高エネルギー重イオン衝突：理解の現状と未解決問題

板倉数記
理論センター
2018年2月2日
J-PARC分室活動総括研究会

本講演の目標

約20年間の「重イオン衝突の物理」の流れを概観することによって

「J-PARCエネルギーでの重イオン衝突の物理」

の位置づけを与えたい

内容

- 「高エネルギー」重イオン衝突実験が目指してきたこと
- RHIC, LHCでの重要な実験結果と「標準的解釈」
- 「標準的解釈」を揺るがす予想外の実験結果
- その他の未解決問題
- 今後の課題とJ-PARCエネルギーでの重イオン衝突

「高エネルギー」重イオン衝突実験が目指してきたこと

- 2000 BNL-RHIC @ 200GeV AuAu

  衝突型の実験により、徹底的な研究の開始

  その後（2010～） LHCでもPbPb衝突@2.76TeV

- **主目的**

  クォーク・グルーオンプラズマの生成確認とその性質の探索

- **見るべきは**

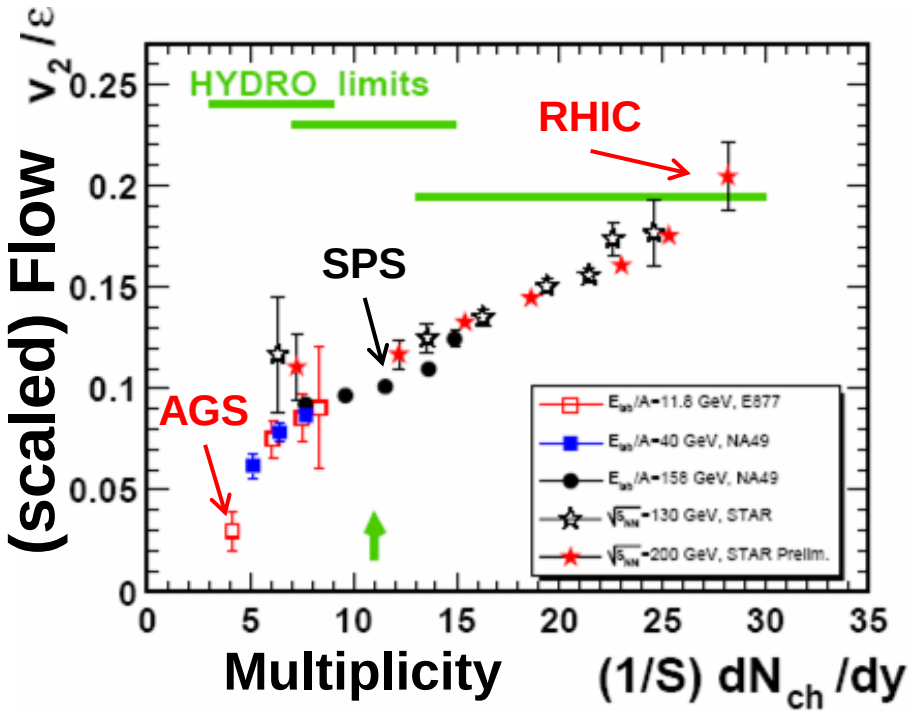
  生成の証拠となる物理量

  生成した物質の性質を反映する物理量

RHIC, LHCでの重要な実験結果

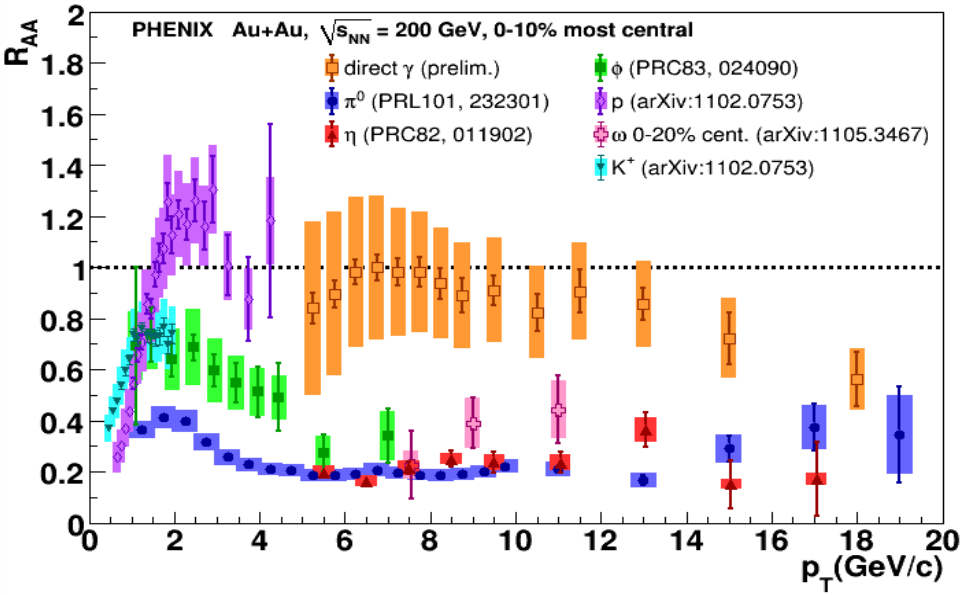
強い異方的流れの存在

elliptic flow



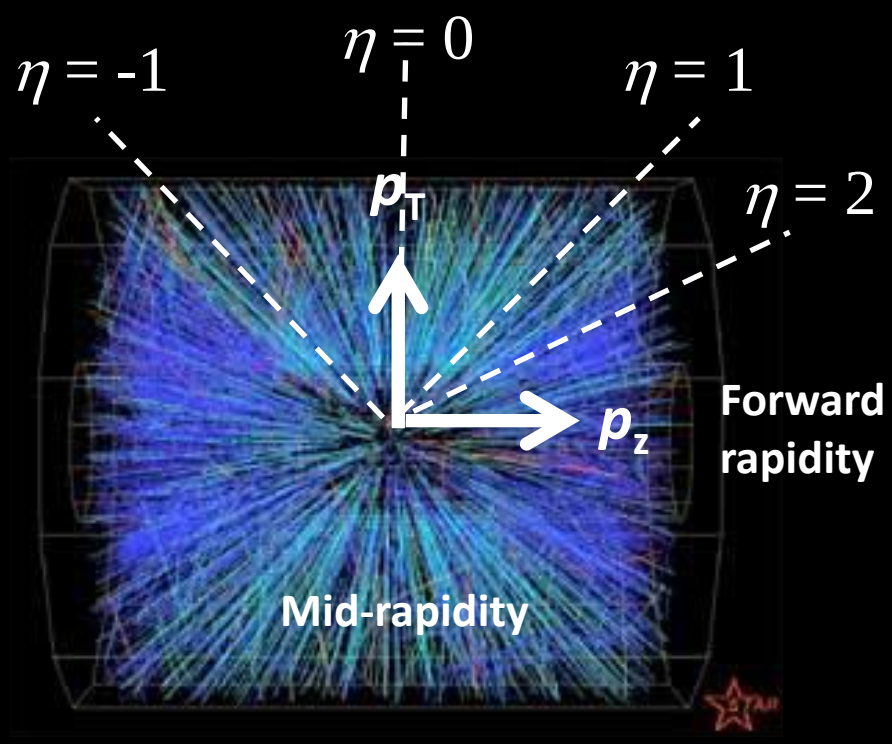
高運動量粒子の抑制

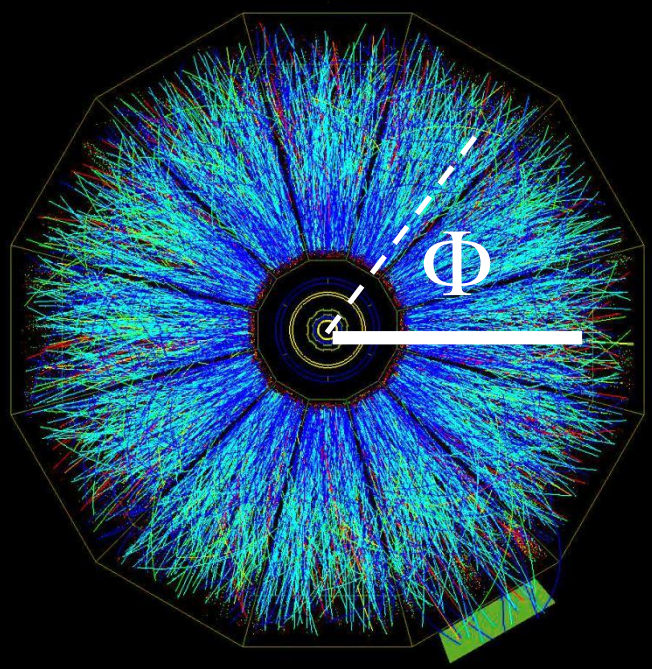
jet quenching, parton energy loss



さらに、**熱光子の観測、重いクォーコニウムの抑制**

Coordinates of the event





Pseudo-rapidity

$$\eta = \frac{1}{2}\ln\frac{|p|+p_z}{|p|-p_z} = -\ln\left(\tan\frac{\theta}{2}\right)$$

p_T transverse momentum

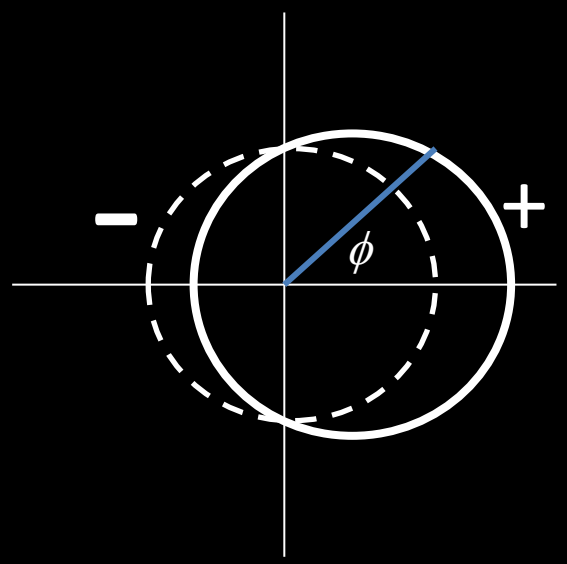
Φ azimuthal angle

Flow

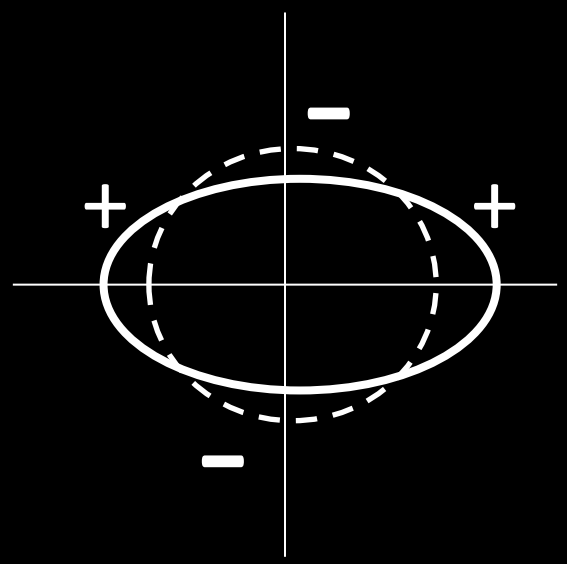
Azimuthal angle (phi) dependence (v_0=1/2)

$$\frac{dN_h}{dyd^2p_T d\phi} = \frac{dN_h}{dyd^2p_T}\frac{1}{2\pi}\sum_{n=0} 2v_n(y, p_T)\cos n\phi$$

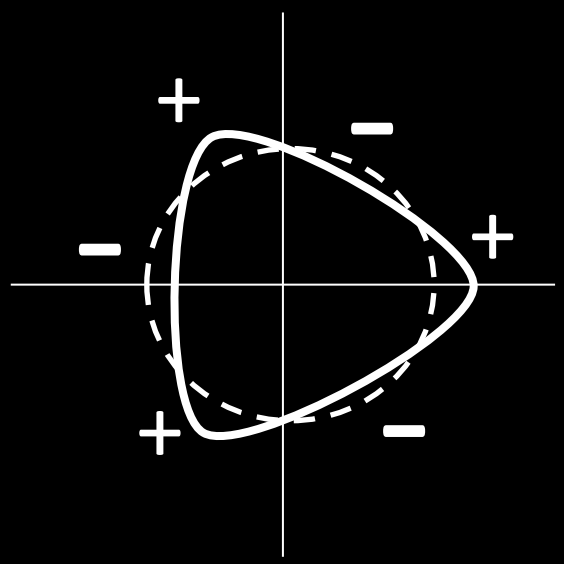
n=1 directed flow



n=2 elliptic flow

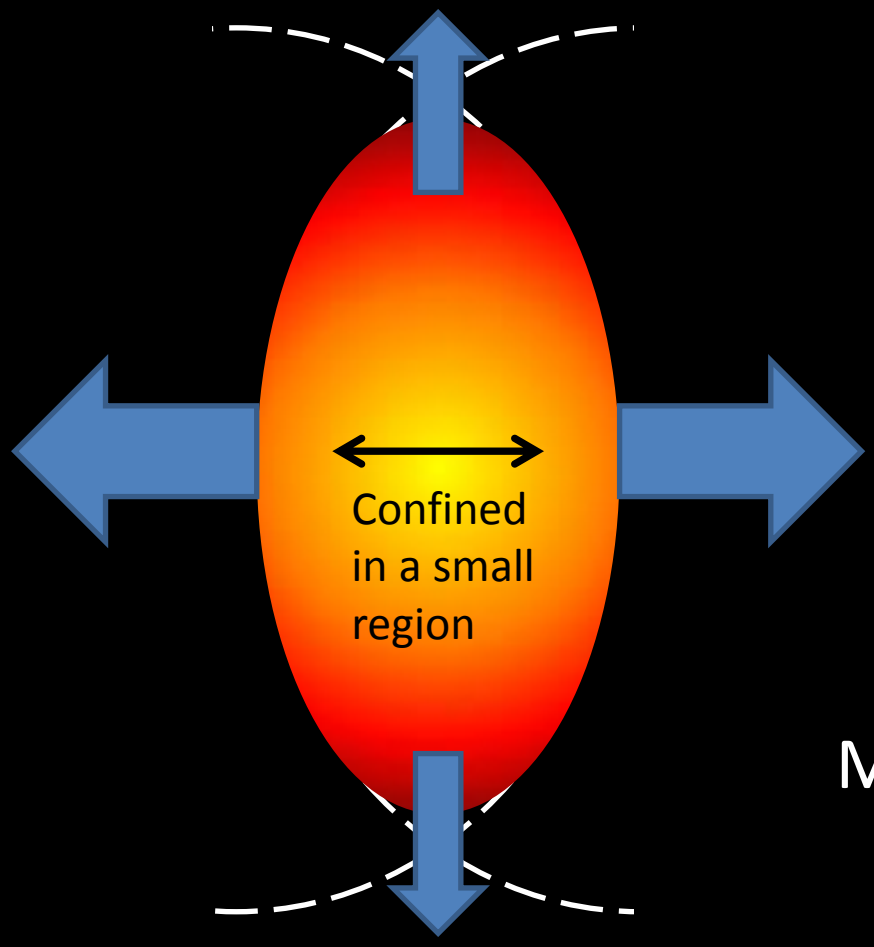


n=3 triangular flow

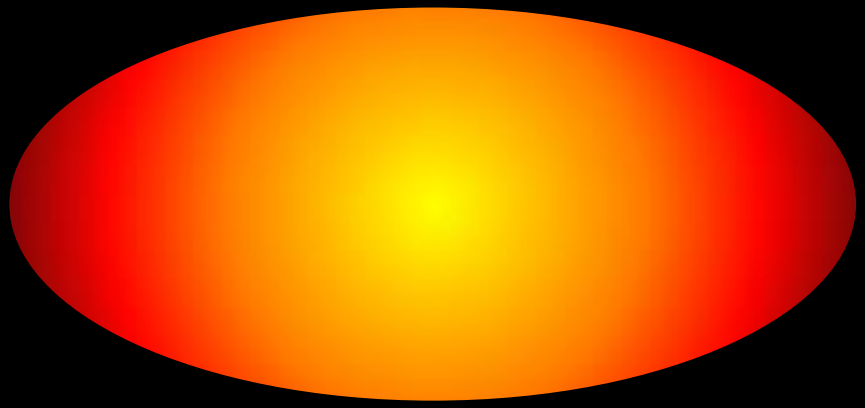


Flow as a signature of QGP

Coordinate anisotropy
(eccentricity)

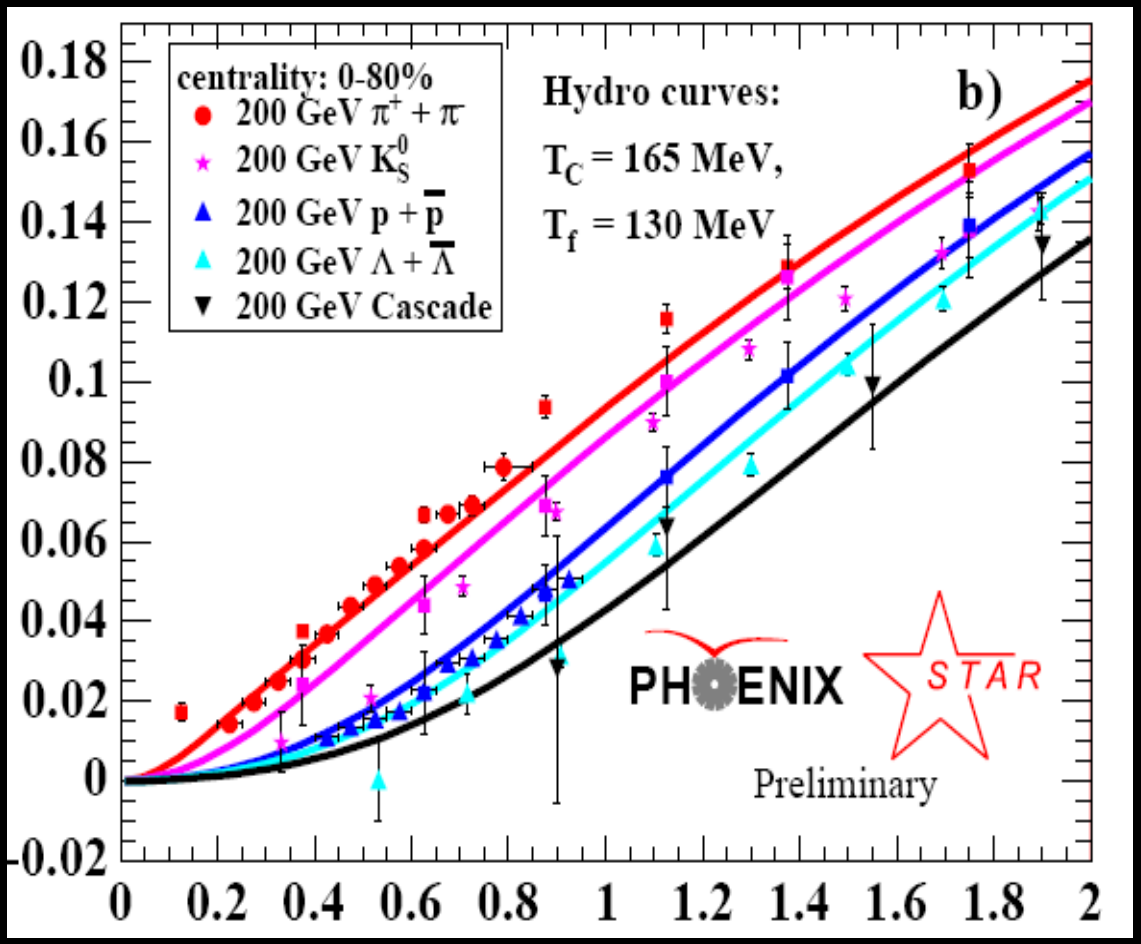


Momentum anisotropy



Most effectively converted when the matter is a perfect fluid

Hydrodynamics explains flow data for the first time at RHIC energy



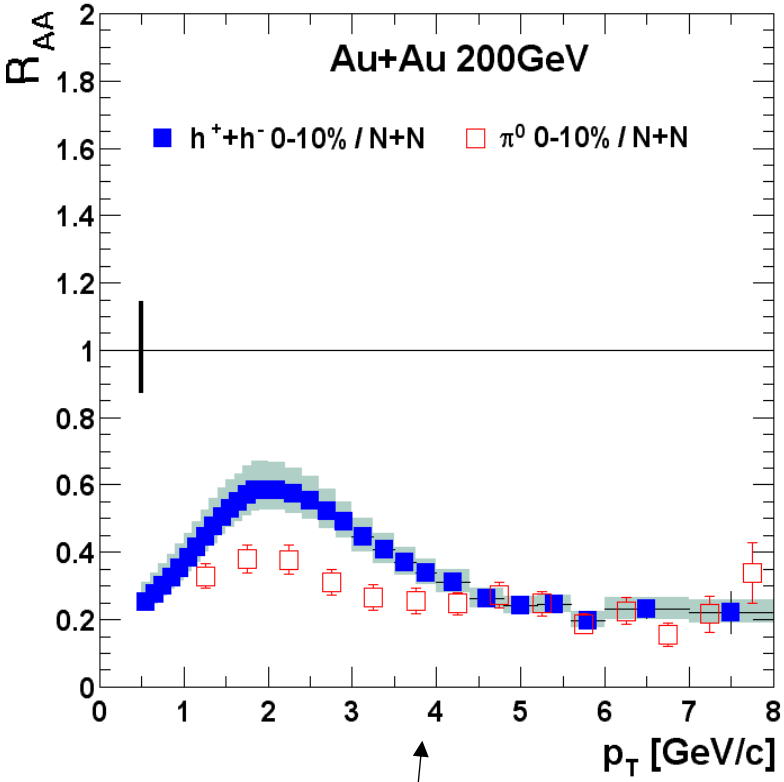
Relativistic hydrodynamics w/o viscosity (ideal fluid) can describe the elliptic flow data.

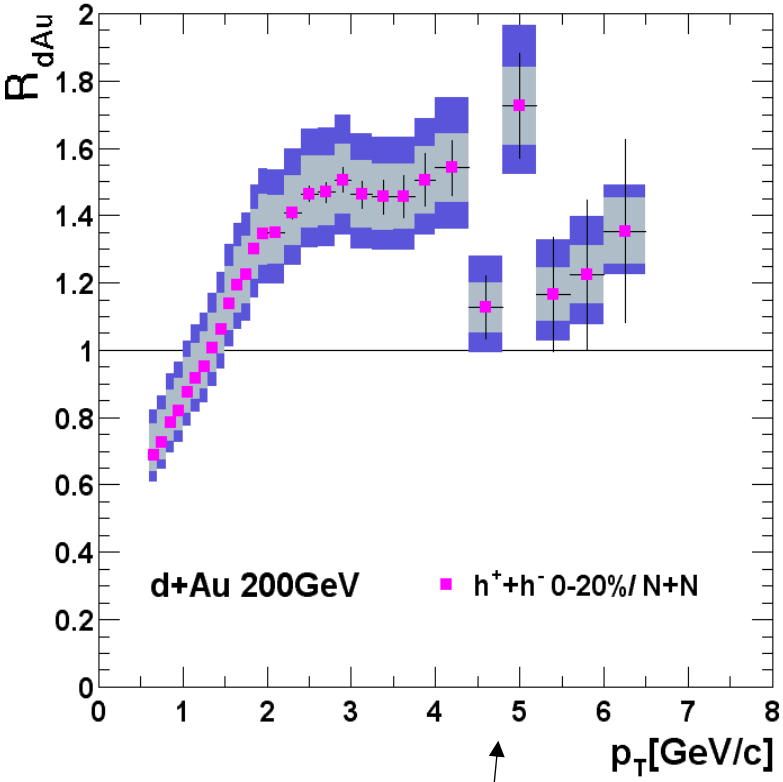
→ Indicating **formation of locally thermalized states = QGP!!**

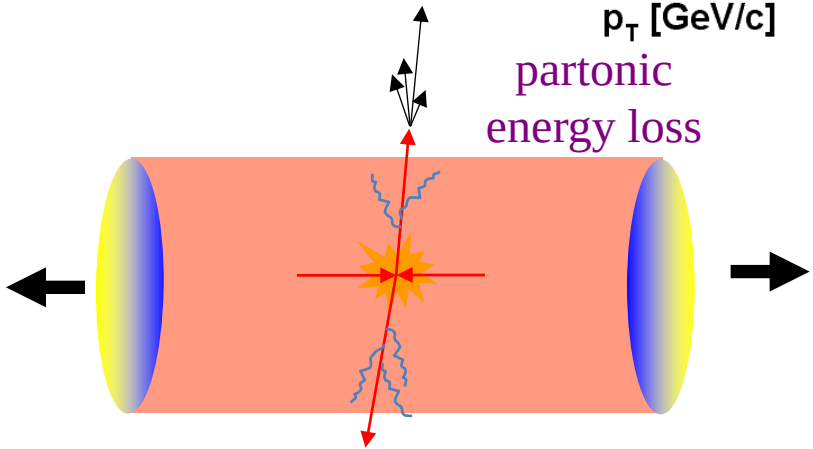
Moreover, it is even Strongly interacting QGP (sQGP)!!!!

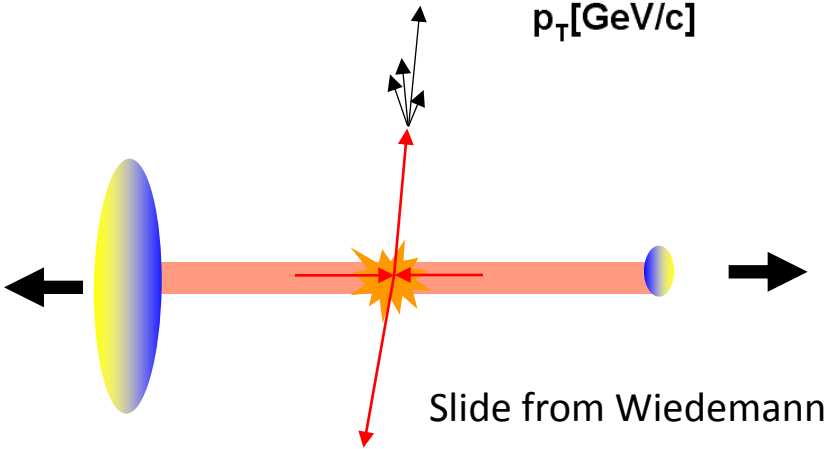
Parton energy loss : comparison with dAu

- Final state suppression
- Initial state enhancement







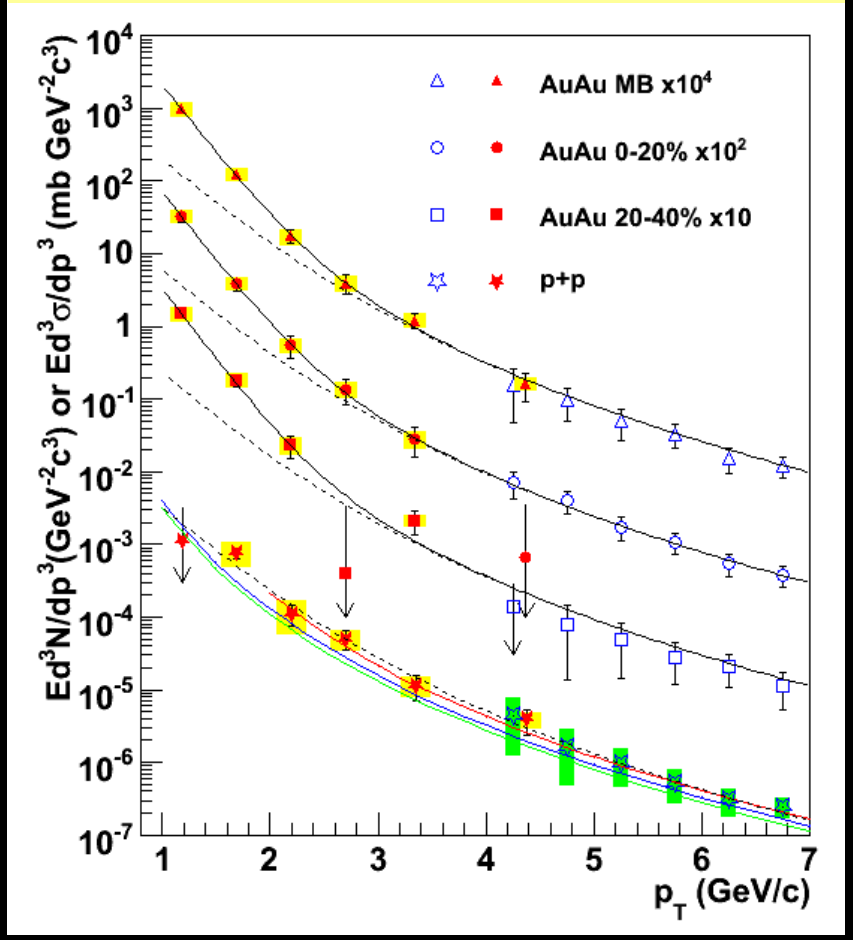


Slide from Wiedemann

Photons from QGP

Fit results

Cent.	dN/dy(p_T>1GeV/c)	T(MeV)	χ^2/DOF
0-20%	1.50±0.23±0.35	221±19±19	4.7/4
20-40%	0.65±0.08±0.15	217±18±16	5.0/3
MB	0.49±0.05 ±0.11	233±14±19	3.2/4



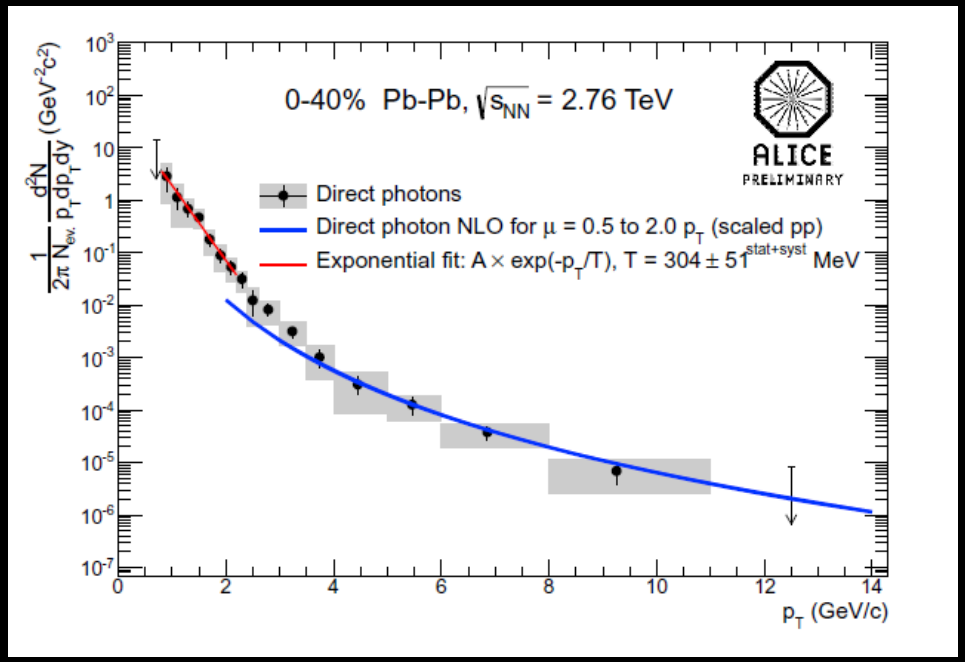
Clear deviation from scaled photon yields in the pp collision

→ "Thermal photon"

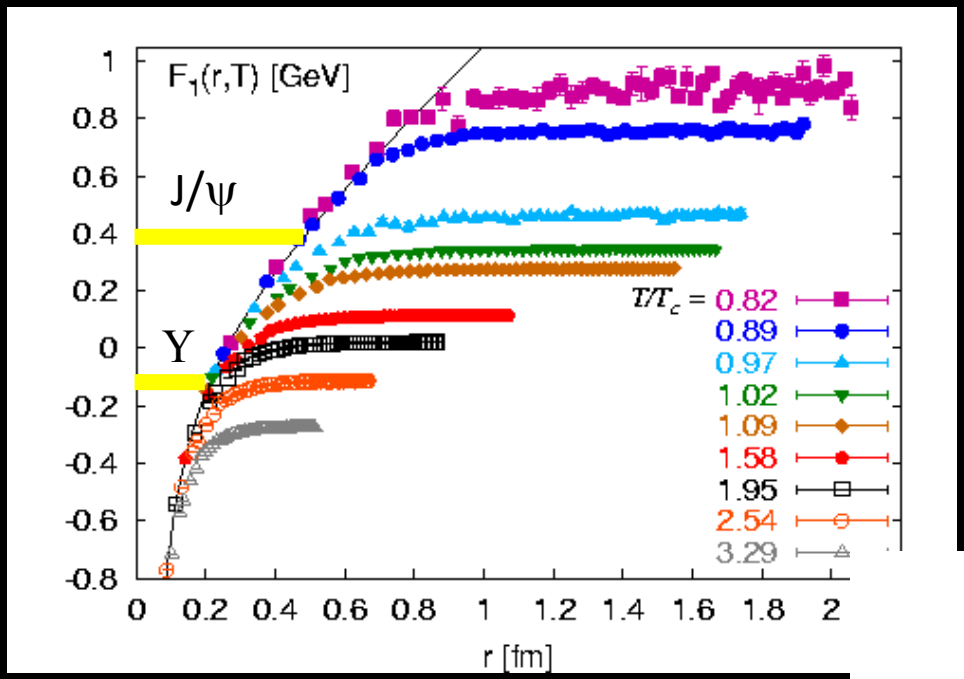
thermal radiation from QGP

T_{init} > 230 MeV at RHIC

T_{init} > 300 MeV at LHC



Melting quarkoniums



q-qbar potential at finite T

T<Tc linear + Coulomb

$$V(r) = \kappa r - \frac{\alpha_{\rm eff}}{r}$$

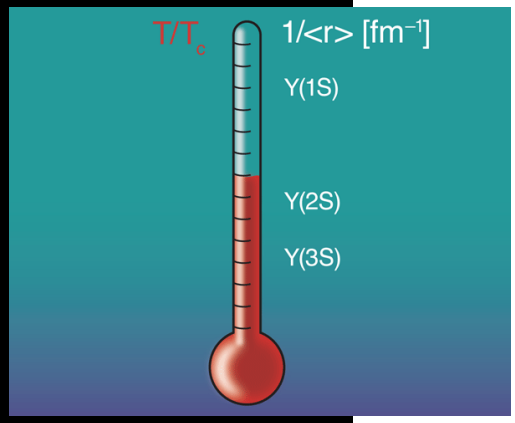
T>Tc Yukawa with Debye screening

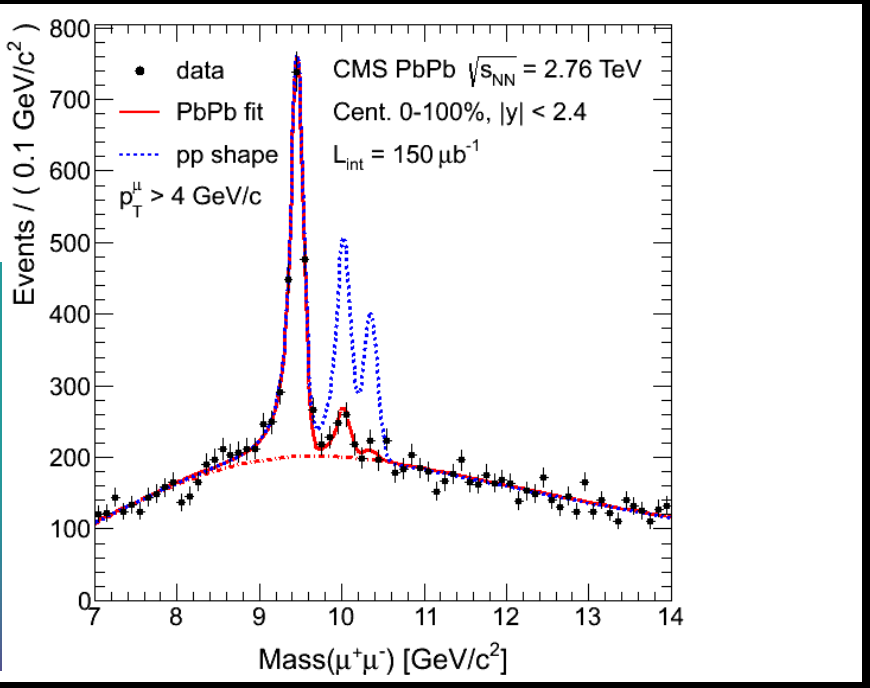
$$V(r) = -\frac{\alpha_{\rm eff} e^{-r/\lambda_D}}{r}$$

Heavy quarkoniums (charmoniums, botommoniums) are created just after the collision, which then enter QGP and melt.

J/psi suppression by Matsui-Satz

→ Quarkonium as thermometer





RHIC, LHC dataの標準的解釈

1. 強い異方的流れの存在
2. 高運動量粒子の抑制
3. 熱光子の測定
4. 重いクォーコニウムの抑制

生成した物質は

相対論的流体力学が適用できる系

であり、それはクォークグルーオンプラズマと考えられるが、
粘性が小さく、大きな抑制能を持つことから、
従来考えられていた「弱く相互作用する希薄なガス」ではなく、

「強く 相互作用する流体的なもの」

と見なすべき

「標準的解釈」を揺るがす予想外の実験結果

- **小さい系における集団的流れ**

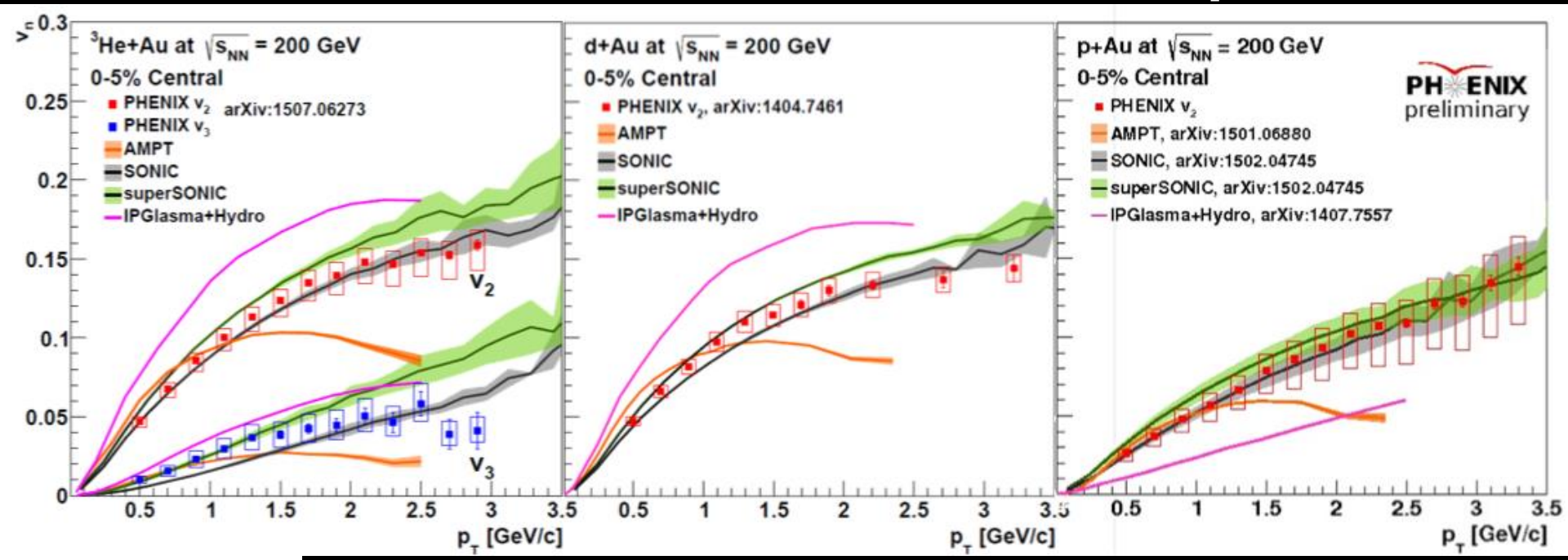
  大きな集団的流れは流体的な状態の生成の根拠だった
  しかし、**pAやppですら大きな流れが測定**されるようになり、
  → 今までの解釈の正当性が揺らぐ？
  → それとも小さい系でのQGP生成を見ているのか？

- **光子の大きな集団的流れ**

  観測された光子が熱的なQGP状態からの放射であるならば
  大きな集団的流れは期待できないはずだが、実際には
  ハドロンと同程度の大きな流れが測定されているし、
  実際の収量を説明することもできていない
  → 光子は本当に熱的なQGP状態の根拠とできるのか？

Collectivity in small systems

^{3}He+Au d+Au p+Au



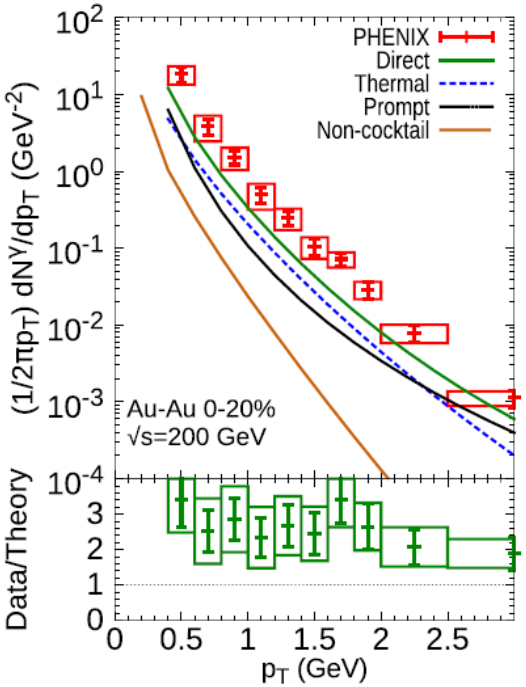
PHENIX, PRL 114, 192301 (2015)
PHENIX, PRL 115, 142301 (2015)
AMPT: arXiv:1501.06880
SONIC: arXiv:1502.04745
IP+Hydro:arXiv:1407:7557

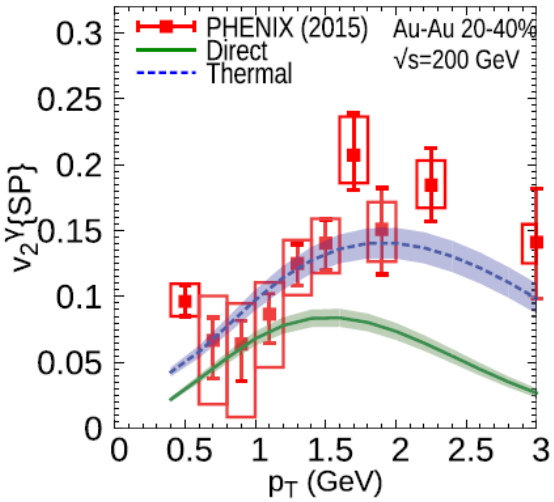
WHAT IS THE ORIGIN OF THIS COLLECTIVITY???
Don't escape to an easy solution
such as assuming creation of QGP!!

Direct photon puzzle

Direct photons : all photons except decay photons
including prompt photons, thermal photons, etc.

Up-to-date hydrodynamic calculation for thermal photons
(Paquet, Shen, Denicol, Luzum, Schenke, Jeon, Gale 2016)





Photons have large v2 of the same order of v2 of pions

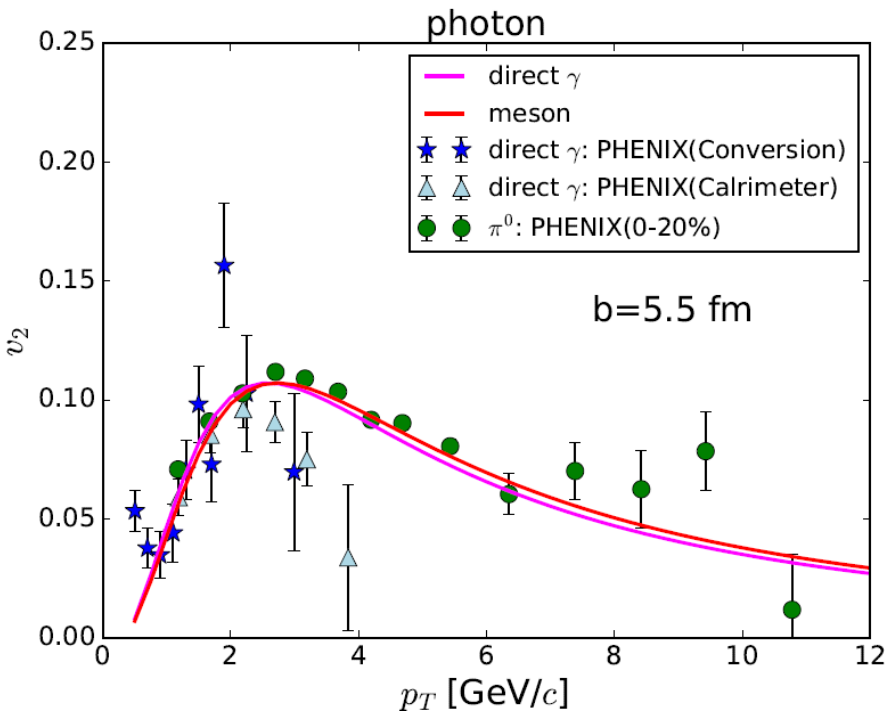
Up-to-date thermal photon calculation
- consistent with v2 data
- but underestimates yield by factor of 2 to 3 (at RHIC)

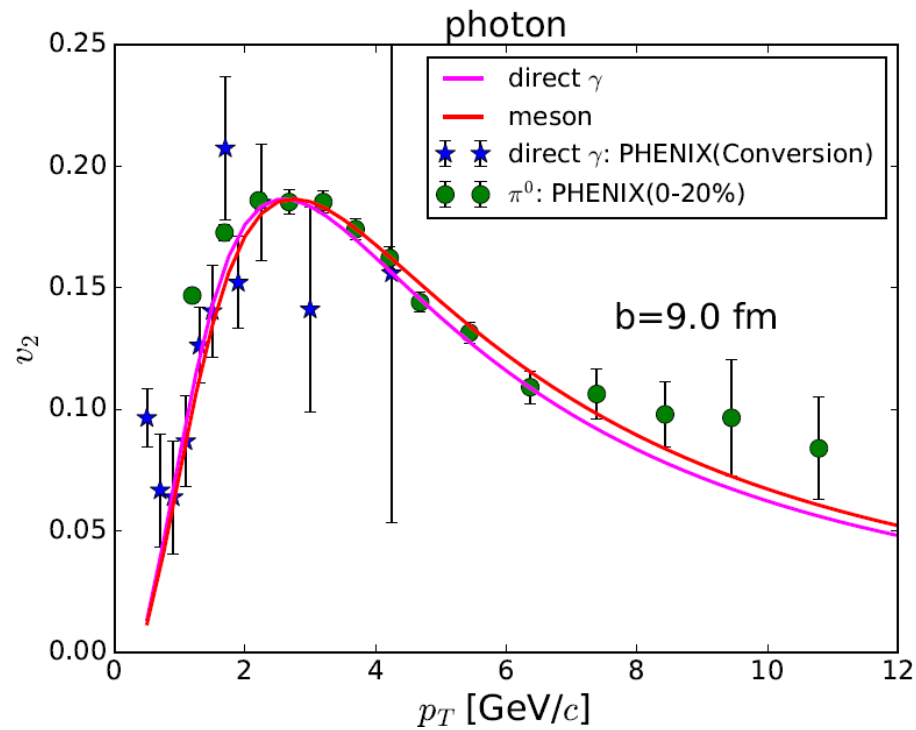
Let's think of another source of photon emission!

新しいモデル **Fujii, Itakura, Nonaka in preparation**

Photon's elliptic flow @ RHIC

Assume parton v2 (a source of flow) $v_2^q(p_T) \propto \dfrac{1}{1+(p_T/p_0)^3}, \quad p_0 = 1.3\mathrm{GeV}$





Photon's v2 has the same magnitude and same shape as v2 of pions.
Small momentum difference consistent with scaling (T^M/T^γ=1.06).

$$v_2^{meson}(k) \sim v_2^*\left(\frac{M_*^2}{M_*^2+M^2}k\right), \quad v_2^\gamma(k^\gamma) \sim v_2^*\left(\frac{M_*^2}{M_*^2-M^2}k^\gamma\right)$$

Cf: violation of NCQ scaling appears in high pt region

その他の未解決問題

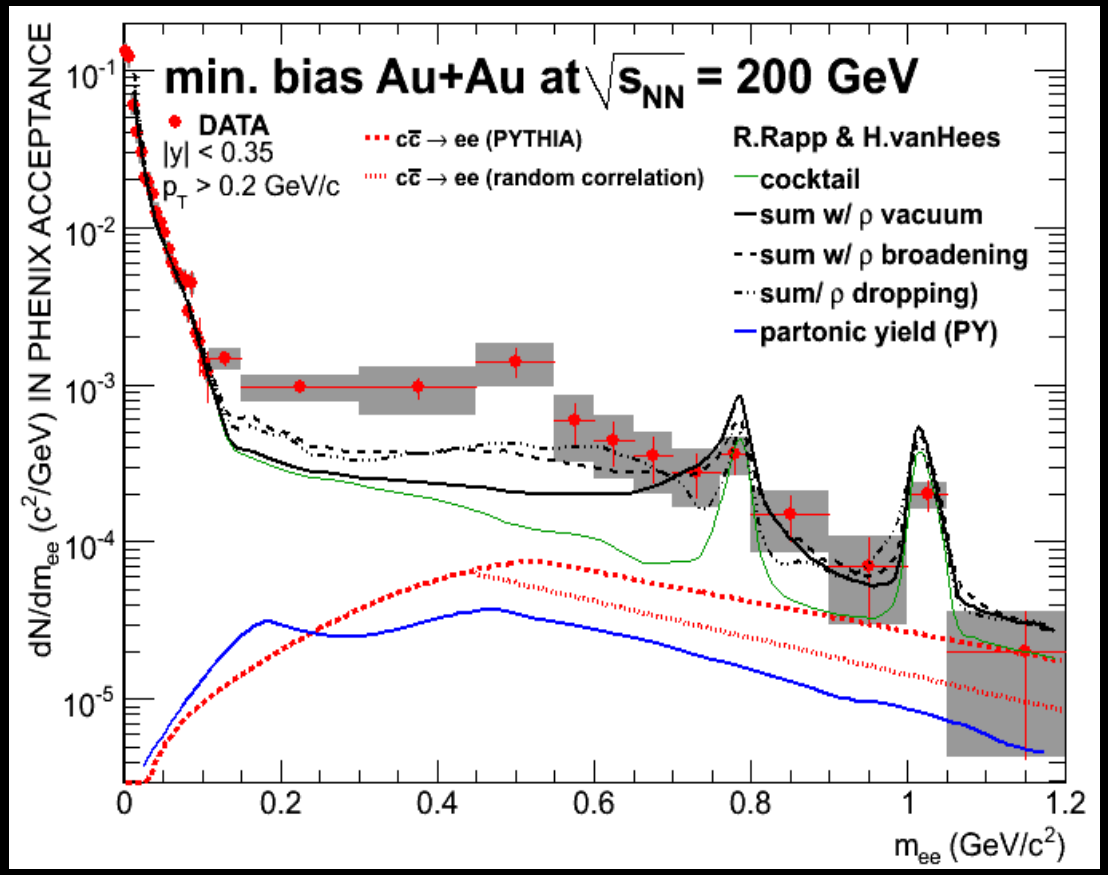
- **早い熱平衡化問題**

流体シミュレーションの初期時刻は1fm/cより短く取るのが
良いようだが、この時間は運動学的描像からすると非常に短い。
実は、QGPの生成過程が理解されていない。
CGC → Glasma → QGP という「標準模型」では説明できない。
（この描像を超える物理が必要。強い場の効果もよく分かってない）

- **レプトン対生成の増大**

実験によって増大の値は異なるが、ρ メソンよりも低い
invariant mass領域に増大が見られる
それを説明できる理論はいまのところない

Dilepton enhancement



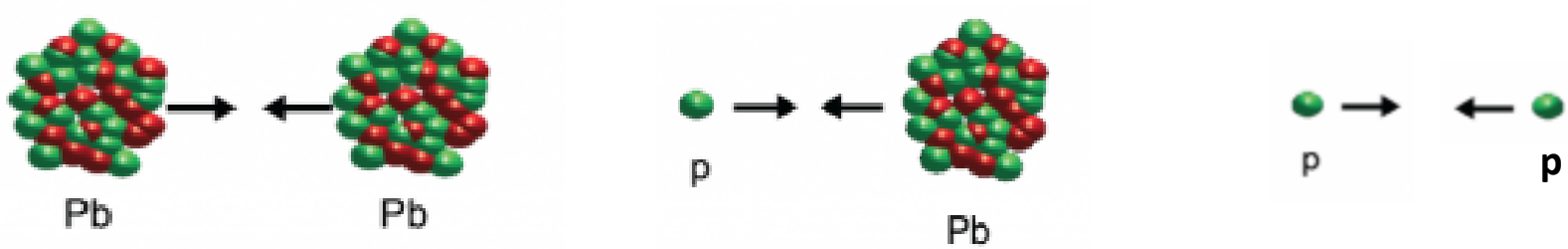
There is no theory that can describe this large enhancement

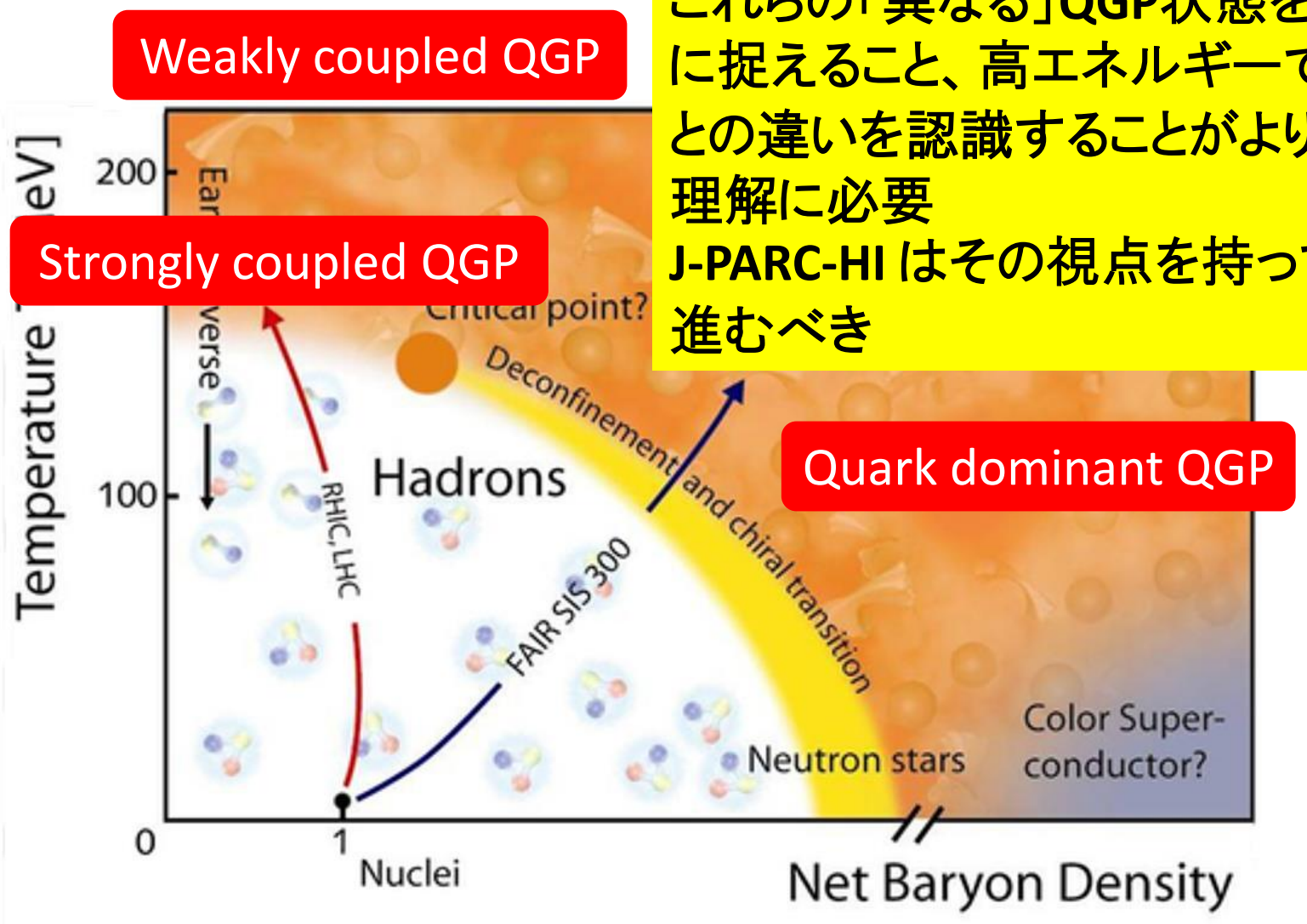
- 以上が現状の大雑把な説明
- つまり、未だに理解できていないことは多いし、理解したと思っていたことすら、この３，４年の間に出てきた実験結果によって大きく揺らいでいる
- 特に、結局理解できていないが最も重要なのは、QGPがどのような条件で、如何にして生成するのかという「onset問題」

Onset問題

- 結局、QGPはどういう条件で生成するのか？
- コントロールパラメータ
  エネルギー（温度・密度）
  サイズ（multiplicity、pp-pA-AA、A依存性）
- これらがどう生成時間にも影響するか？

J-PARC-HIで詳細に調べる事ができる



様々なQGPがあることを認識すべき

これらの「異なる」QGP状態を連続的に捉えること、高エネルギーでのQGPとの違いを認識することがより深い理解に必要
J-PARC-HI はその視点を持って進むべき