@RIKEN August 19, 2019

Department of Physics, Osaka University

Masayuki Asakawa

*Freezeouts*

チュートリアル研究会

*Contents*

1. 基礎

2. 続基礎

3. 発展

基礎1

オーガナイザーからのお題

基礎2:

*thermal*

*freezeout*

*freezeout*

実験事実: *p*T分布 exp的

実は *M* T= *M* 2 + *p* 

2 でプロットするともっとよくなる 必要なら BE、FD分布を使う

傾きが違うように見えるのは差し当たりおいておく

基礎3:

*freezeout*

*chemical*

*chemical*

各ハドロンがある単一の温度・化学ポテンシャルをもっているとして ハドロンの収量比を計算すると、実験値を非常によく説明する

基礎4

より広い衝突エネルギーの範囲では

thermal freezeout T < chemical freezeout T

Experimental Values

基礎5

1. これらの温度はなぜ0でないか?

2. そもそもなぜ冷えるのか

相対論的原子核衝突で生成された系は孤立系

基礎6

断熱材

準静的膨張 ピストンにする仕事に 気体より冷える

一様性は分子間の 衝突により保たれる

断熱材

真空 気体

仕事もせず、終状態で衝突も なければ、シリンダー内の 運動量分布が観測される

N.B. 急速にピストンを動かして気体に仕事をさせずに膨張(不可逆過程)させた後長時間おき、 非平衡状態を平衡化すると冷える(エネルギー密度が小さくなるので温度が低くなる)が、 このような過程は(通常)QGP相以降では考えない

基礎7:流れが生成される場合

*V*

質点系の運動エネルギー= ここの体積要素

重心の運動エネルギー(流れ) +内部エネルギー(相対運動)

(力学1:大学1年生)

熱エネルギーが集団運動(流れ) のエネルギーに転化した

基礎8

➢ 化学平衡へ向かう反応(非弾性):ある程度高いエネルギーが必要

➢ 熱平衡へ向かう反応(弾性):高いエネルギーである必要はない

thermal freezeout T < chemical freezeout T

基礎9

*R*

もう少し定量的には、 温度を決める条件は

*R O*  (平均自由行程)

しかし実際には、 0, 0,... . *R T etc* ≠ ≠   でもあり、クリアーカットにある温度 が決まる訳ではない

特に、相対論的原子核衝突では あることがきっかけとなって、 これらの温度が決まるわけではない

かなりアバウト

宇宙の晴れ上がり

基礎10

http://astro-dic.jp/clear-up-of-the-universe/

続基礎1

1 *dN M* T *dM* exp ⎛ *M T* ∝ T

│ ⎝ -T

⎞ │ ⎠ *T* π < *T K* < *T p* もう少し定量的には

*T i* , apparent  *T* f + 12 *M i v* r 2

続基礎2

➢ 固有系でのカノニカル分布(BE,FDでも同様)

*P* = exp ⎛ │ ⎝ -*T*

*E* ⎞ │ ⎠

➢ 確率なのでLorentz推進のもとで不変

固有系での

exp ⎛ │ ⎝ -*T*

*E*⎞ │ ⎠

exp ⎛ │ ⎝ -*p T*∙ *u*⎞ │ ⎠

, *p* μ = ( *E* , *p* 

T , *p* L ), *u* μ = (1,0,0,0) と考える

*u*μ = (1,0,0,0) は、相対論的4次元フローベクトル

続基礎3

この、 exp ⎛ │ ⎝ -*p T*∙ *u*⎞ │ ⎠ の形(あるいは、BE、FD版) と流れを仮定して、

*E d d* 3 3

*N p* = *M* T 3 T Bjorken scaling solution + 動径方向の流れ を仮定して積分を行うと (+いろいろな近似、特殊関数の漸近形などを使う)

*T i* , apparent 

*T* f + 12 *M i v* r 2

実は、πに対しては近似はあまりよくない *d dM N dyd*φ = ∫ Σ f

*f* ( *x* , *p* ) *p* ∙ *d* Σ Σ fはフリーズアウト超曲面

M.A., 東大集中講義(2002) Hatsuda, Miake, Yagi, 「Quark-Gluon Plasma」 Chap. 13.5

発展1

thermal freezeout、chemical freezeout とも、ダイナミクスの結果 生じるものであり、すべての粒子が同じ温度、化学ポテンシャルを もつという保証はない

➢ chemical freezeout の明らかな例外

質量が小さく、幅が広い(相互作用の強い)共鳴

例えば、

ρ ( Γ = 150 MeV ) 、 *K* \* ( Γ = 50 MeV )、 ∆ ( Γ = 120 MeV) 寿命が短く、生成も容易なので、観測されるこれらの共鳴は 主にハドロン相起源

発展2

hadronization

chem. f.o.

kinetic f.o. a few fm

kinetic f.o. a few fm

mesons

time

time

time

baryons “Net proton number is not a proxy

of net baryon number”

Kitazawa and M.A., 2012

発展3

chemical freezeout について私が全く理解できないこと

発展4

http://astro-dic.jp/clear-up-of-the-universe/

発展5

d(結合エネルギー = 2.22 MeV)、3He(結合エネルギー = 2.57 MeV)

T~150 MeVの状態で存在できるはずがない。しかもこれらはloosely bound。

発展6

基礎9で以下のように書きました

もう少し定量的には、 温度を決める要素は

*R*

*R*  *O* (平均自由行程)

しかし実際には、 *R*  ≠ 0, *T*  ≠ 0,... *etc* . でもあり、クリアーカットにある温度 が決まる訳ではない

*R*  → 0 は準静的過程に対応し、 *R*  → 1 は自由膨張(以上)に対応

発展7

やっとこのfigureが理解できる

発展8

➢ chemical freezeout が想定される相転移線に近い

(あるいは同じではないか)という議論がある

相転移(特にcrossover)での量子力学的ハドロン化はよくわかっていないが...

*s/T*3

*T* crossover だが、*s*は狭い 温度領域で急激な立ち上がり

*T*

*sV* =

*const* . *t*

温度ほぼ一定の期間が実現する

まと

め✓ Freezeouts はトリビアルな現象ではない

✓ Freezeouts は top down に起きるのではなく、bottom up に

原子核衝突でのダイナミクスの結果生じる

✓ その結果、clear cut な現象ではなく、about (fuzzy) なもの

✓ すべての粒子種が同時に freezeout する保証はなく、

実際そうなっていない

✓ [補足] Conserved charge fluctuation で問題となるのは

thermal freezeout の方であって、chemical ではない