

Freezeouts

Masayuki Asakawa

Department of Physics, Osaka University

Contents

1. 基礎

2. 続基礎

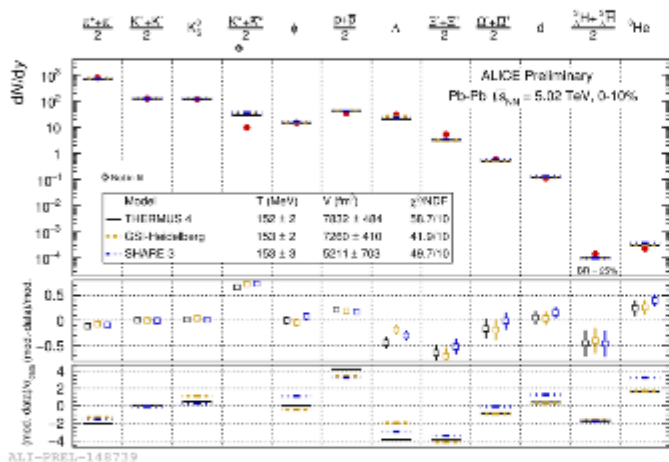
3. 発展

基礎1

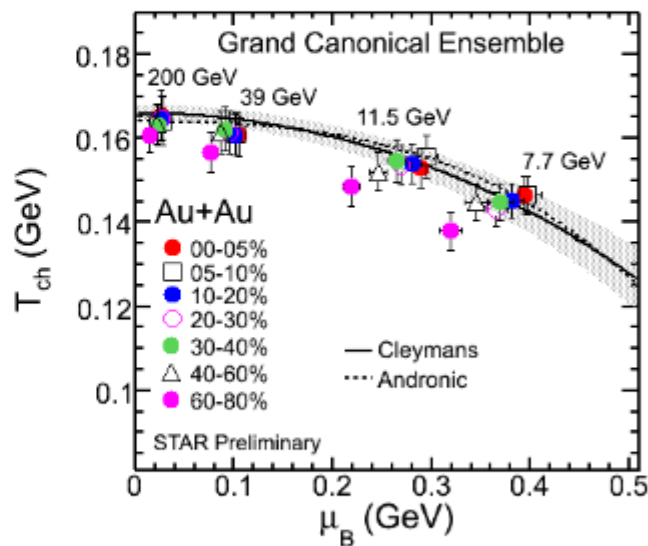
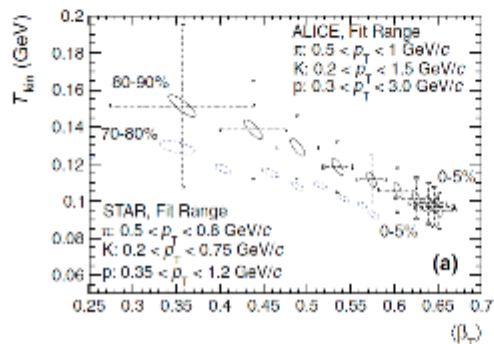
オーガナイザーからのお題

フリーズアウト

- 運動学的凍結(blast wave)と化学凍結



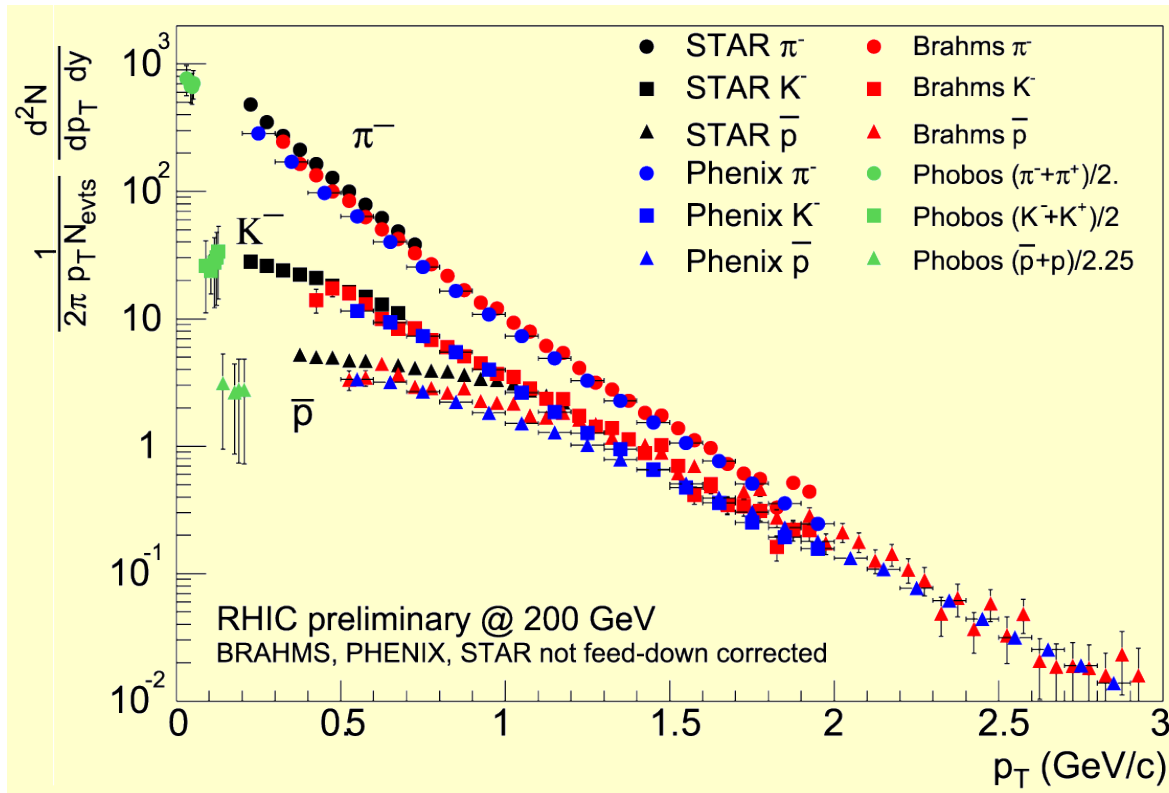
ALI-PRE1-148739



基礎2: thermal freezeout

実験事実: p_T 分布 exp的

必要なら BE、FD分布を使う



実は $M_T = \sqrt{M^2 + \vec{p}^2}$ でプロットするともっとよくなる

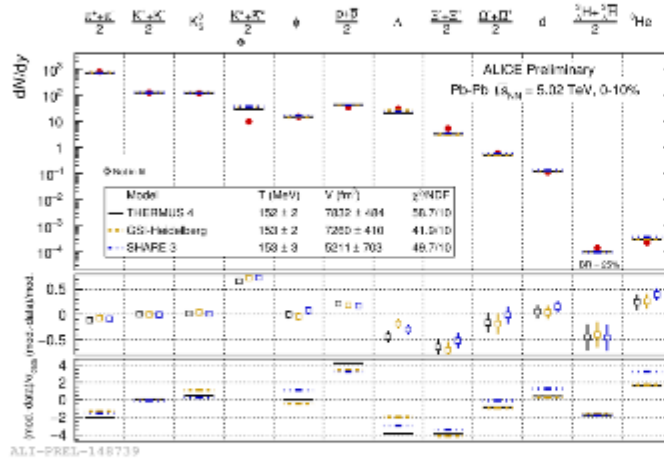
傾きが違うように見えるのは差し当たりおいておく

基礎3: chemical freezeout

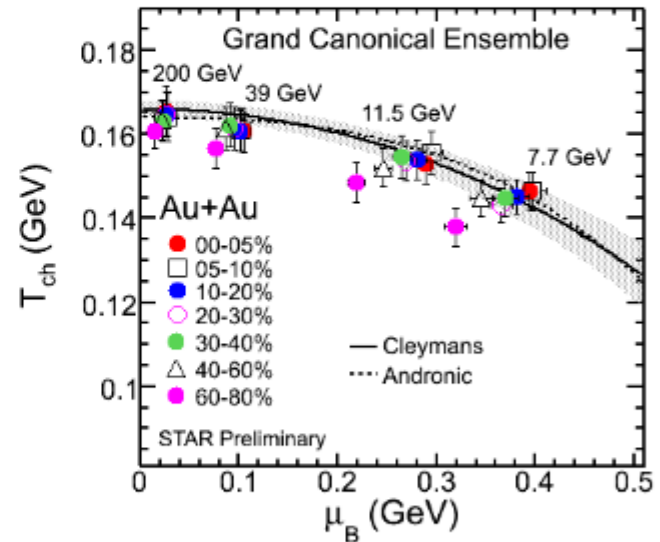
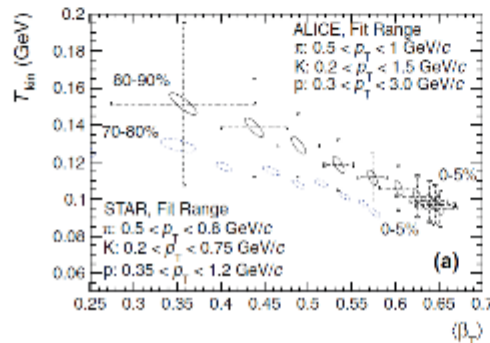
各ハドロンがある単一の温度・化学ポテンシャルをもっているとして
ハドロンの収量比を計算すると、実験値を非常によく説明する

フリーズアウト

- 運動学的凍結(blast wave)と化学凍結

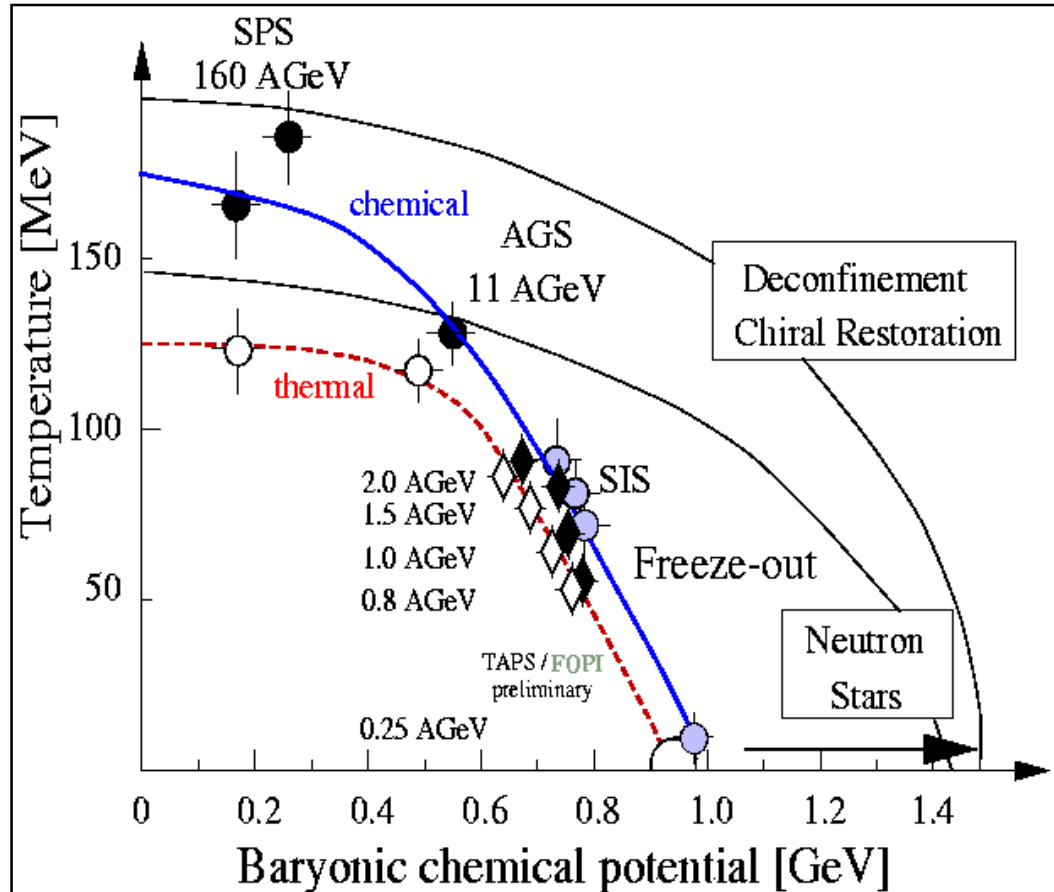


ALI-PREL-148739



基礎4

より広い衝突エネルギーの範囲では



Experimental Values

thermal freezeout $T <$ chemical freezeout T

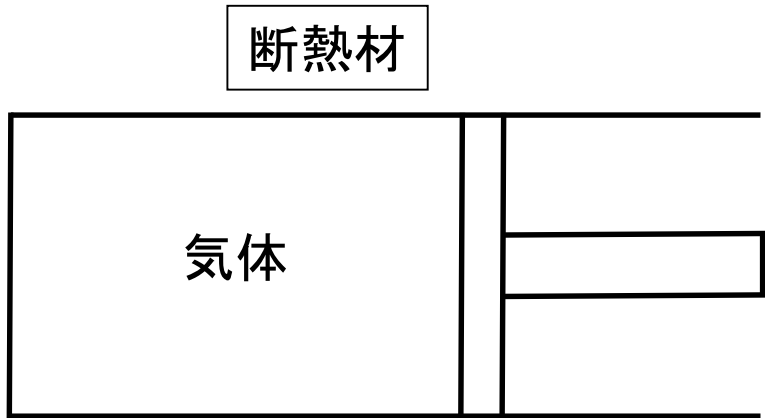
基礎5

1. これらの温度はなぜ0でないか？

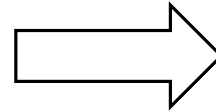
2. そもそもなぜ冷えるのか

相対論的原子核衝突で生成された系は孤立系

基礎6

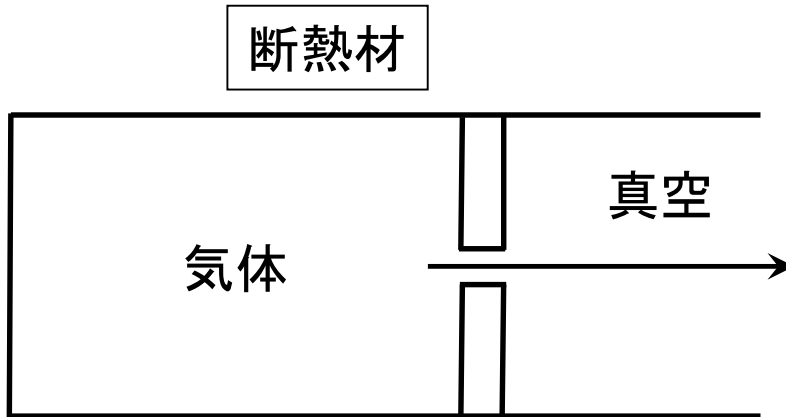


準静的膨張



ピストンにする仕事により冷える

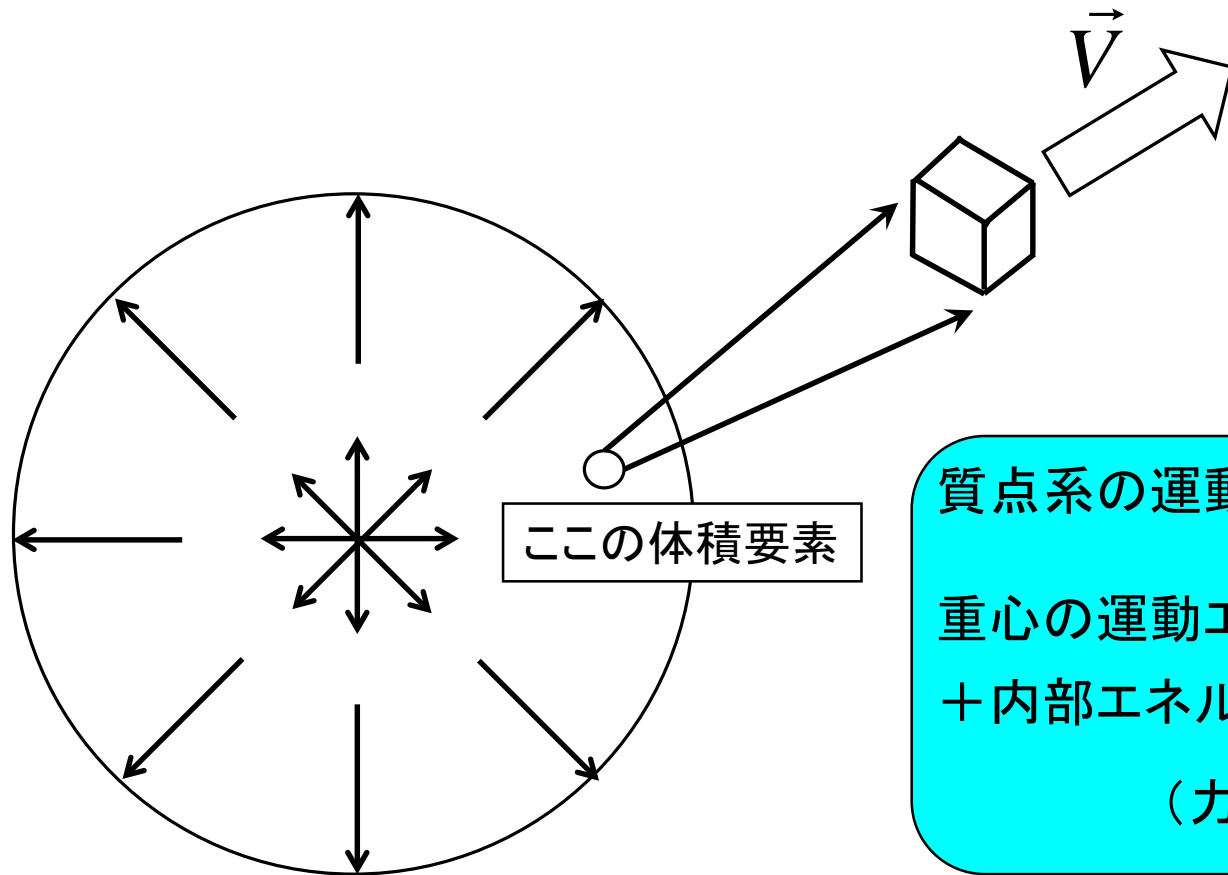
一様性は分子間の衝突により保たれる



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

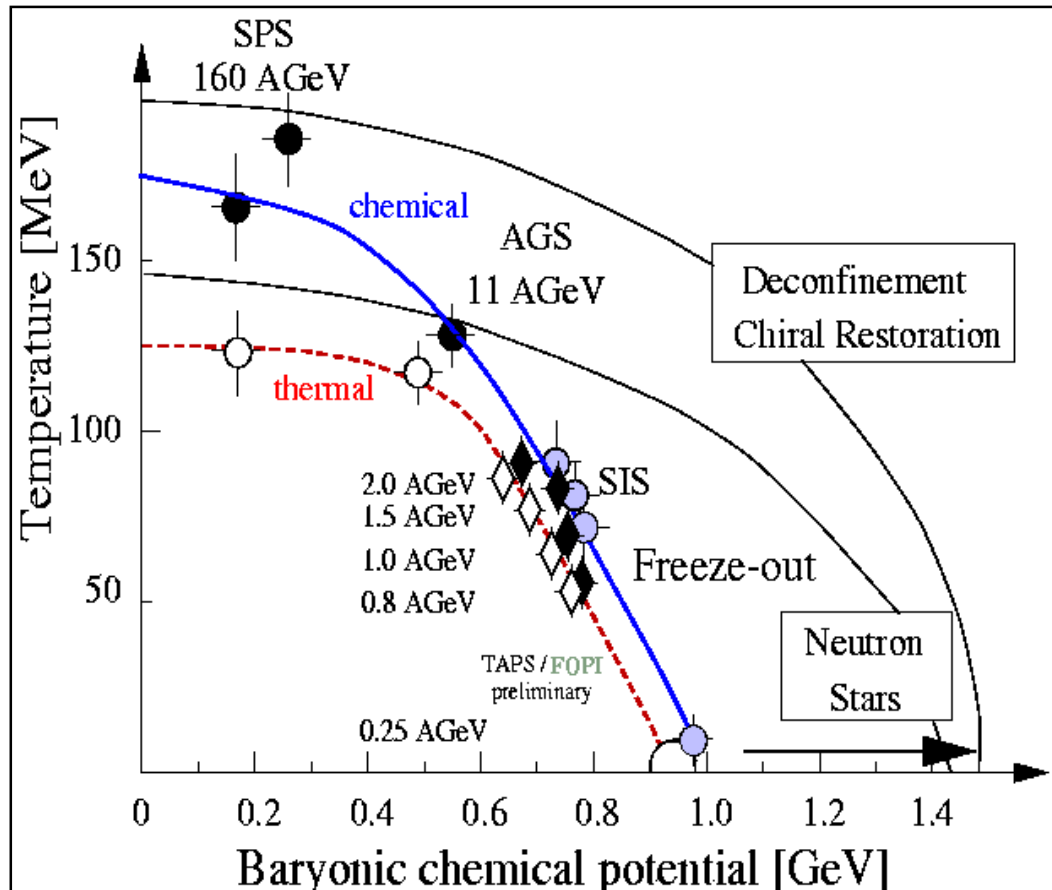


質点系の運動エネルギー＝
重心の運動エネルギー（流れ）
＋内部エネルギー（相対運動）
（力学1: 大学1年生）

熱エネルギーが集団運動（流れ）
のエネルギーに転化した

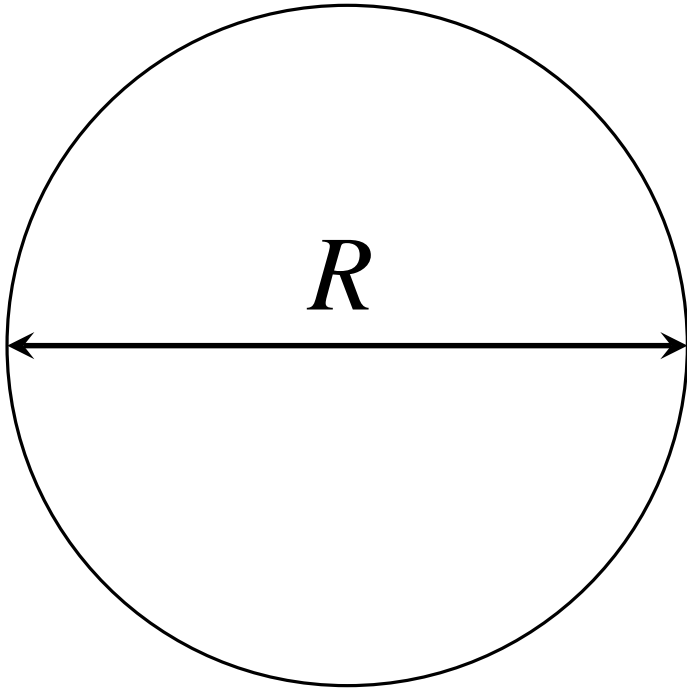
基礎8

- 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



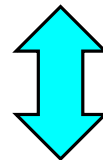
もう少し定量的には、
温度を決める条件は

$$R \sim O(\text{平均自由行程})$$

しかし実際には、 $\dot{R} \neq 0, \dot{T} \neq 0, \dots etc.$
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

MENU

学習レベルで探す ▼

小学生

中学生

高校生

五十音で探す ▼

カテゴリーで探す ▼

画像を見る ▼

動画を見る ▼

天文学辞典 > 理論 > 宇宙論 > 宇宙の晴れ上がり

宇宙の晴れ上がり

学習レベル

高

理論

宇宙論

よみ方 うちゅうの

英語 clear up of

説明

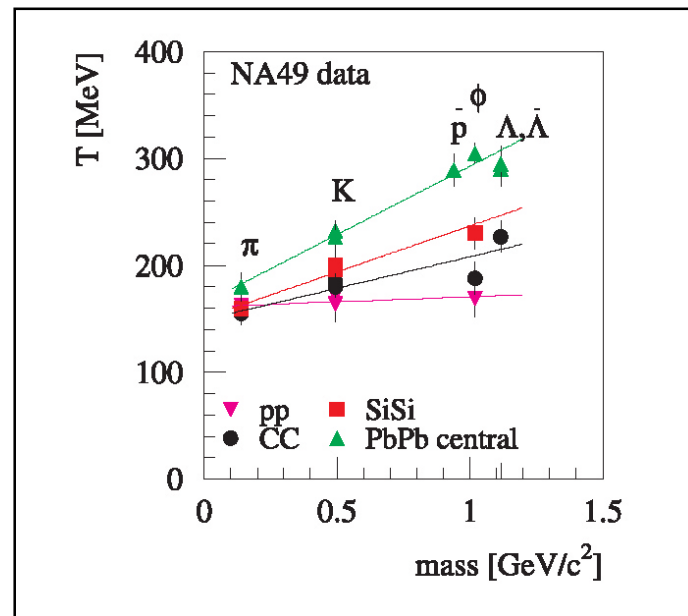
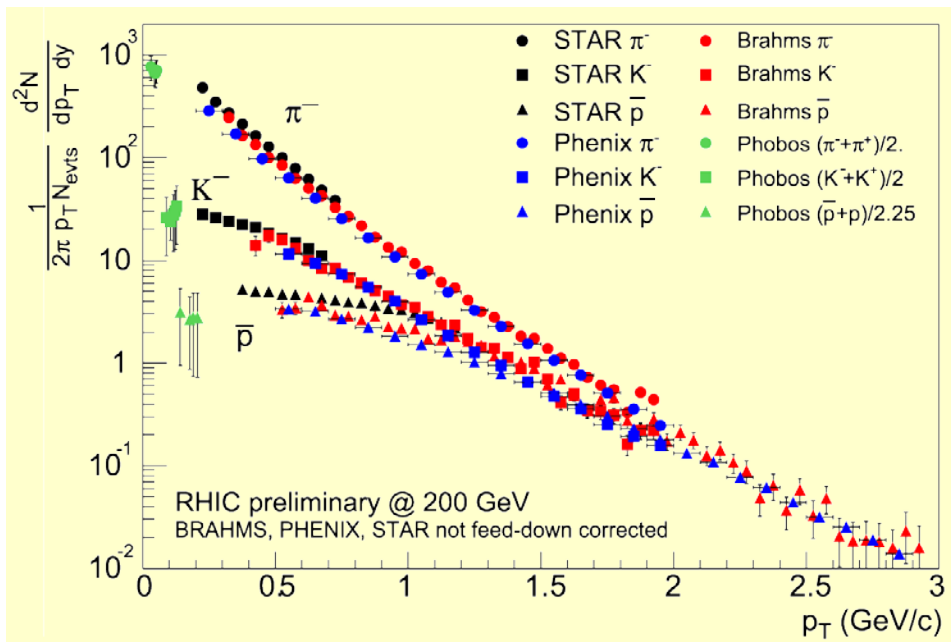
宇宙の晴れ上がりとは、宇宙創成の約37万年後、[赤方偏移](#)にして $z=1090$ の頃に、たとえて言えば、「濃い霧がかかったようになにも見えなかった状態から霧が晴れてくっきり景色が見える状態」へと宇宙の状態が変化したことを指す用語である。この用語は佐藤文隆氏の提案によるもので、ここでは clear up of the universe をあてているが英語の定訳はない。

[ビッグバン](#)直後の宇宙は超高温・高密度であったが、宇宙膨張とともに温度と密度が下がり約37万年後には温度は数1000度（[絶対温度](#)）になっていた。その当時の宇宙に存在した原子はほとんどが水素とヘリウムであったが、それらはすべて[電離](#)して水素原子核（陽子）とヘリウム原子核と原子核に束縛されていない[自由電子](#)とからなる[プラズマ](#)状態にあった。このため光子は自由電子によって[トムソン散乱](#)を受け、まっすぐ進むことができなかった。これはちょうど霧や雲の中で光が散乱され直進できないことになぞらえられる。宇宙の温度が下がって5000度程度になるとまずヘリウム原子核が2個の電子を捕獲しヘリウム原子となり、その後4000度程度になると水素原子核が電子を捕獲し始める。これを電子の[再結合](#)という。再結合によって自由電子が減っていくことで光子は散乱される相手を失い物質の束縛から解放されていく。宇宙の温度が3000度程度になった時点で自由電子はほとんど原子核に束縛される。これを電子と光子の[脱結合](#)といい、脱結合後の光子は直進できるようになる。こうして宇宙の晴れ上がりが起きる。宇宙の晴れ上がりは宇宙の[再結合期](#)とも呼ばれる。なお、「再結合」という言葉は、一般には中性の原子が電離で電子を失ったあとで再び電子を捕獲するプロセスに対して用いられる言葉であるが、ここでは初めての電子捕獲に対して用いられている。

宇宙にある多数の光子が電子から最後に散乱を受けるのは宇宙の歴史から見ればごく短い時間の間に一斉に起きるので、我々から見ればある時刻（距離）に対応する薄い球面である。これを[最終散乱面](#)という。[宇宙マイクロ波背景放射](#)は最終散乱面から我々に届いた放射である。そのためそこには宇宙の晴れ上がり時点の宇宙の物理状態（およびそこから我々までの間で光子が通過した宇宙空間）の情報が刻み込まれている。

脱結合後でも、[電離度](#)にすると1万分の1程度のわずかな自由電子が残っている。残った自由電子は[始原ガス](#)雲の[重力収縮](#)の際に冷却を担う水素分子をつくる触媒となり、[始原星](#)（[初代星](#)）の生成に役立つことになる。

続基礎1



$$\frac{1}{M_T} \frac{dN}{dM_T} \propto \exp\left(-\frac{M_T}{T}\right) \quad T_\pi < T_K < T_p$$

もう少し定量的には $T_{i,\text{apparent}} \sim T_f + \frac{1}{2} M_i \langle v_r^2 \rangle$

続基礎2

- 固有系でのカノニカル分布 (BE, FDでも同様)

$$P = \exp\left(-\frac{E}{T}\right)$$

- 確率なので Lorentz 推進のもとで不変

固有系での $\exp\left(-\frac{E}{T}\right)$

$$\exp\left(-\frac{p \cdot u}{T}\right), \quad p^\mu = (E, \vec{p}_T, p_L), \quad u^\mu = (1, 0, 0, 0) \quad \text{と考える}$$

$u^\mu = (1, 0, 0, 0)$ は、相対論的4次元フローベクトル

続基礎3

この、 $\exp\left(-\frac{p \cdot u}{T}\right)$ の形（あるいは、BE、FD版）と流れを仮定して、

$$E \frac{d^3 N}{d^3 p} = \frac{d^3 N}{M_T dM_T dy d\phi} = \int_{\Sigma_f} f(x, p) p \cdot d\Sigma \quad \Sigma_f \text{ はフリーズアウト超曲面}$$

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)

$$T_{i, \text{apparent}} \sim T_f + \frac{1}{2} M_i v_r^2$$

M.A., 東大集中講義(2002)

Hatsuda, Miake, Yagi, 「Quark-Gluon Plasma」 Chap. 13.5

実は、 π に対しては近似はあまりよくない

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

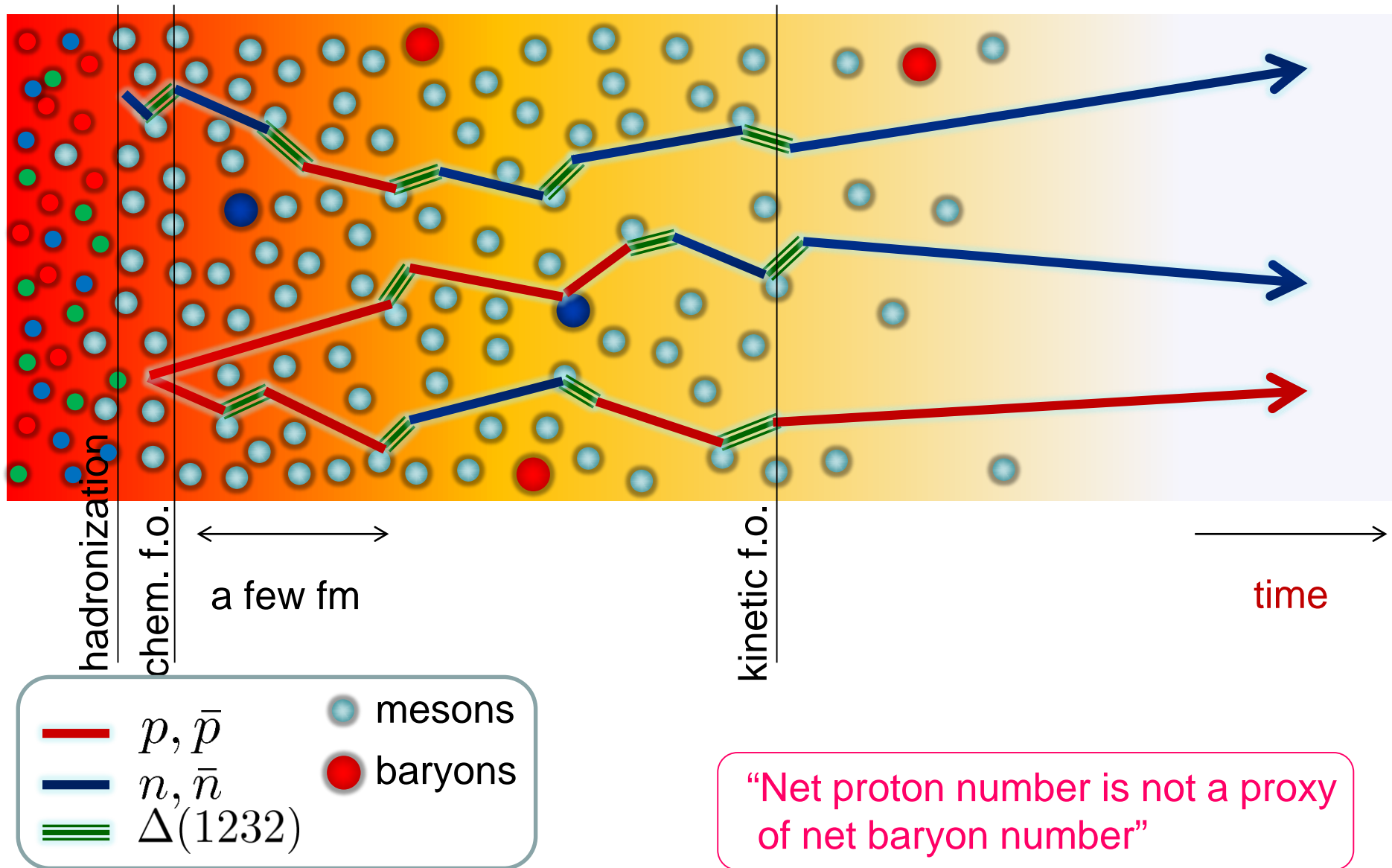
➤ chemical freezeout の明らかな例外

質量が小さく、幅が広い(相互作用の強い)共鳴

例えば、 ρ ($\Gamma = 150 \text{ MeV}$)、 K^* ($\Gamma = 50 \text{ MeV}$)、 Δ ($\Gamma = 120 \text{ MeV}$)

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

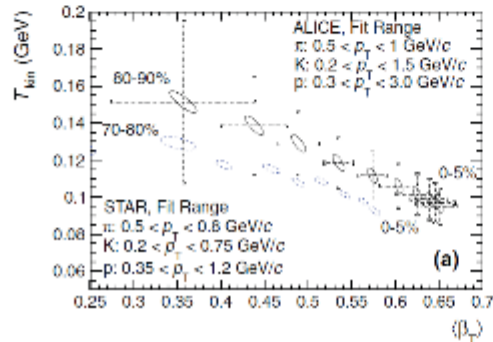
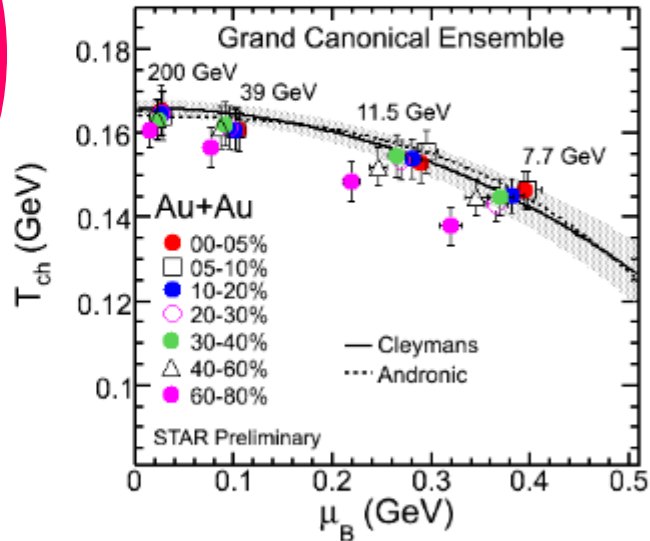
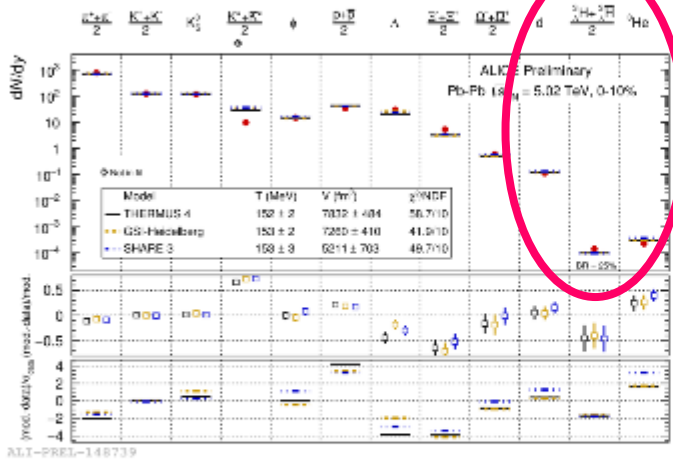


発展3

chemical freezeout について私が全く理解できないこと

フリーズアウト

- 運動学的凍結(blast wave)と化学凍結



MENU

学習レベルで探す ▼

小学生

中学生

高校生

五十音で探す ▼

カテゴリーで探す ▼

画像を見る ▼

動画を見る ▼

天文学辞典 > 理論 > 宇宙論 > 宇宙の晴れ上がり

宇宙の晴れ上がり

学習レベル

高

理論

宇宙論

よみ方 うちゅうのはれあがり

英語 clear up of the Universe

説明

宇宙の晴れ上がりとは、宇宙創成の約37万年後、[赤方偏移](#)にして $z=1090$ の頃に、たとえて言えば、「濃い霧がかかったようになにも見えなかった状態から霧が晴れてくっきり景色が見える状態」へと宇宙の状態が変化したことを指す用語である。この用語は佐藤文隆氏の提案によるもので、ここではclear up of the universe をあてているが英語の定訳はない。

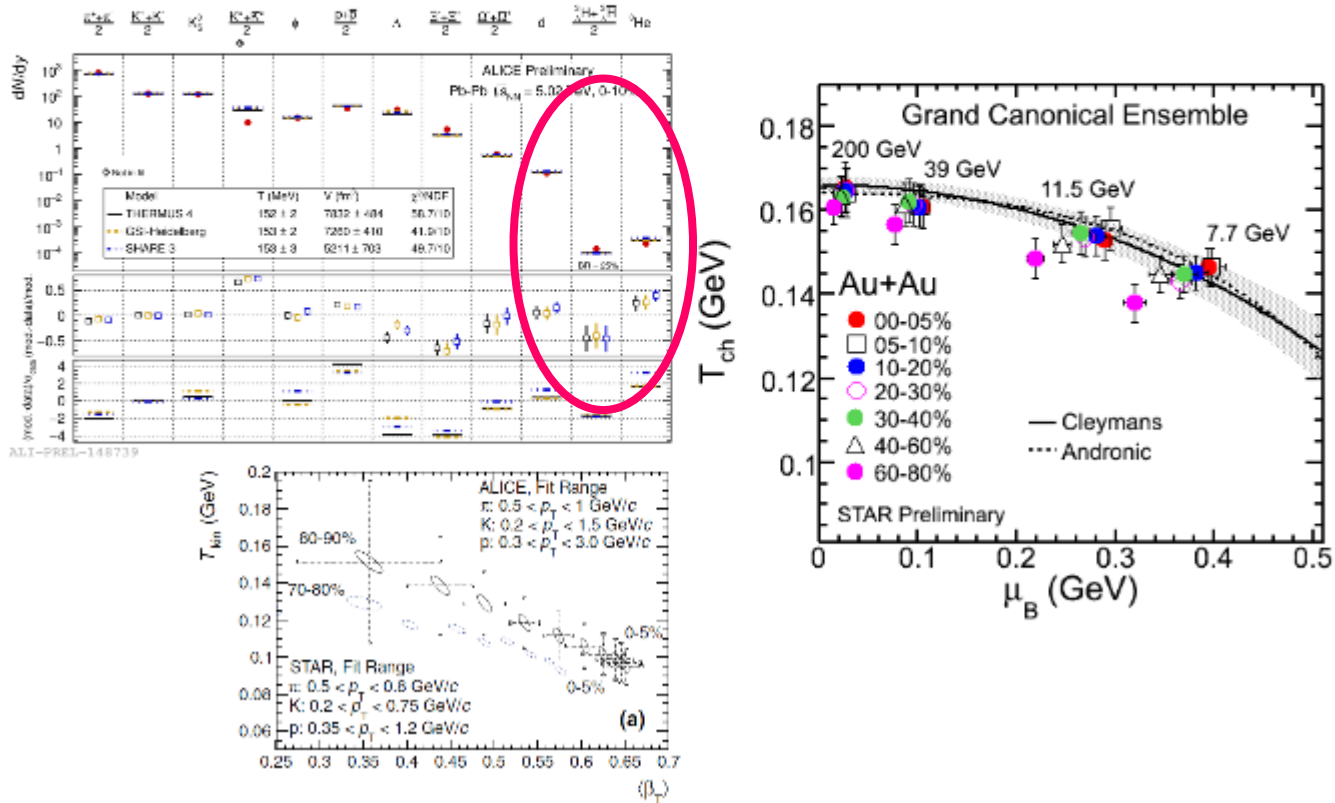
[ビッグバン](#)直後の宇宙は超高温・高密度であったが、宇宙膨張とともに温度と密度が下がり約37万年後には温度は数1000度（[絶対温度](#)）になっていた。その当時の宇宙に存在した原子はほとんどが水素とヘリウムであったが、それらはすべて[電離](#)して水素原子核（陽子）とヘリウム原子核と原子核に束縛されていない[自由電子](#)とからなる[プラズマ](#)状態にあった。このため光子は自由電子によって[トムソン散乱](#)を受け、まっすぐ進むことができなかった。これはちょうど霧や雲の中で光が散乱され直進できないことになぞらえられる。宇宙の温度が下がって5000度程度になるとまずヘリウム原子核が2個の電子を捕獲しヘリウム原子となり、その後4000度程度になると水素原子核が電子を捕獲し始める。これを電子の[再結合](#)という。再結合によって自由電子が減っていくことで光子は散乱される相手を失い物質の束縛から解放されていく。宇宙の温度が3000度程度になった時点で自由電子はほとんど原子核に束縛される。これを電子と光子の[脱結合](#)といい、脱結合後の光子は直進できるようになる。こうして宇宙の晴れ上がりが起きる。宇宙の晴れ上がりは宇宙の[再結合期](#)とも呼ばれる。なお、「再結合」という言葉は、一般には中性の原子が電離で電子を失ったあとで再び電子を捕獲するプロセスに対して用いられる言葉であるが、ここでは初めての電子捕獲に対して用いられている。

宇宙にある多数の光子が電子から最後に散乱を受けるのは宇宙の歴史から見ればごく短い時間の間に一斉に起きるので、我々から見ればある時刻（距離）に対応する薄い球面である。これを[最終散乱面](#)という。[宇宙マイクロ波背景放射](#)は最終散乱面から我々に届いた放射である。そのためそこには宇宙の晴れ上がり時点の宇宙の物理状態（およびそこから我々までの間で光子が通過した宇宙空間）の情報が刻み込まれている。

脱結合後も、[電離度](#)にすると1万分の1程度のわずかな自由電子が残っている。残った自由電子は[始原ガス](#)雲の[重力収縮](#)の際に冷却を担う水素分子をつくる触媒となり、[始原星](#)（[初代星](#)）の生成に役立つことになる。

フリーズアウト

- 運動学的凍結(blast wave)と化学凍結

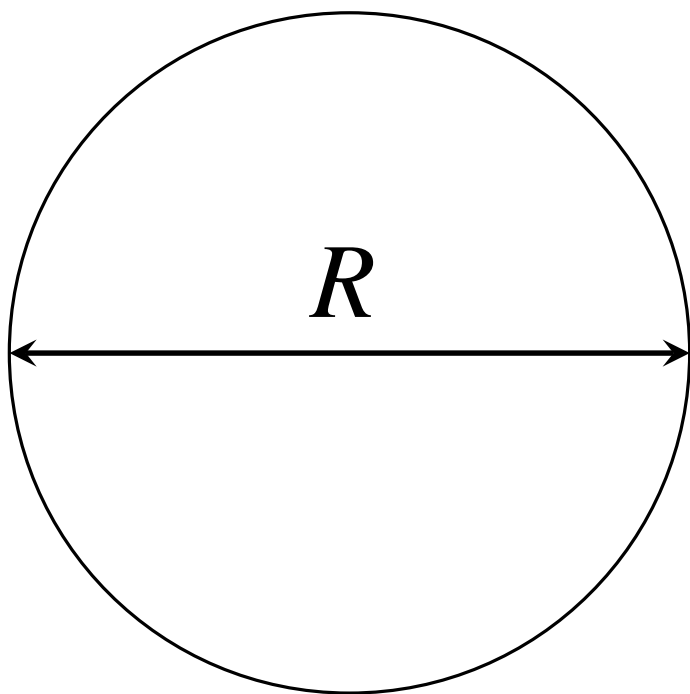


d(結合エネルギー = 2.22 MeV)、³He(結合エネルギー = 2.57 MeV)

T ~ 150 MeVの状態が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

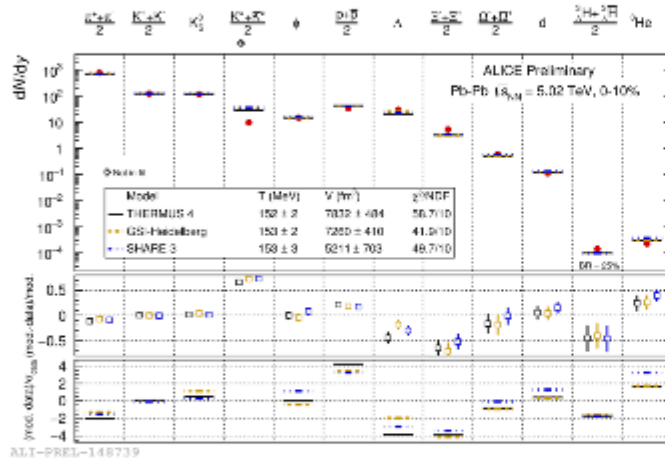
$$R \sim O(\text{平均自由行程})$$

しかし実際には、 $\dot{R} \neq 0, \dot{T} \neq 0, \dots etc.$
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

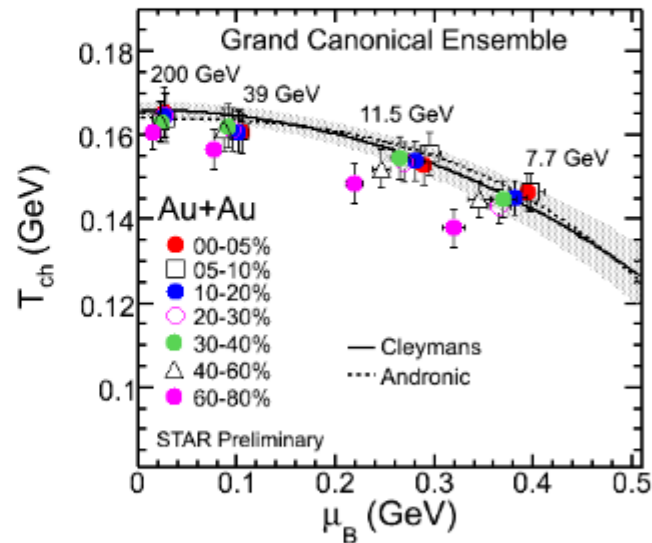
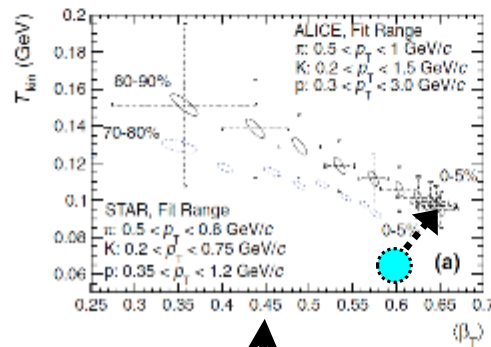
$\dot{R} \rightarrow 0$ は準静的過程に対応し、 $\dot{R} \rightarrow 1$ は自由膨張(以上)に対応

フリーズアウト

- 運動学的凍結(blast wave)と化学凍結



ALI-PRE1-148739

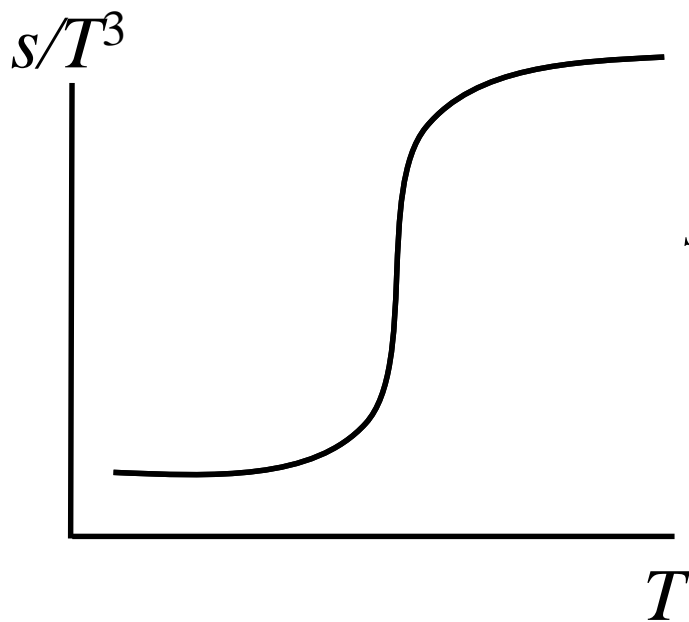


やっとこのfigureが理解できる

発展8

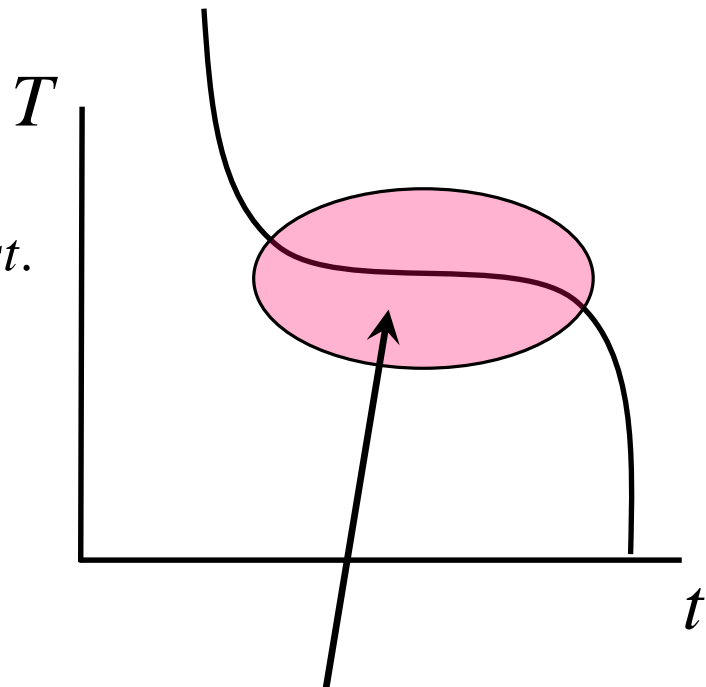
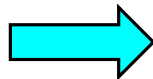
- chemical freezeout が想定される相転移線に近い (あるいは同じではないか) という議論がある

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...



crossover だが、 s は狭い
温度領域で急激な立ち上がり

$$sV = const.$$



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、実際そうになっていない
- ✓ [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