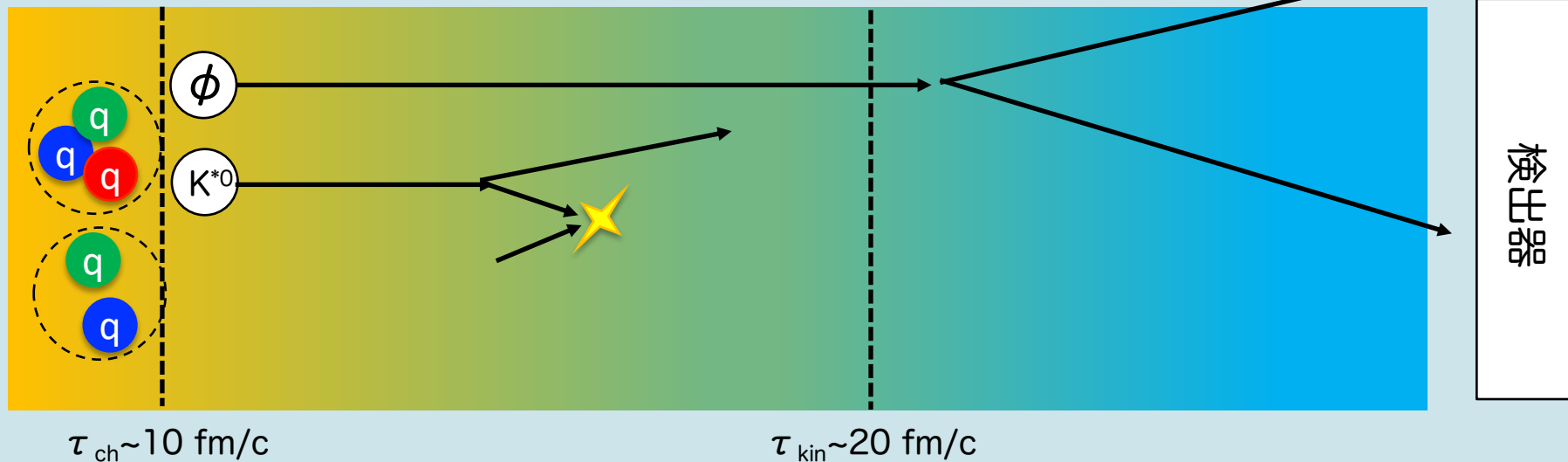


発展I：ハドロンの最後

- 終状態相互作用
 - 化学的凍結後から運動学的凍結まで
- 寿命の短いハドロンは終状態相互作用の影響が大きい
 - $\rho(1.3) < K^{*0}(4.2) < \Sigma(5.5) < \Lambda(12.6) < \Xi(21.7) < \varphi(46.4)$ [fm/c]

化学的凍結 $T_{ch} \sim 156$ MeV

運動的凍結 $T_{kin} \sim 96$ MeV

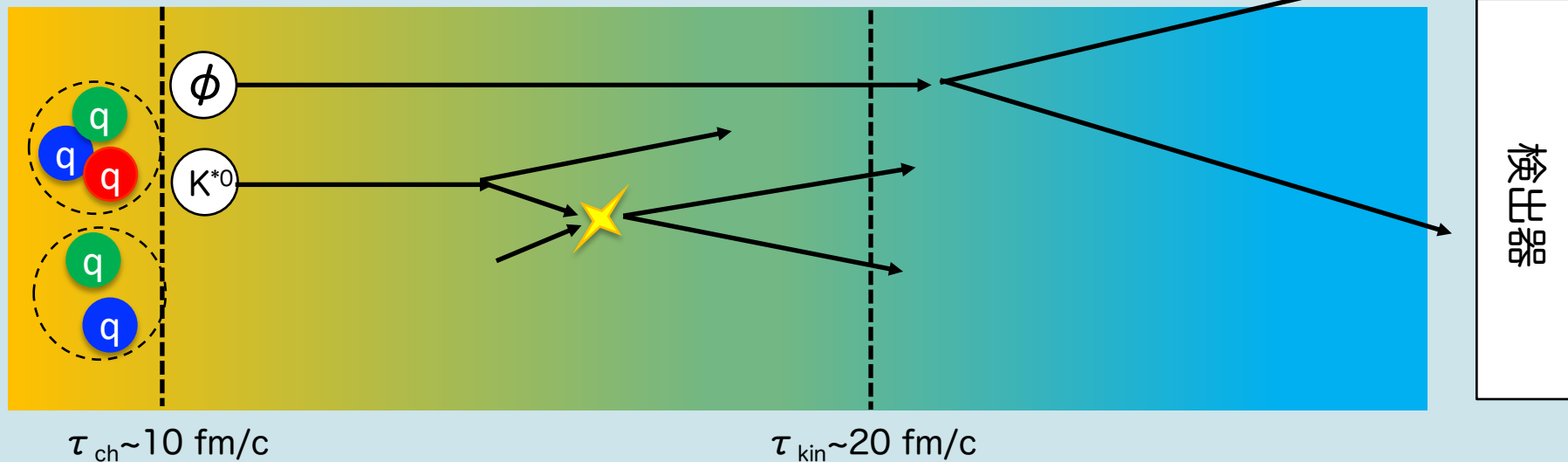


発展I：ハドロンの最後

- 終状態相互作用
 - 化学的凍結後から運動学的凍結まで
- 寿命の短いハドロンは終状態相互作用の影響が大きい
 - $\rho(1.3) < K^{*0}(4.2) < \Sigma(5.5) < \Lambda(12.6) < \Xi(21.7) < \varphi(46.4)$ [fm/c]

化学的凍結 $T_{ch} \sim 156$ MeV

運動的凍結 $T_{kin} \sim 96$ MeV

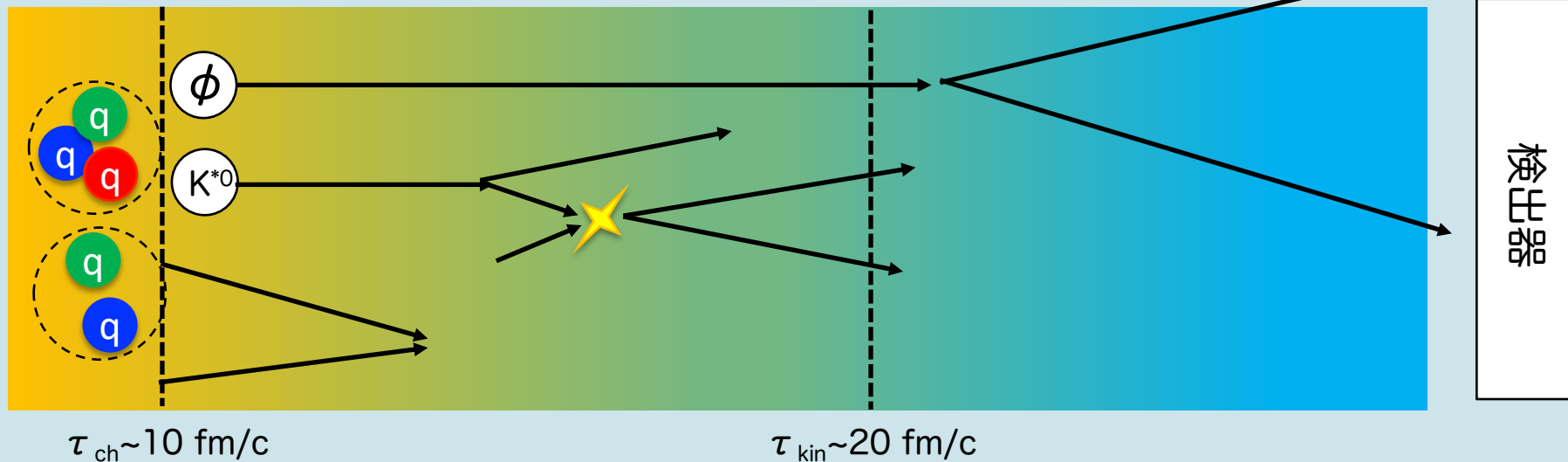


発展I：ハドロンの最後

- 終状態相互作用
 - 化学的凍結後から運動学的凍結まで
- 寿命の短いハドロンは終状態相互作用の影響が大きい
 - $\rho(1.3) < K^{*0}(4.2) < \Sigma(5.5) < \Lambda(12.6) < \Xi(21.7) < \varphi(46.4)$ [fm/c]

化学的凍結 $T_{ch} \sim 156$ MeV

運動的凍結 $T_{kin} \sim 96$ MeV

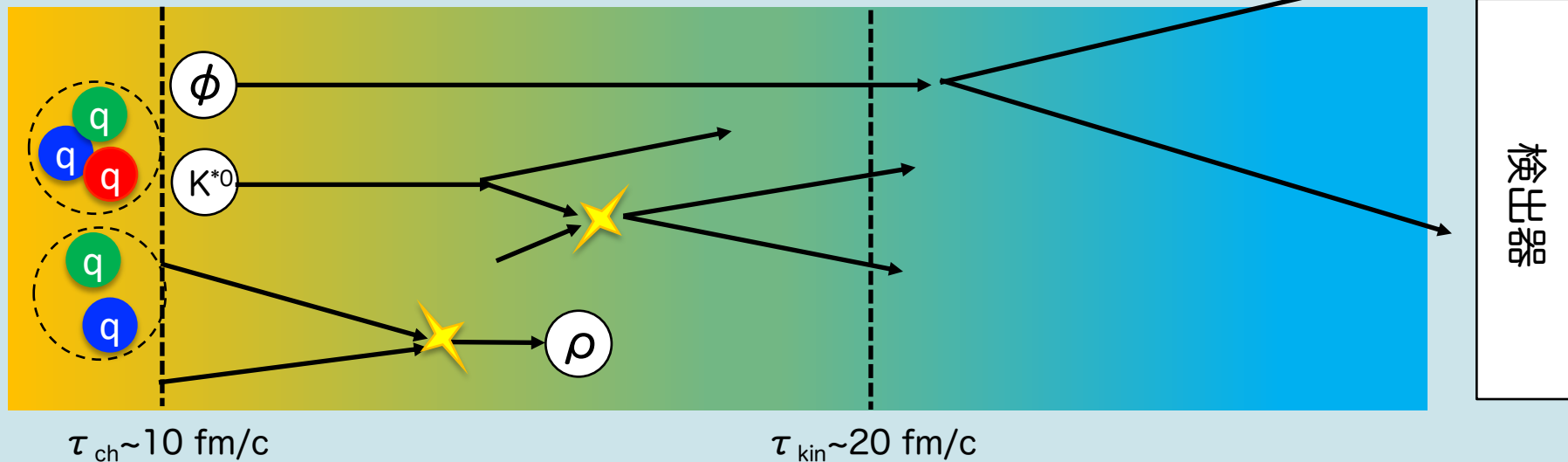


発展I：ハドロンの最後

- 終状態相互作用
 - 化学的凍結後から運動学的凍結まで
- 寿命の短いハドロンは終状態相互作用の影響が大きい
 - $\rho(1.3) < K^{*0}(4.2) < \Sigma(5.5) < \Lambda(12.6) < \Xi(21.7) < \varphi(46.4)$ [fm/c]

化学的凍結 $T_{ch} \sim 156$ MeV

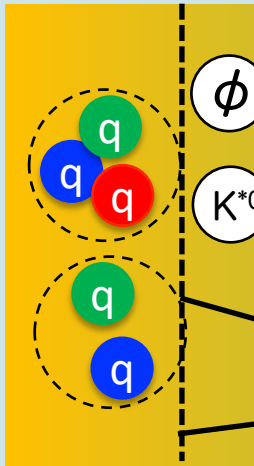
運動的凍結 $T_{kin} \sim 96$ MeV



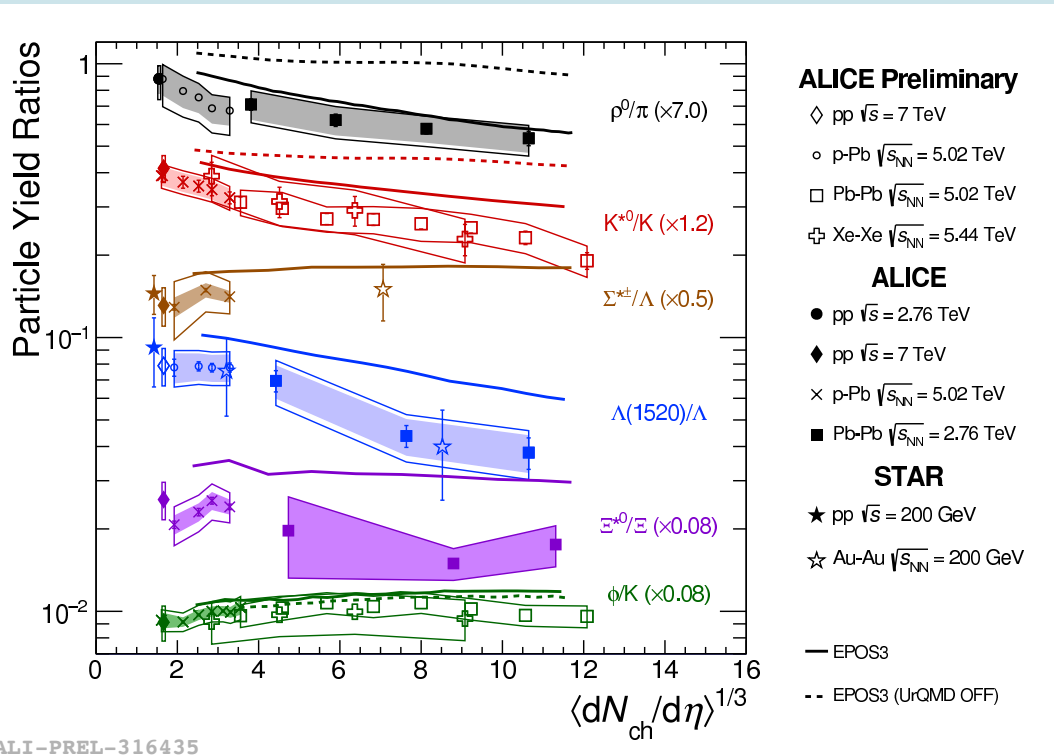
発展I：ハドロンの最後

- 終状態相互作用
 - 化学的凍結後から運動学的凍結まで
- 寿命の短いハドロンは終状態相互作用の影響が大きい
 - $\rho(1.3) < K^{*0}(4.2) < \Sigma(5.5) < \Lambda(12.6) < \Xi(21.7) < \phi(46.4)$ [fm/c]

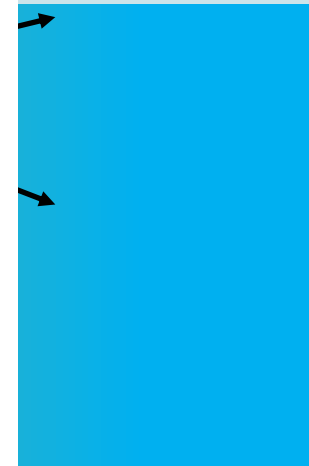
化学的凍結 $T_{ch} \sim$



$\tau_{ch} \sim 10$ fm



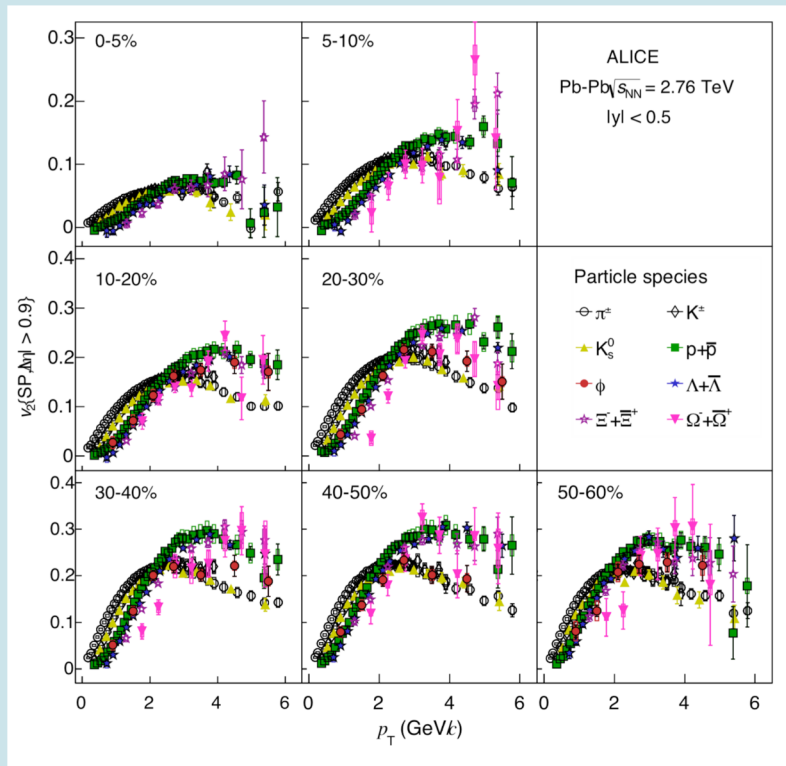
ALI-PREL-316435



検出器

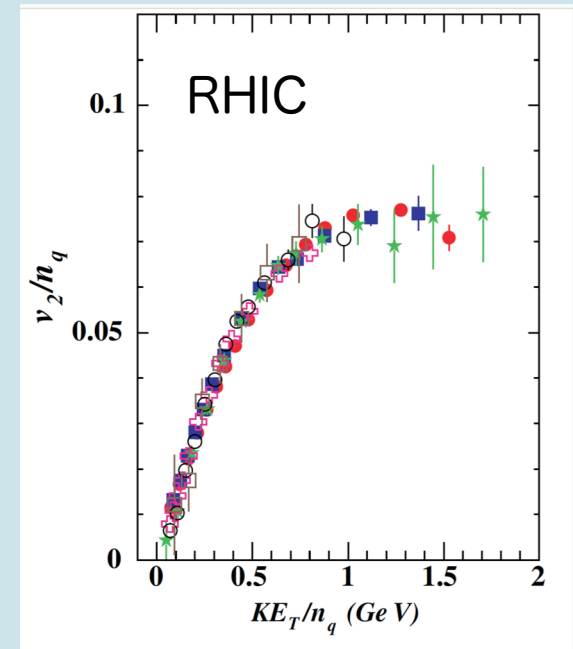
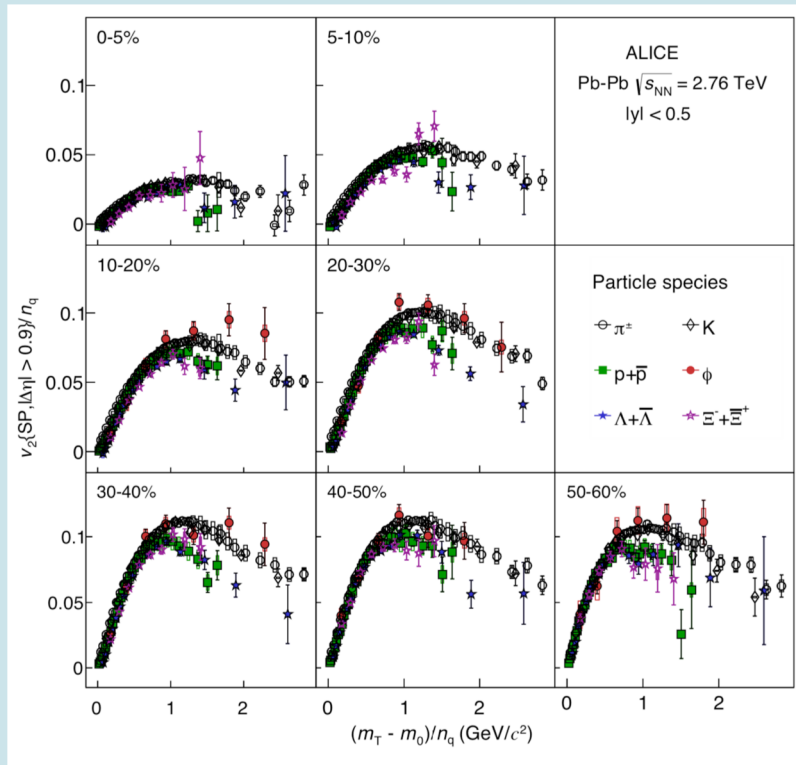
発展II：楕円集団運動 (v_2) の 構成クォーク数スケーリングの破綻

- 各粒子種の質量依存性はいい感じ



発展II：楕円集団運動 (v_2) の 構成クォーク数スケーリングの破綻

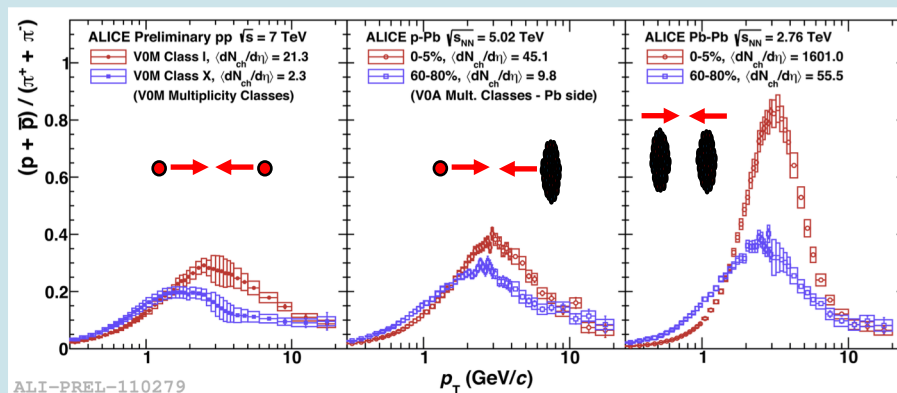
- 各粒子種の質量依存性はいい感じ
- しかし、クォーク数スケールがなりたっていない



クォーク再結合の見直し?
新しい集団運動の機構?

発展III：ハドロンの流体的振る舞い 小さい衝突系@LHC

- バリオン生成量比の粒子多重度（荷電粒子生成量）依存性
 - まるでQGPが生成しているような振る舞い



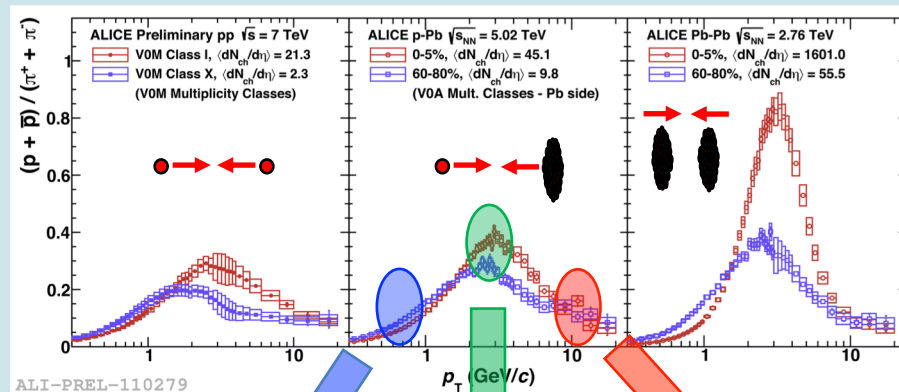
小さな衝突系でも集団運動？

同じ速さ：v

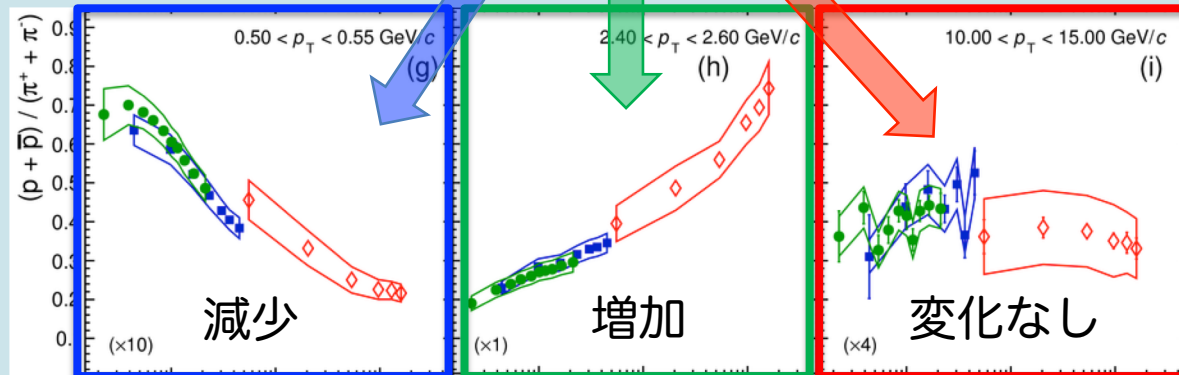


発展III：ハドロンの流体的振る舞い 小さい衝突系@LHC

- バリオン生成量比の粒子多重度（荷電粒子生成量）依存性
 - まるでQGPが生成しているような振る舞い



小さな衝突系でも集団運動？



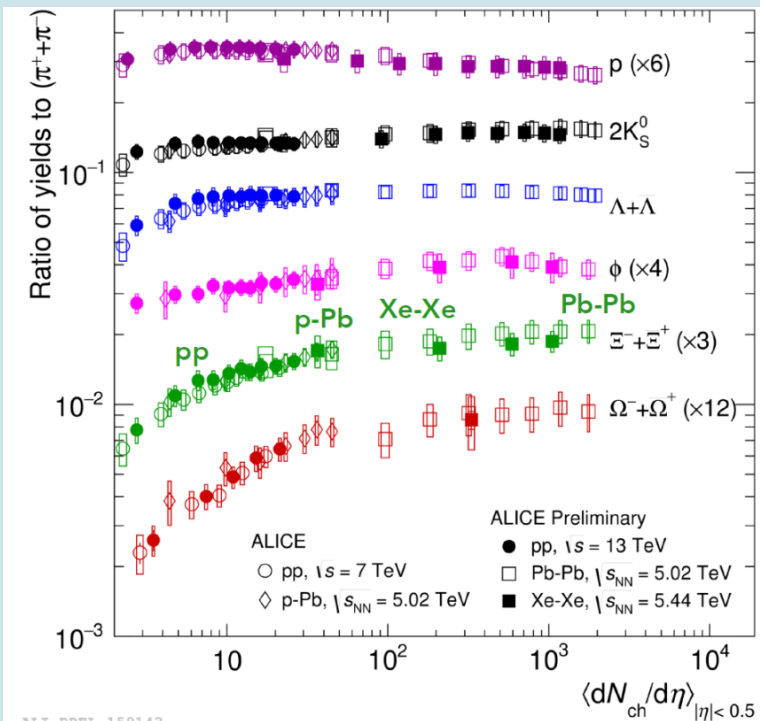
生成粒子多重度

同じ速さ：v



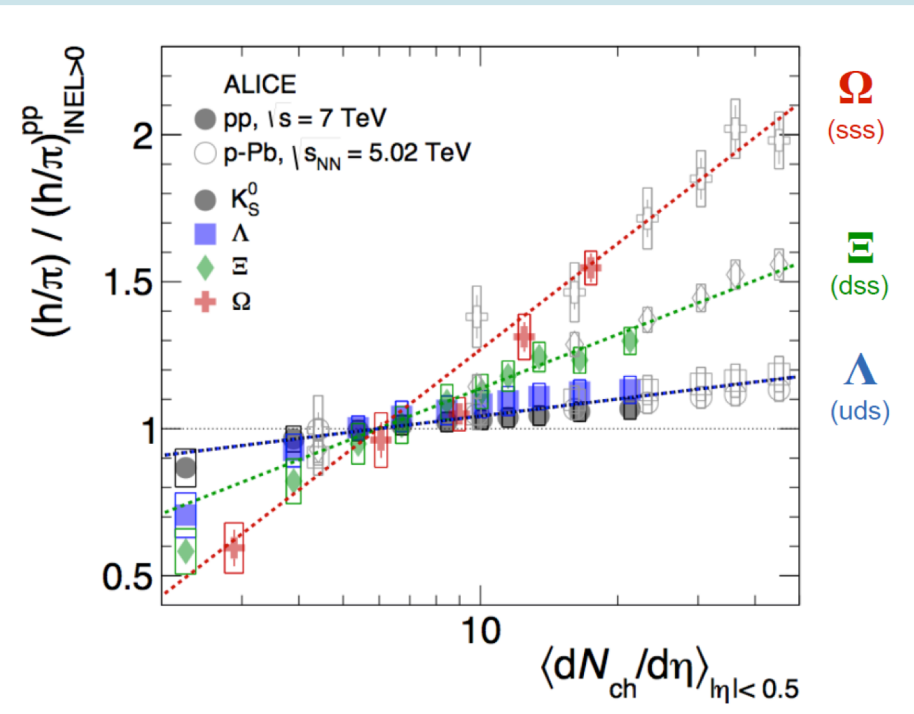
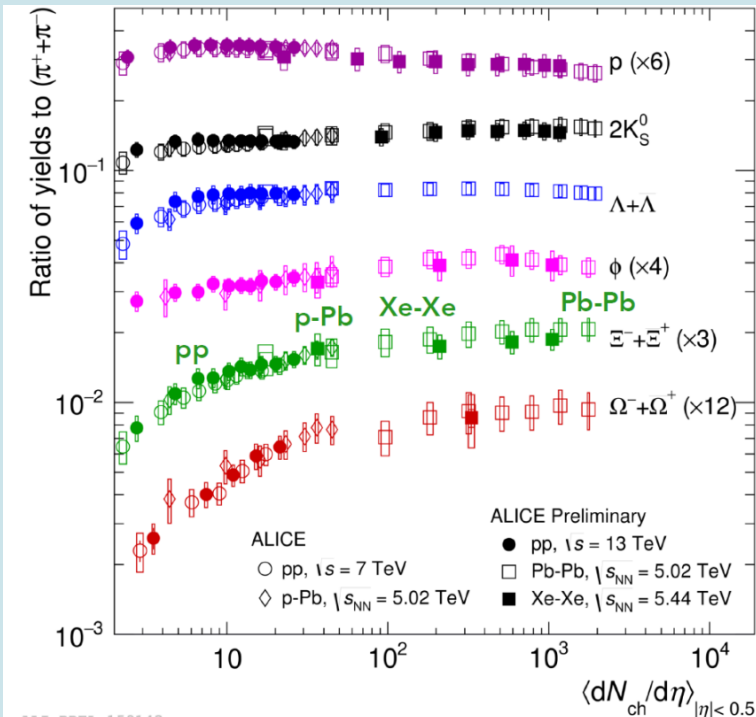
発展Ⅳ：ストレンジネスの異常増加 小さい衝突系@LHC

- 高粒子多重度事象においてストレンジネスハドロンの異常増加
 - QGP生成のシグナル？ ($gg \rightarrow ss$: gluon fusion in QGP)



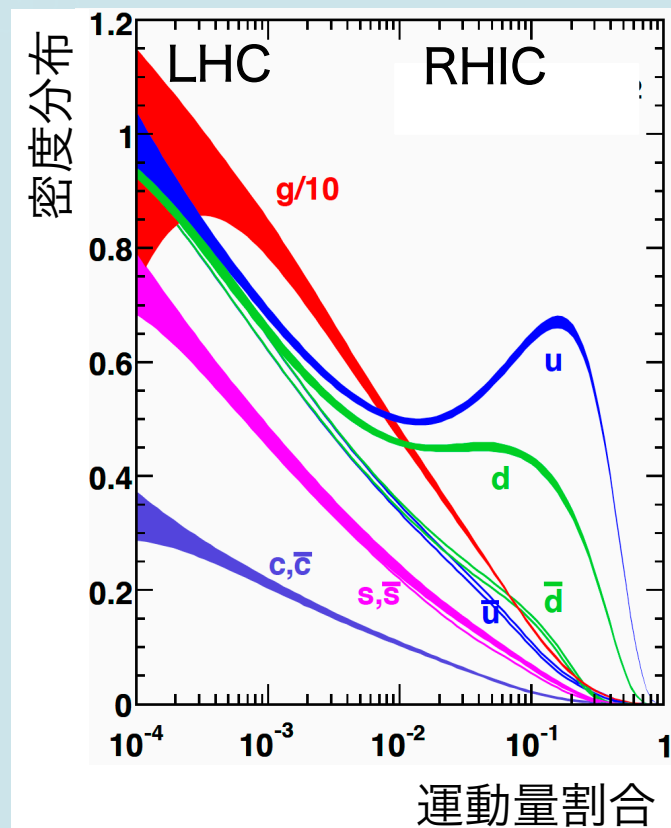
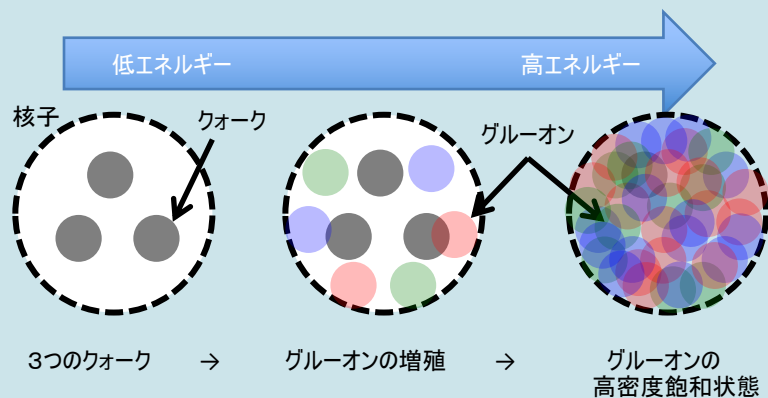
発展Ⅳ：ストレンジネスの異常増加 小さい衝突系@LHC

- 高粒子多重度事象においてストレンジネスハドロンの異常増加
 - QGP生成のシグナル? ($gg \rightarrow ss$: gluon fusion in QGP)
- ストレンジネス含有量に伴い増加
 - $\Lambda(S=1)$ $\Xi(S=2)$ $\Omega(S=3)$



発展V：衝突初期多重パートン散乱の ハドロン生成への影響

- 衝突初期多重パートン散乱 (Multiple Parton Interaction: MPI)
 - ビームエネルギーの増加に伴う核子内パートン分布の変化

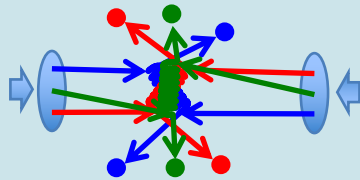


発展V：衝突初期多重パートン散乱の影響

ハドロン生成への影響

- 衝突初期多重パートン散乱 (Multiple Parton Interaction: MPI)
 - ビームエネルギーの増加に伴う核子内パートン分布の変化
- カラー再結合 (Color Reconnection: CR)
 - ① Multiple Parton Interactions

①

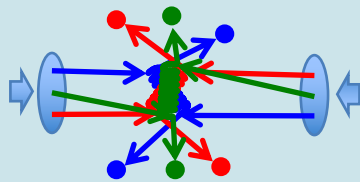


発展V：衝突初期多重パートン散乱の影響

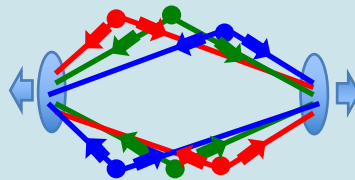
ハドロン生成への影響

- 衝突初期多重パートン散乱 (Multiple Parton Interaction: MPI)
 - ビームエネルギーの増加に伴う核子内パートン分布の変化
- カラー再結合 (Color Reconnection: CR)
 - ①Multiple Parton Interactions
 - ②Color connection

①



②

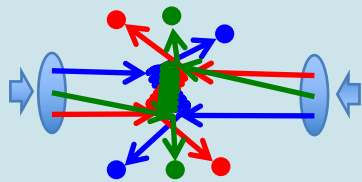


発展V：衝突初期多重パートン散乱の影響

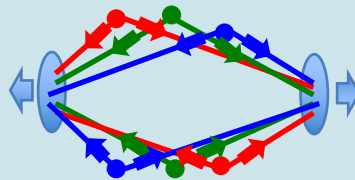
ハドロン生成への影響

- 衝突初期多重パートン散乱 (Multiple Parton Interaction: MPI)
 - ビームエネルギーの増加に伴う核子内パートン分布の変化
- カラー再結合 (Color Reconnection: CR)
 - ①Multiple Parton Interactions
 - ②Color connection
 - ③Color reconnection (CR)

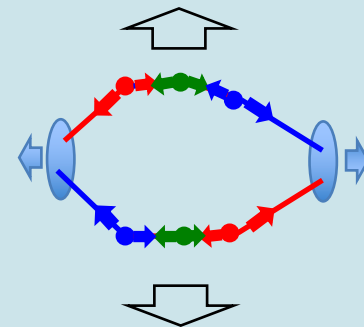
①



②



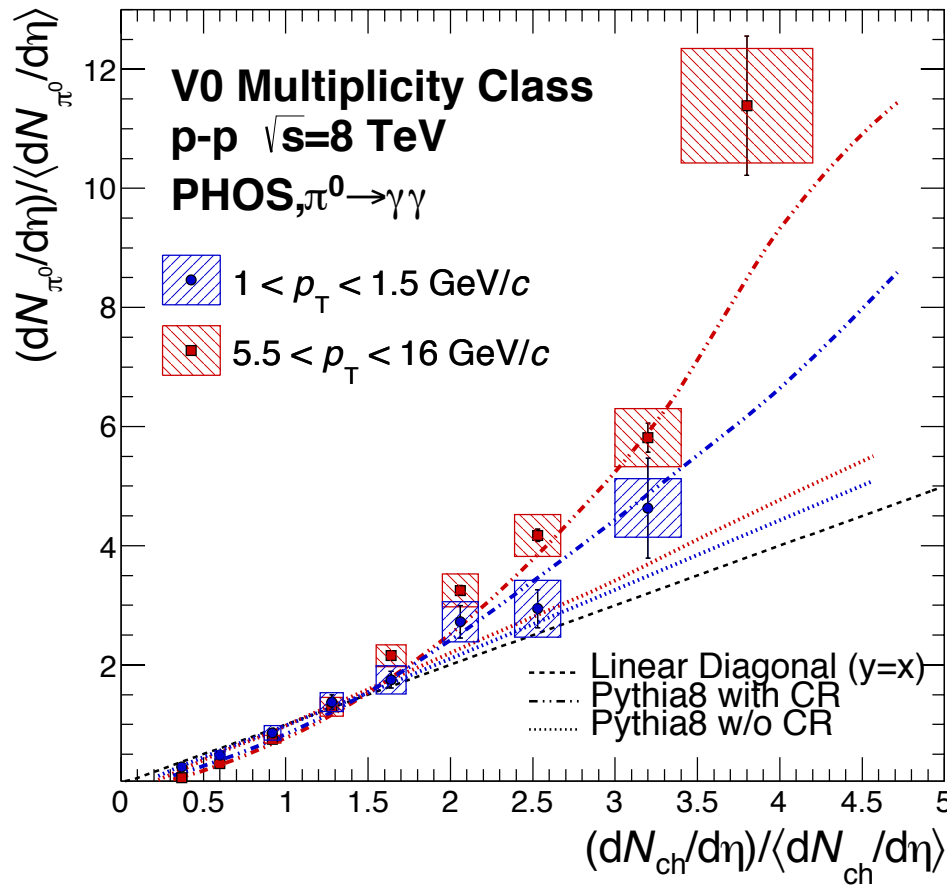
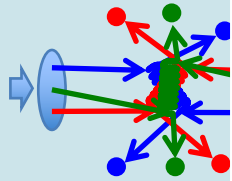
③



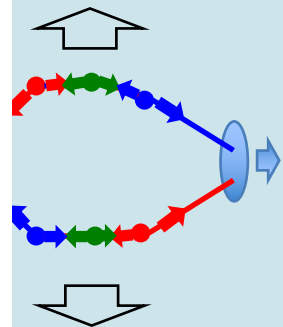
発展V：衝突初期多重パートン散乱の影響 ハドロン生成への影響

- 衝突初期多重パートン散乱 (Multiple Parton Interaction: MPI)
 - ビームエネルギー
- カラー再結合
 - ① Multiple Parton Interaction (MPI)
 - ② Color Reconnection (CR)
 - ③ Color Pre-hadronization (CPH)

①



変化

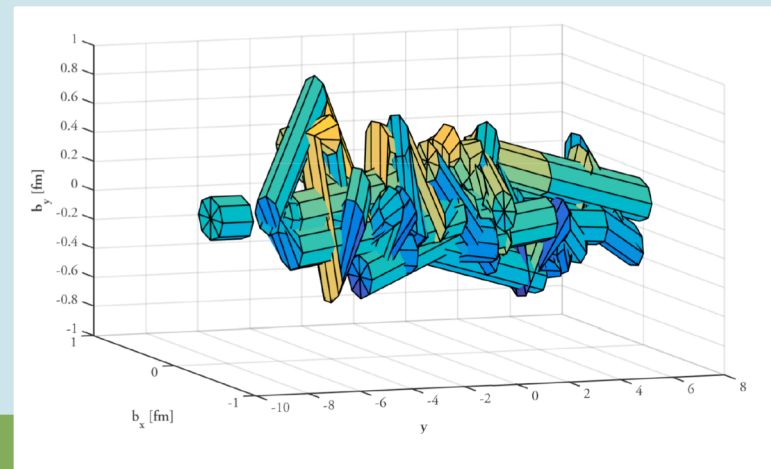


発展V：衝突初期多重パートン散乱の ハドロン生成への影響

- 衝突初期多重パートン散乱 (Multiple Parton Interaction: MPI)
 - ビームエネルギーの増加に伴う核子内パートン分布の変化
- カラー再結合 (Color Reconnection: CR)
 - ①Multiple Parton Interactions
 - ②Color connection
 - ③Color reconnection (CR)
- カラーロープ (Color Rope)
 - MPIによるカラーリングの合体 = カラーロープの形成
 - ストリング張力の増加



カラーロープ



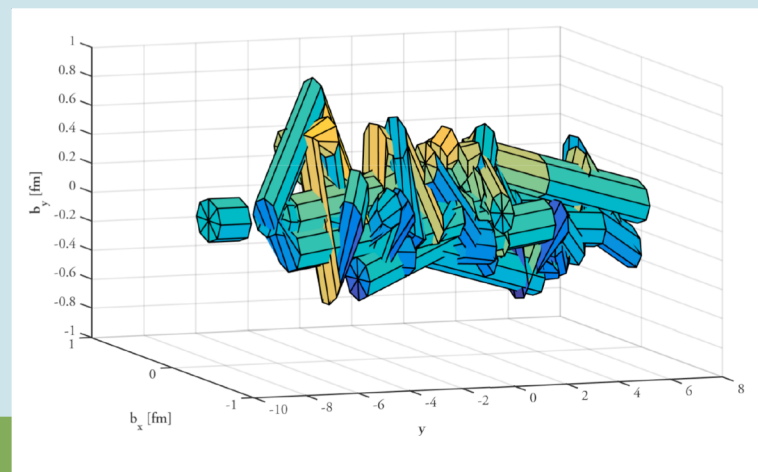
発展V：衝突初期多重パートン散乱の ハドロン生成への影響

- 衝突初期多重パートン散乱 (Multiple Parton Interaction: MPI)
 - ビームエネルギーの増加に伴う核子内パートン分布の変化
- カラー再結合 (Color Reconnection: CR)
 - ①Multiple Parton Interactions
 - ②Color connection
 - ③Color reconnection (CR)
- カラーロープ (Color Rope)
 - MPIによるカラースtringの合体 = カラーロープの形成
 - String張力の増加

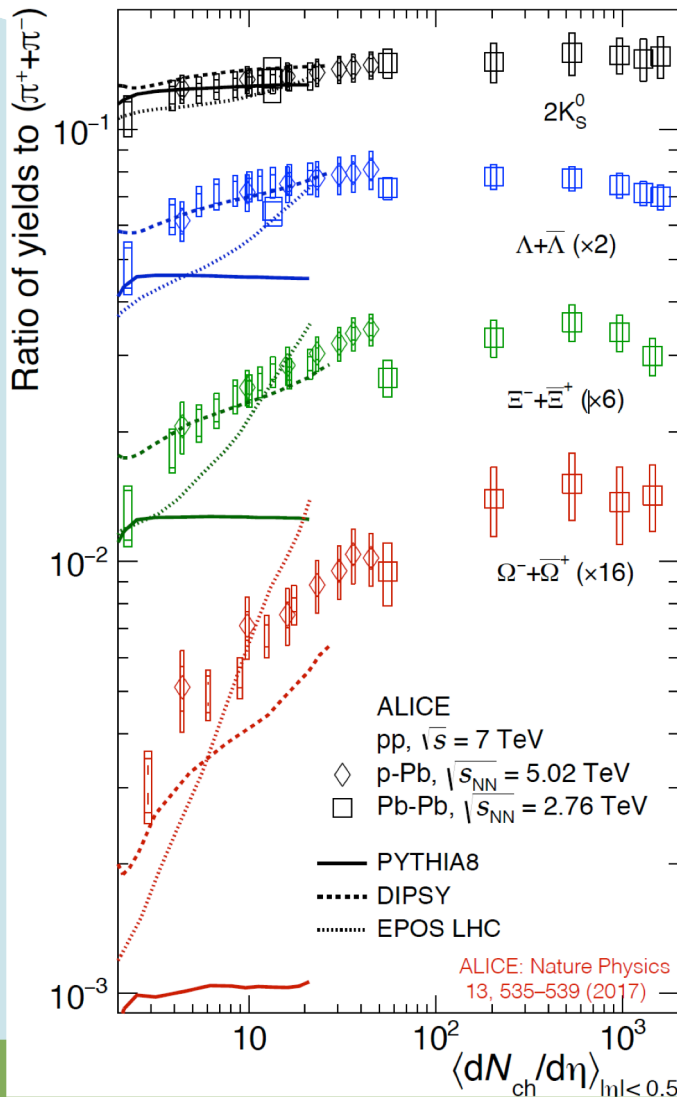


カラーロープ

クォーク対生成確率 $\propto \kappa \exp(-Am_\pi^2/\kappa)$



発展V：衝突初期多重パートン散乱のハドロン生成への影響



乱 (Multiple Parton Interaction: MPI)

に伴う核子内パートン分布の変化

connection: CR)

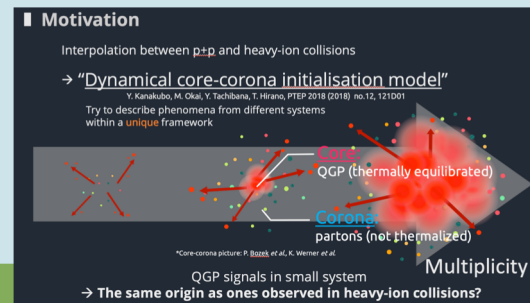
interactions

(CR)

type)

シングの合体 = カラーロープの形成

ストレンジハドロンの増加をうまく説明
 でも他にもモデルの候補も...



Y. Kanakubo SQM2019

まとめ

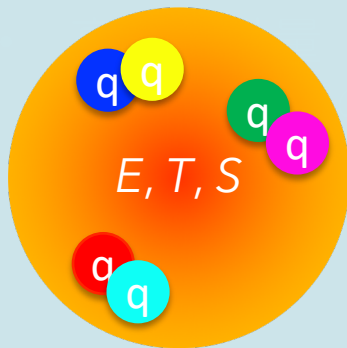
- 真空ではクォーク対生成によりハドロン生成（ストリングモデル）
- 高エネルギー原子核衝突実験ではQGP中におけるクォーク再結合の寄与が大きい
 - RHICにおけるバリオンの異常増加
 - RHICにおけるハドロン集団運動の構成クォーク数スケール
 - しかし、LHCではその他の寄与がある（っぽい）
- 化学的凍結と運動学的凍結に“時間差“があるためハドロンの運命は変わる
- LHCでは小さな衝突系におけるハドロン生成の新展開がありそう
 - もっともっと精査が必要（事象クラス分け、ハドロン種、崩壊チャンネルなど）
- ハドロン化は単純ではない

Extra slides

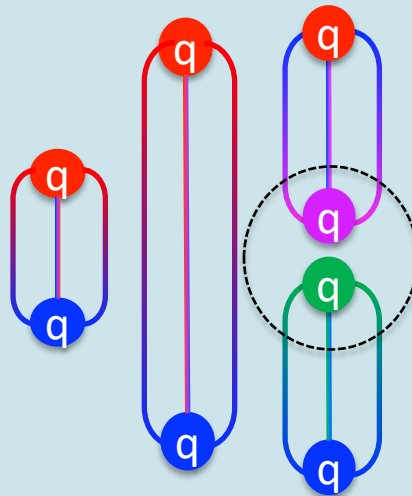


真空中におけるハドロン化 (陽子+陽子衝突など)

- パートンの破砕
 - 無色になるまで破砕が続く
- 低横運動量 (ソフト) 領域は熱力学的分布
 - 真空からクォーク対を生み出す (熱力学系)
 - Hagedorn、Tsallis関数など
 - ハドロン横運動量分布の形はボルツマン分布
 - エネルギー $E_T = \sqrt{p_T^2 + m_0^2} = m_T$ で決定
 - 絶対量は構成クォークの状態によって異なる



ボルツマン分布



真空からクォーク
対を生成し続けて
なんとか無色にc

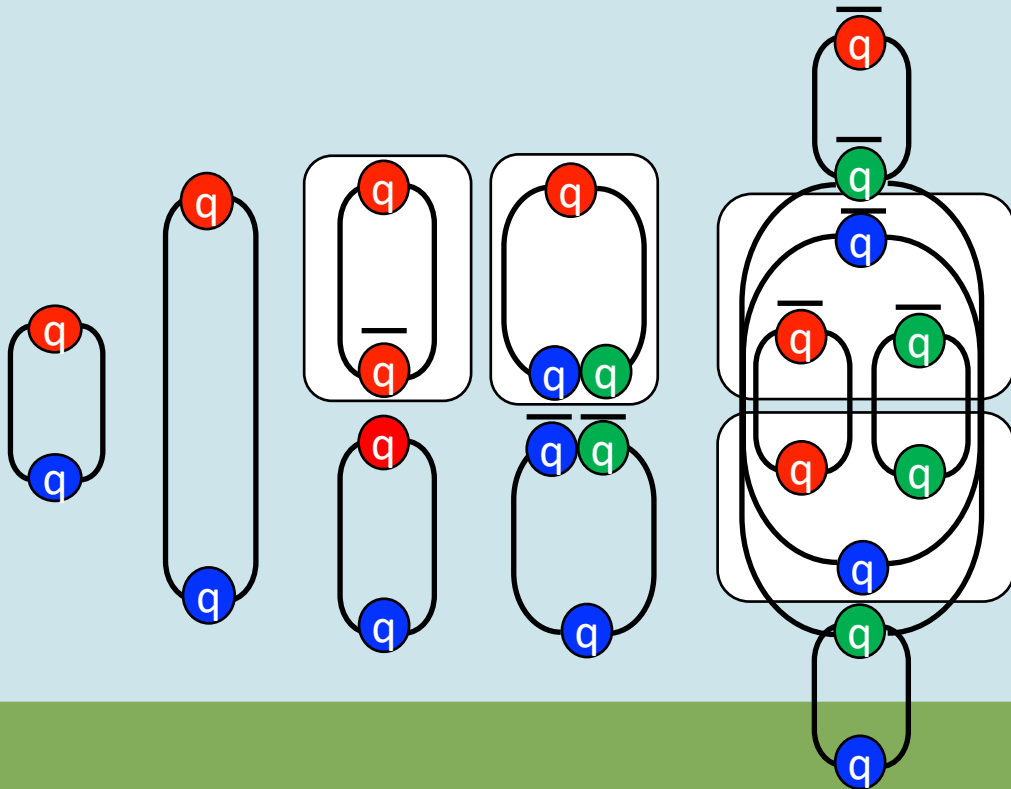
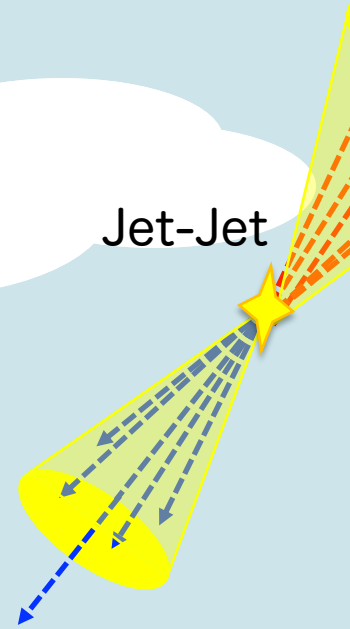
...



真空中におけるハドロン化 (陽子+陽子衝突など)

- パートの破砕 (ストリングモデル)
 - 無色になるまで破砕が続く
- クォーク対生成はボルツマン分布に従う $P \sim \exp(-\alpha E)$
 - 低横運動量領域: $E_T = m_T = \sqrt{p_T^2 + m_0^2}$ のみの関数
 - 高横運動量領域: 衝突初期の p_T^n の関数

Jet-Jet



クォーク対生成確率 $\propto \exp(-Am_T^2)$
 ダイクォーク対生成確率は抑えられる



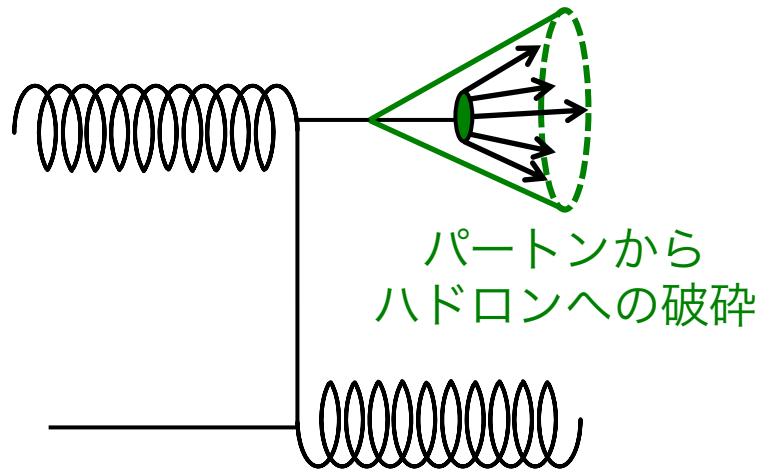
陽子: π 中間子 = $\sim 0.2 : 1$

各フレーバー対生成比率
 $uu : dd : ss : cc = 1 : 1 : 0.3 : 10^{-11}$

HQはほとんど破砕では作られない

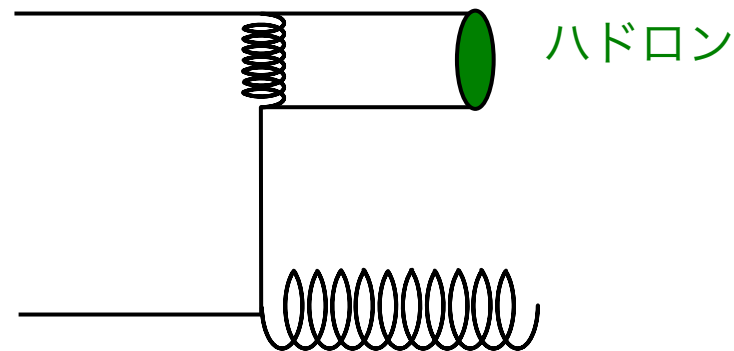
高横運動量粒子の生成機構（1）

ジェット機構



$$E \frac{d^3 \sigma}{dp^3} \sim \frac{1}{p_T^4} F \left(\frac{p_T}{\sqrt{s}} \right)$$

直接生成機構

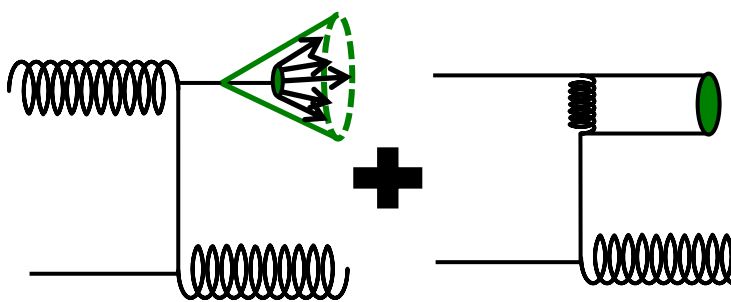


$$E \frac{d^3 \sigma}{dp^3} \sim \frac{1}{p_T^6} F \left(\frac{p_T}{\sqrt{s}} \right)$$

生成機構の相違は横運動量分布の傾きの差として現れる

高横運動量粒子の生成機構 (2)

- 測定される高横運動量ハドロン分布



The diagram illustrates a particle detector setup. It consists of two detector components connected to a common circuit. The left component is a detector with a green cone-shaped field of view, and the right component is a detector with a green cylindrical field of view. Both detectors are connected to a circuit containing a coil and a capacitor. A blue arrow points from the diagram to the equation below.


$$E \frac{d^3 \sigma}{dp^3} = \frac{1}{p_T^n} F \left(\frac{p_T}{\sqrt{s}} \right)$$
$$\sqrt{s}^n E \frac{d^3 \sigma}{dp^3} = G(x_T), \quad x_T = \frac{2p_T}{\sqrt{s}}$$

パラメータ $x_T = 2p_T/\sqrt{s}$ のみの関数

高い横運動量粒子の生成機構 (3)

- 異なる衝突エネルギーとの比較

$$\sqrt{s_1}^n E \frac{d^3\sigma}{dp^3} = G(x_T) = \sqrt{s_2}^n E \frac{d^3\sigma}{dp^3}$$

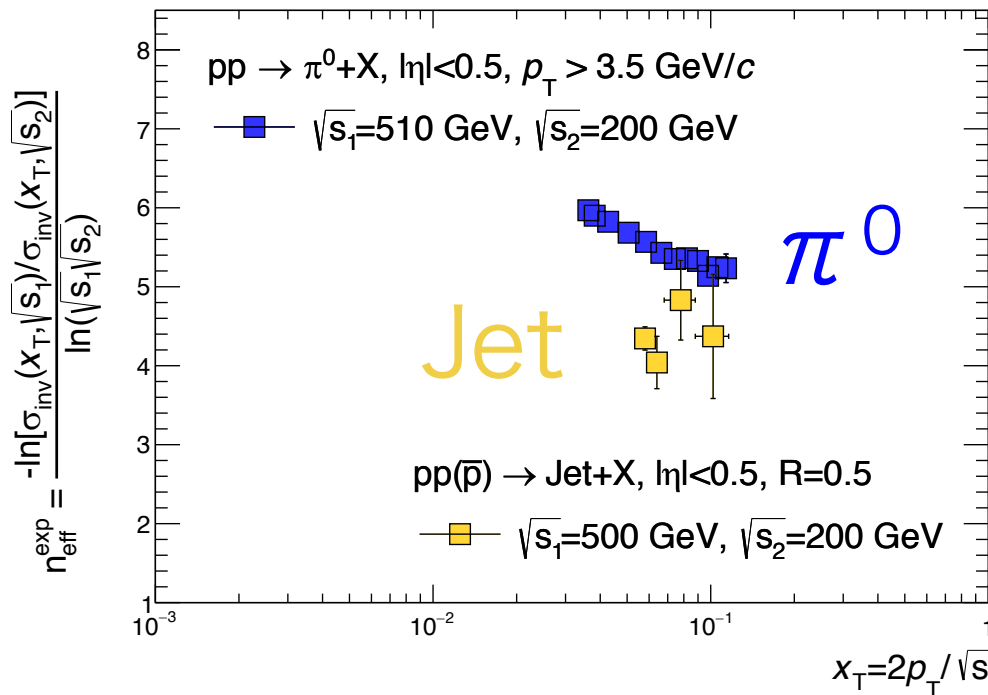

$$n = - \frac{\ln \left[\sigma_{inv} \left(x_T, \sqrt{s_1} \right) / \sigma_{inv} \left(x_T, \sqrt{s_2} \right) \right]}{\ln \left(\sqrt{s_1} / \sqrt{s_2} \right)}$$

- QCD計算で期待されるnの値
 - ジェット ~ 4
 - 中性 π 中間子: ジェット機構 ~ 4
: 直接生成機構 ~ 6

直接ハドロン生成の議論

RHICエネルギー

- 横運動量分布の衝突エネルギー依存性から得られる係数 n
 - ジェット起源ならば $n \sim 4$
 - 直接ハドロン生成ならば $n \sim 6$

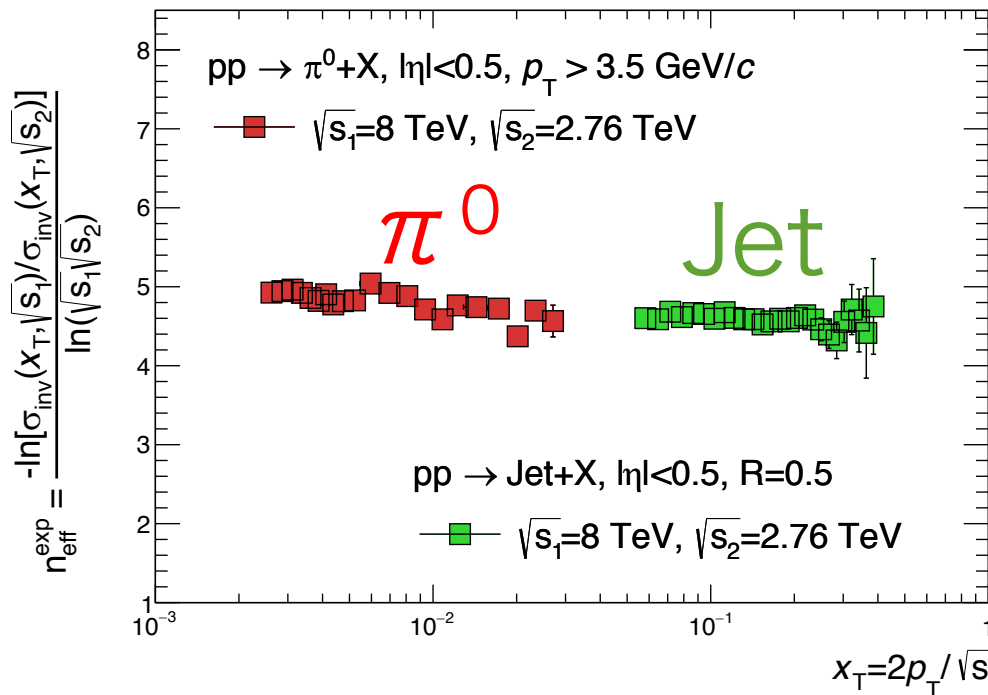


- $n_{\pi \text{ 中間子}} > n_{\text{ジェット}}$
 - $\pi^0 : 5.76 \pm 0.03$
 - Jet: 4.33 ± 0.13
- 高横運動量ハドロンは、直接生成機構とジェット機構の双方により生成していることを示唆

直接ハドロン生成の議論

LHCエネルギー

- 横運動量分布の衝突エネルギー依存性から得られる係数 n
 - ジェット起源ならば $n \sim 4$
 - 直接ハドロン生成ならば $n \sim 6$

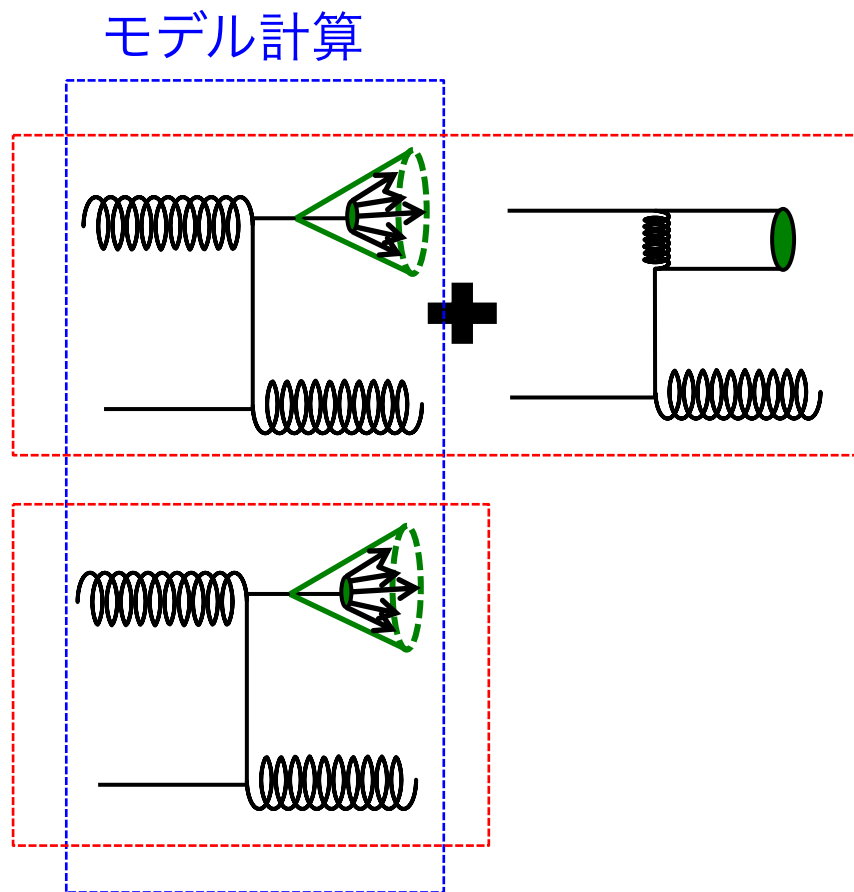


- $n_{\pi^0 \text{ 中間子}} \sim n_{\text{ジェット}}$
 - $\pi^0: 4.90 \pm 0.01$
 - Jet: 4.60 ± 0.02
- 高横運動量ハドロン生成機構がほとんどジェット機構であることを示唆

ハドロン生成機構に対する知見

- RHIC加速器エネルギー
 - ジェット機構
 - 直接生成機構
- LHC加速器エネルギー
 - ~~ジェット機構~~
 - 直接生成機構

実際の生成機構



陽子+陽子衝突における粒子生成機構の変化を確認