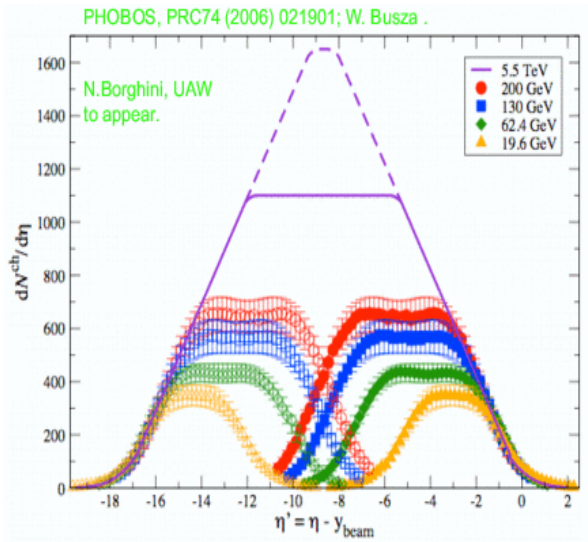


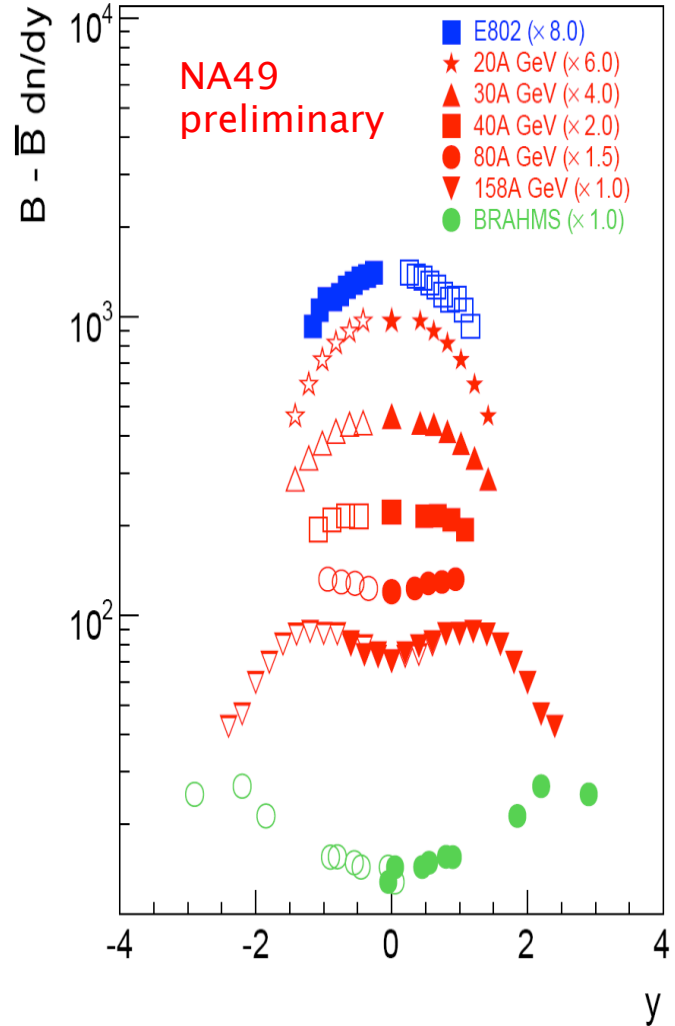
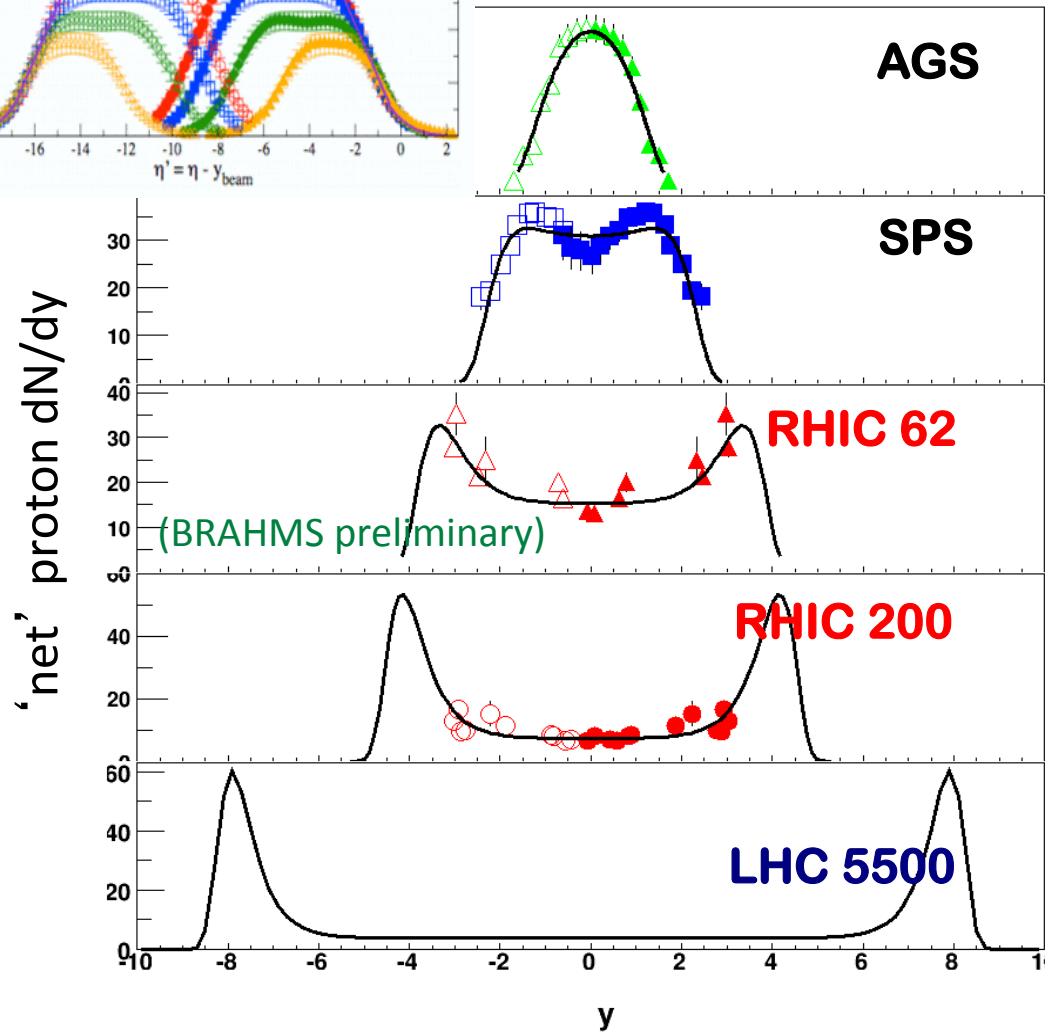
pT分布、Flow、2体相関(ridge含む)、3体相関

チュートリアル研究会
「重イオン衝突の物理：
基礎から最先端まで」

筑波大物理、江角晋一

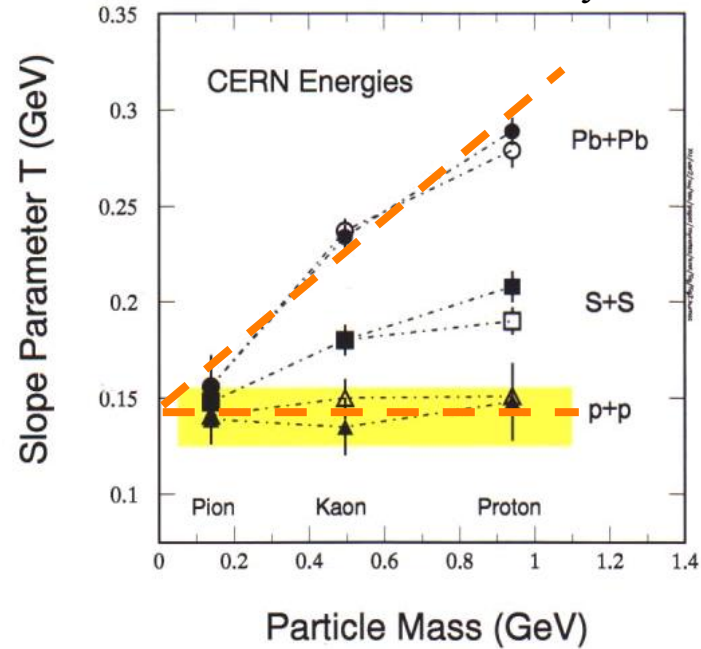
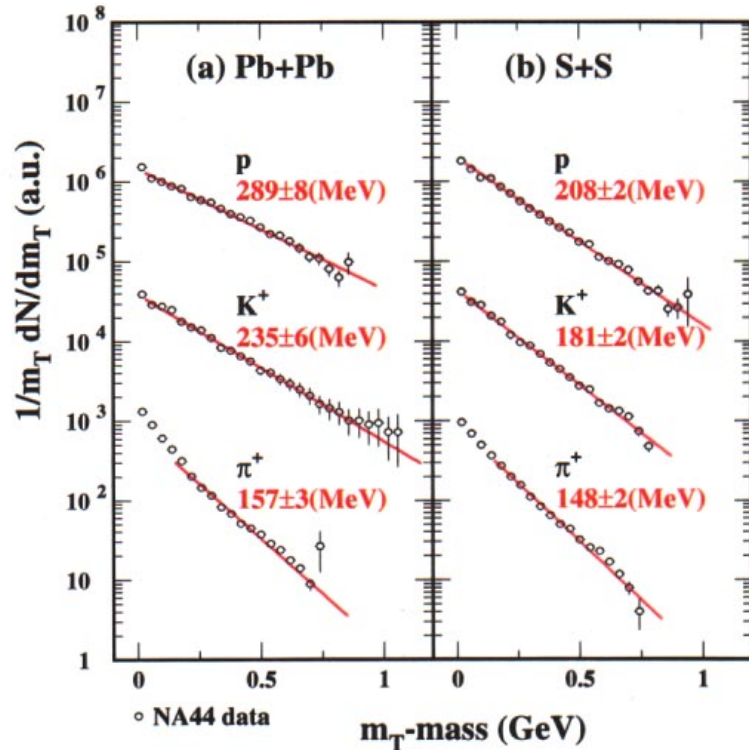
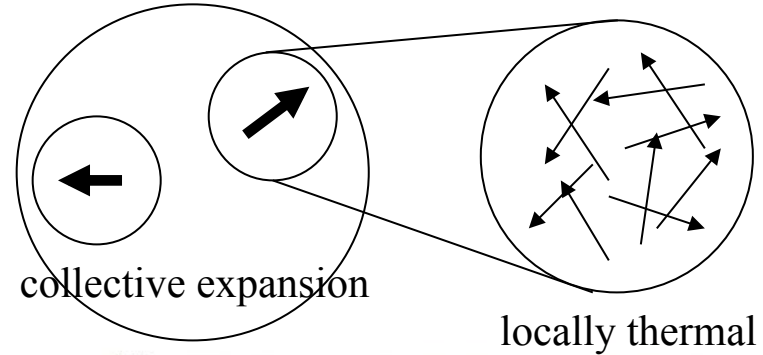


バリオン分布 (stopping)



熱力学的凍結 thermal freeze-out

ハドロン間の弾性衝突の終わり
the end of elastic interactions



$$E = E_{\text{thermal}} + E_{\text{collective}}$$

$$T_{\text{eff}} = T_{\text{fo}} + 0.5 m \langle v_{\perp} \rangle^2$$

$\sim 140 \text{ MeV}$

化学的凍結 粒子種、数、比の決定

$$\rho_i = \gamma_s^{|s_i|} \frac{g_i}{2\pi^2} T_{ch}^3 \left(\frac{m_i}{T_{ch}}\right)^2 K_2(m_i/T_{ch}) \lambda_q^{Q_i} \lambda_s^{s_i}$$

M. Kaneta and N. Xu,
J. Phys. G27 (2001) 589

$$\lambda_q = \exp(\mu_q/T_{ch}), \quad \lambda_s = \exp(\mu_s/T_{ch})$$

ハドロン間での非弾性衝突の終わり

クォーク結合によるハドロン生成

核子結合による原子核生成

原子結合による分子生成 ——— 化学反応 ———

T_{ch} : Chemical freeze-out temperature

μ_q : light-quark chemical potential

μ_s : strangeness chemical potential

γ_s : strangeness saturation factor

Q_i : 1 for u and d, -1 for u and d

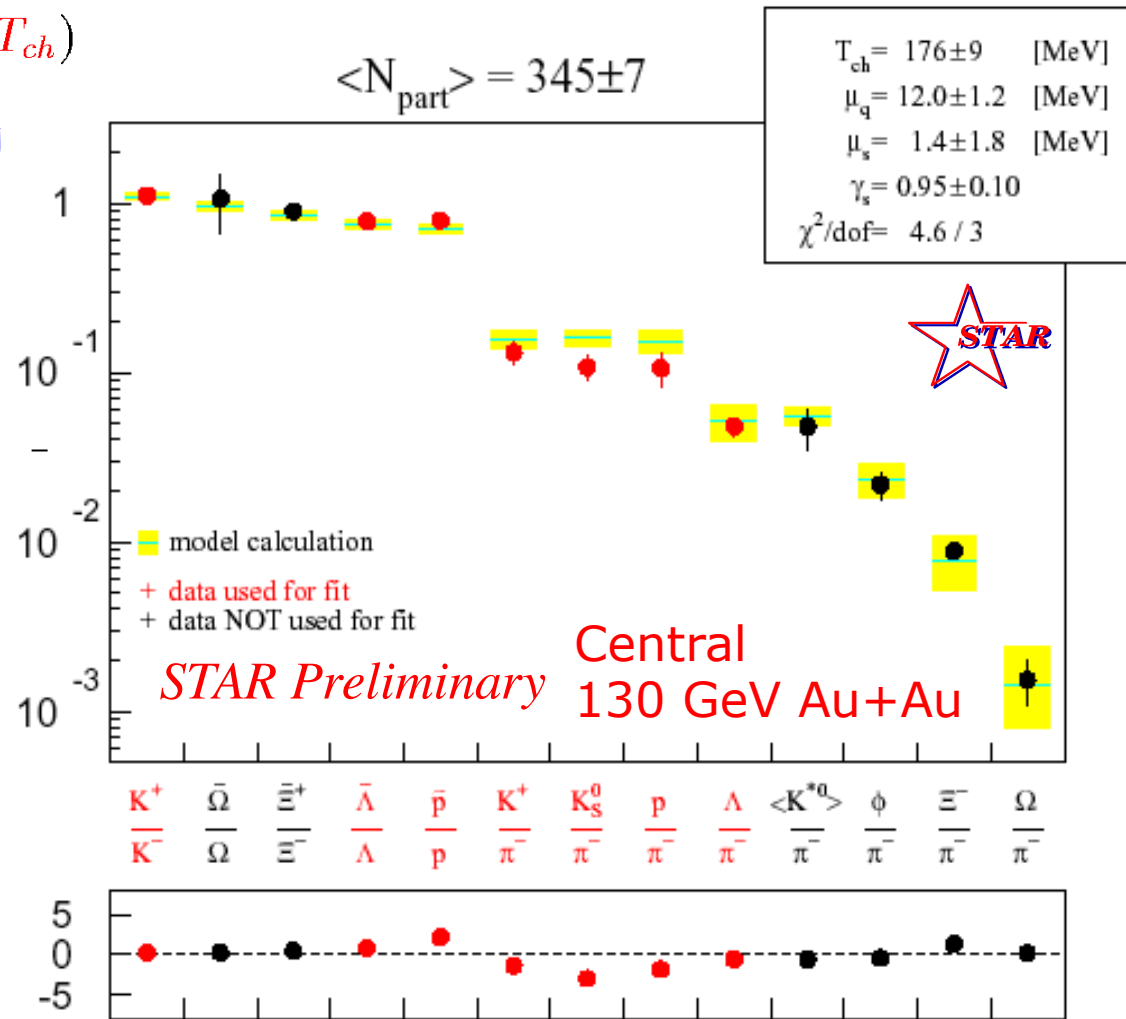
s_i : 1 for s, -1 for s

g_i : spin-isospin freedom

m_i : particle mass

K_2 : the second-order modified Bessel function

Simple chemical freeze-out model remarkably well agrees with data.



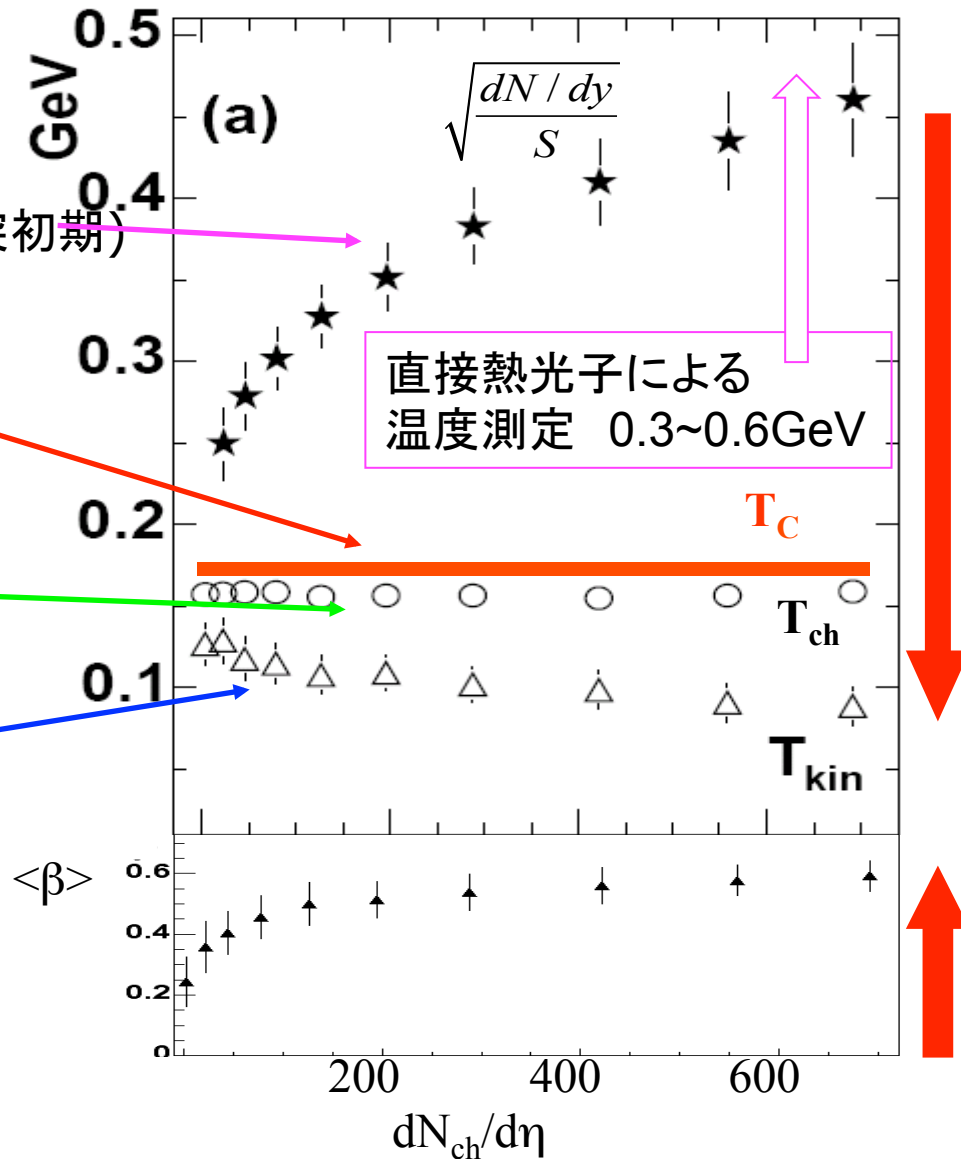
history of temperature
(温度の推移)

initial temperature
from the energy density (衝突初期)

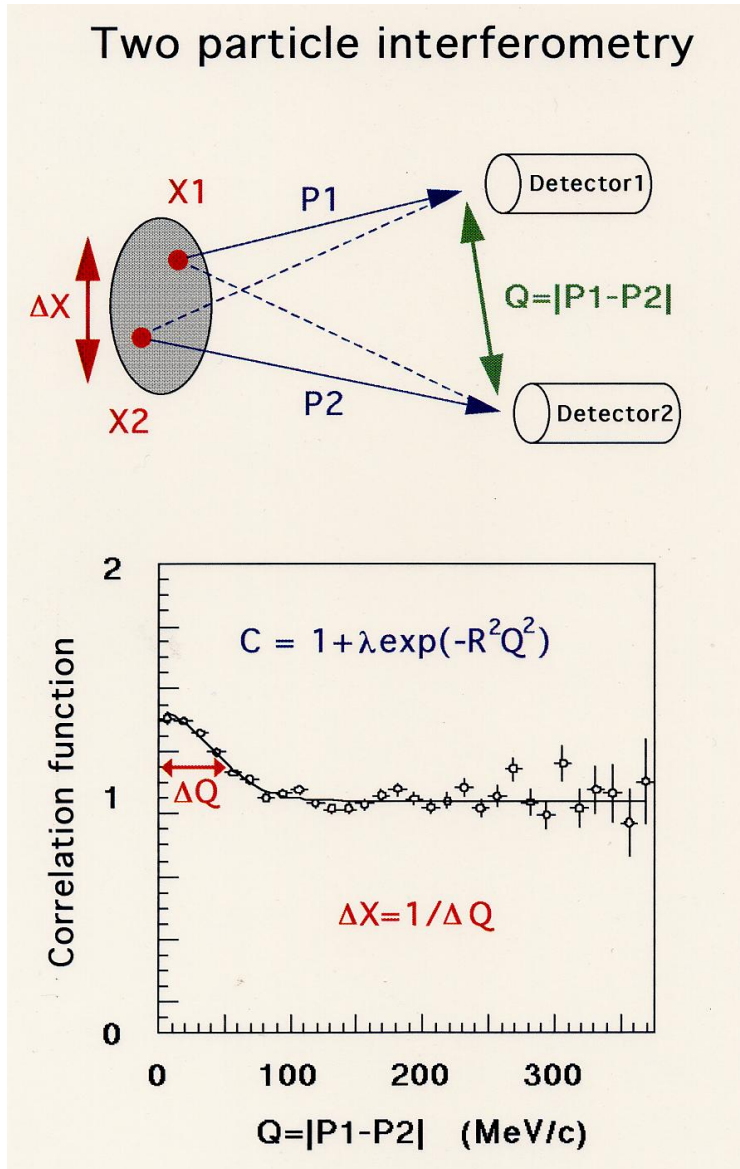
Phase transition at
critical temperature (相転移)

Chemical freeze-out
temperature (化学的凍結)

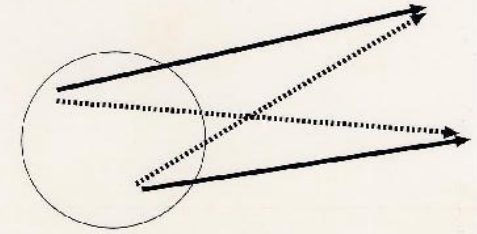
Thermal freeze-out
temperature (熱力学的凍結)



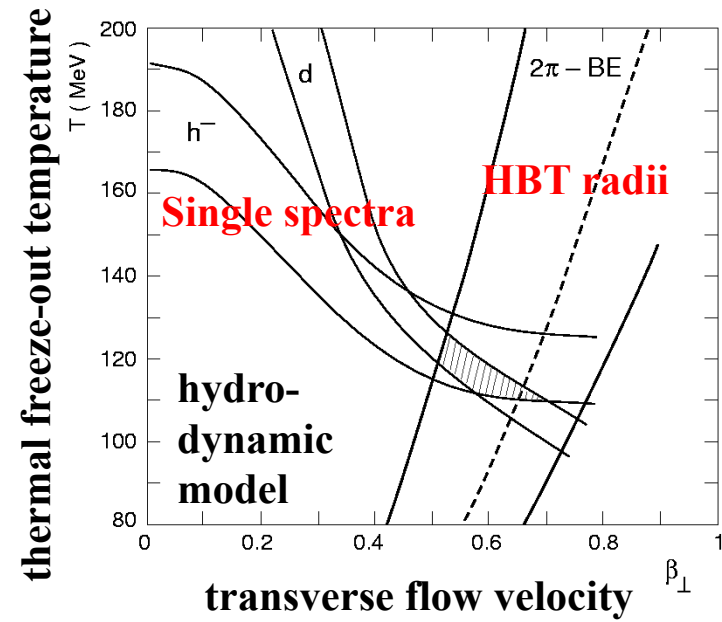
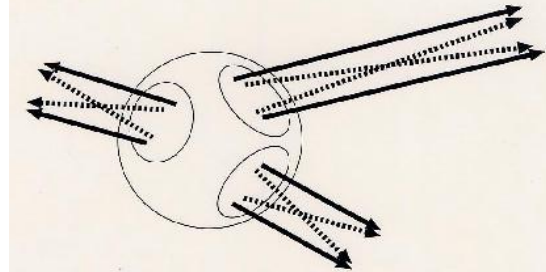
2粒子相関法により発生源サイズの大きさを測る。

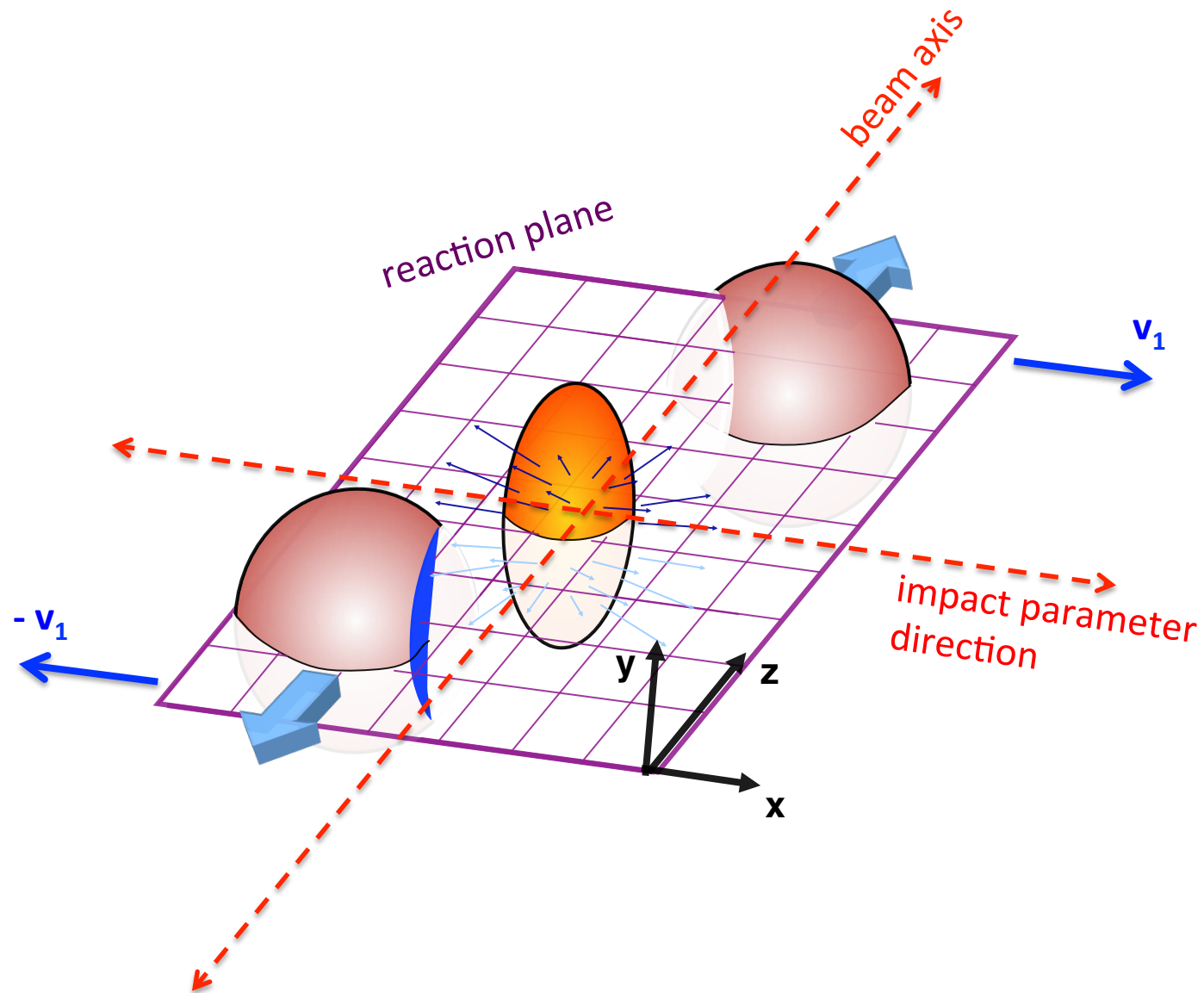


静的な粒子源

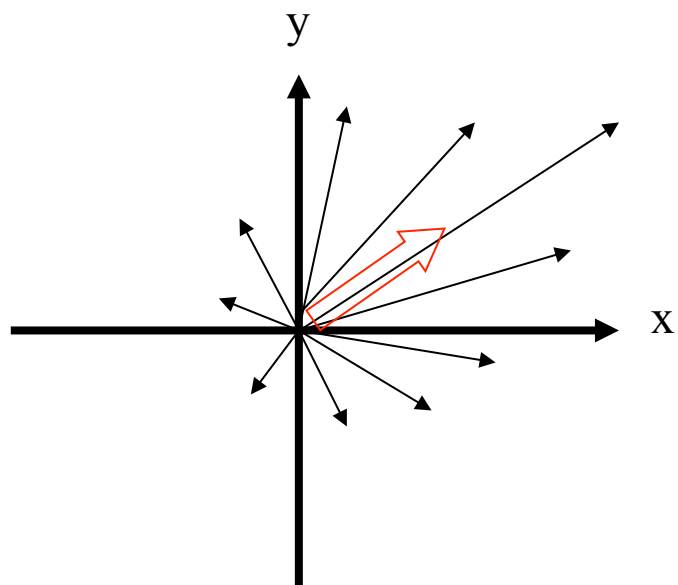


(膨張している)
動的な粒子源

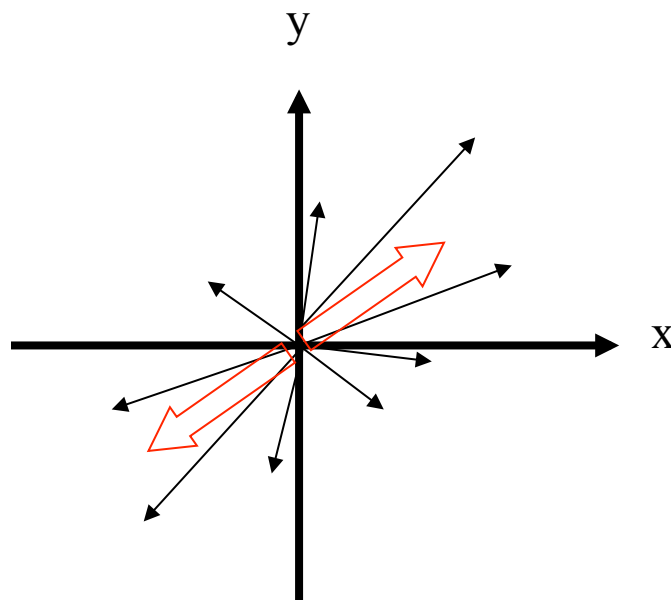




Directed flow (v_1)



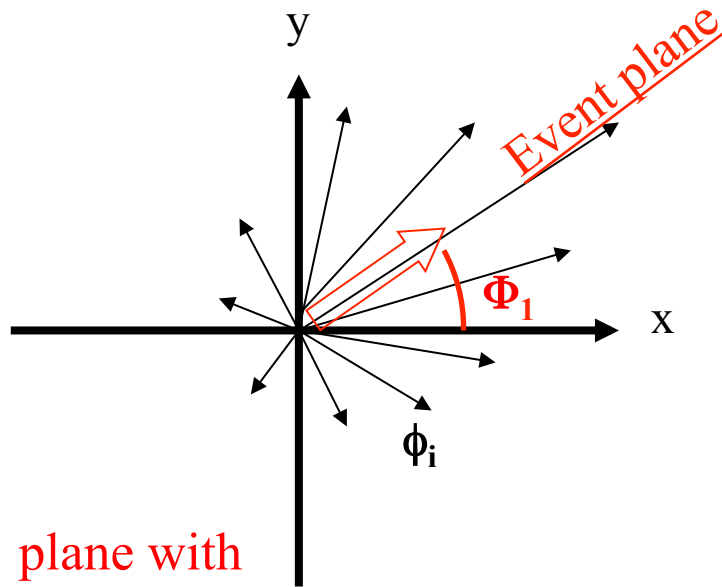
Elliptic flow (v_2)



—————→ 黒矢印の長さ \propto 粒子生成数、平均 p_T

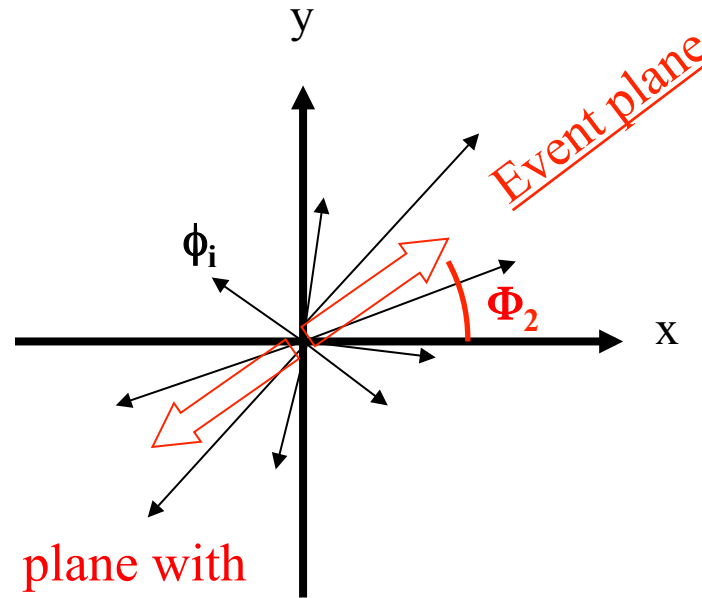
—————→ 粒子生成方向の重心 : Event Plane

Experimental Reaction Plane (Event Plane) definition



plane with
the directed moment

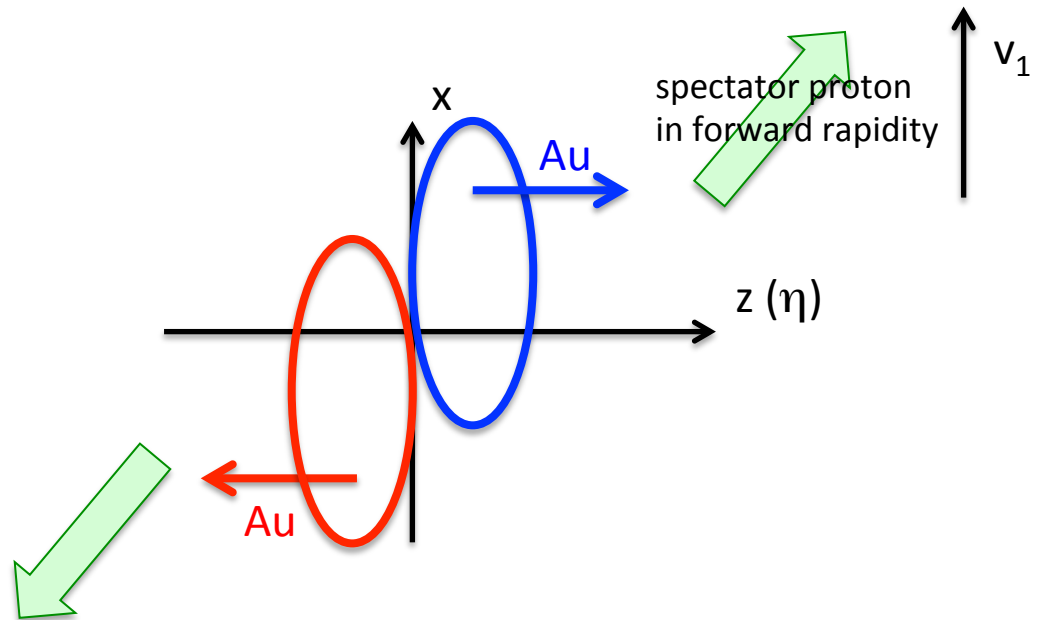
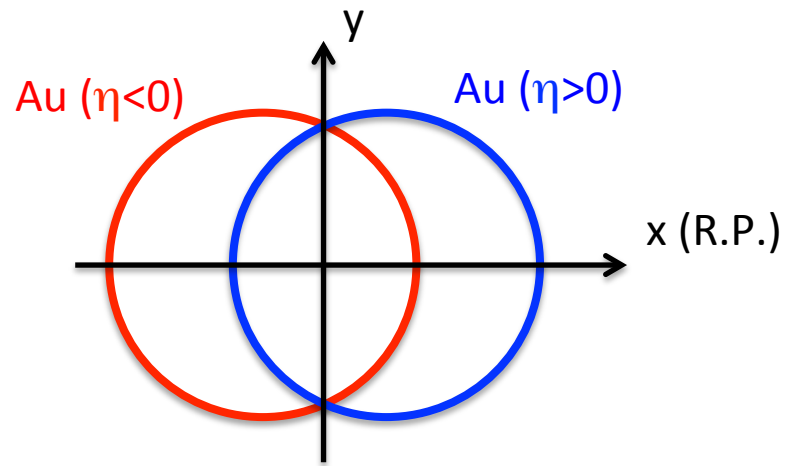
$$\tan(\Phi_1) = \frac{\sum w_i \sin(\phi_i)}{\sum w_i \cos(\phi_i)}$$

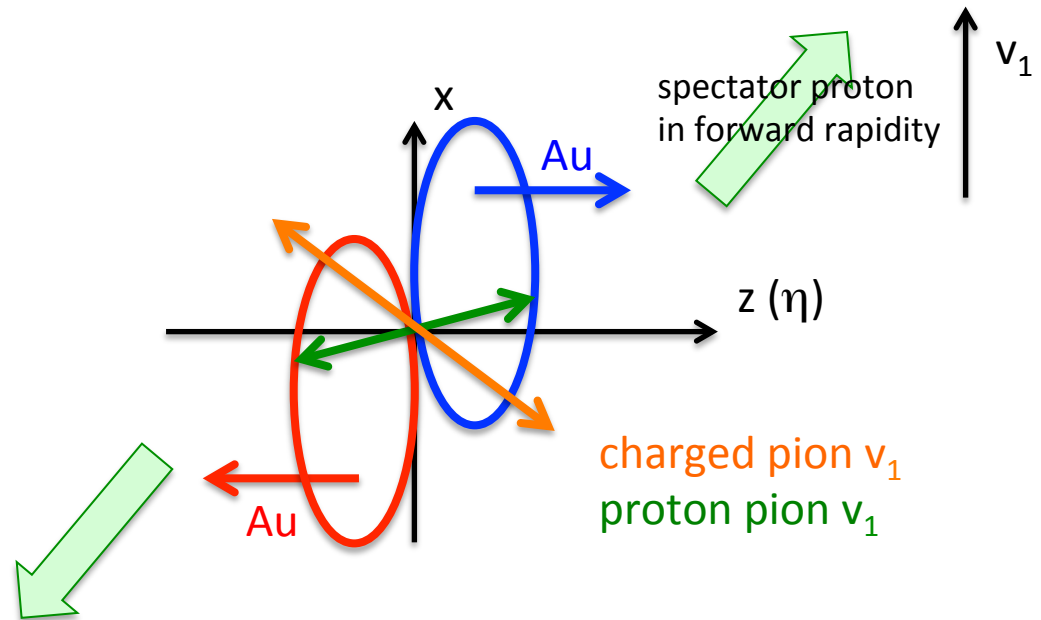
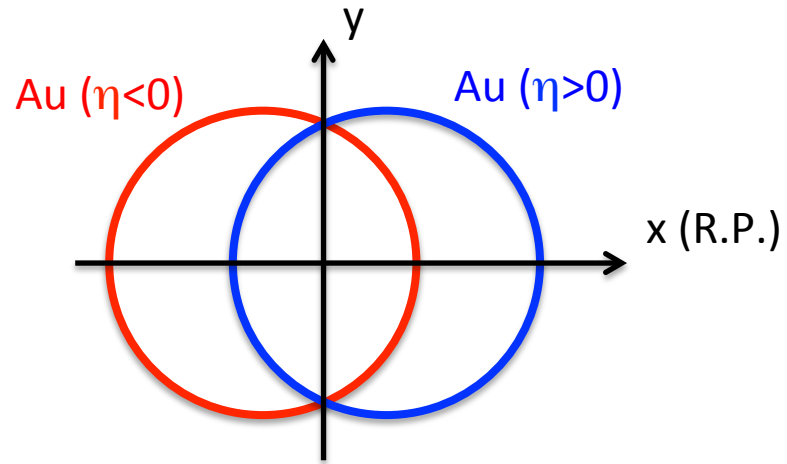


plane with
the elliptic moment

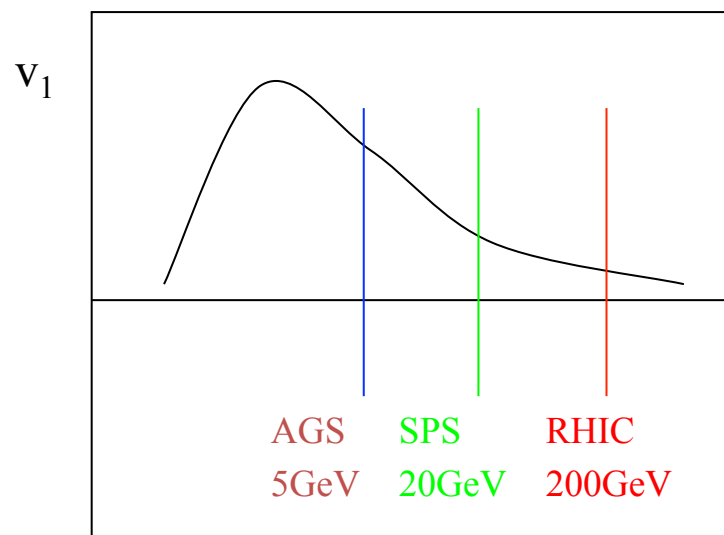
$$\tan(2\Phi_2) = \frac{\sum w_i \sin(2\phi_i)}{\sum w_i \cos(2\phi_i)}$$

(w_i : 1 or p_T or E_T)



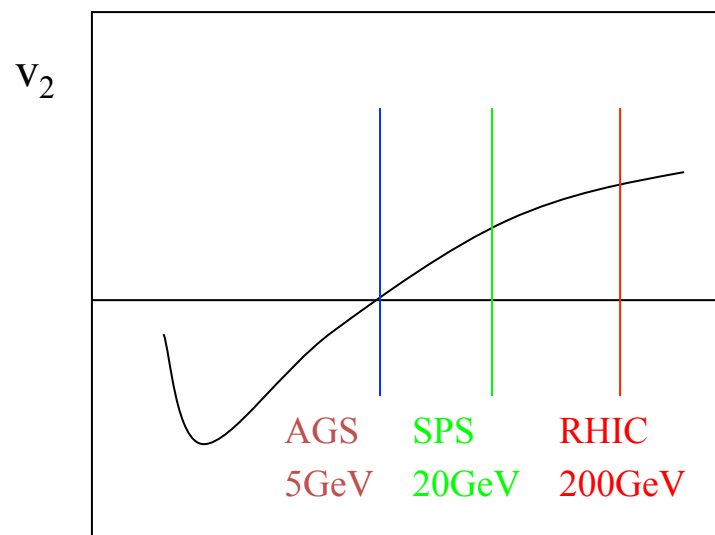


指向的異方性



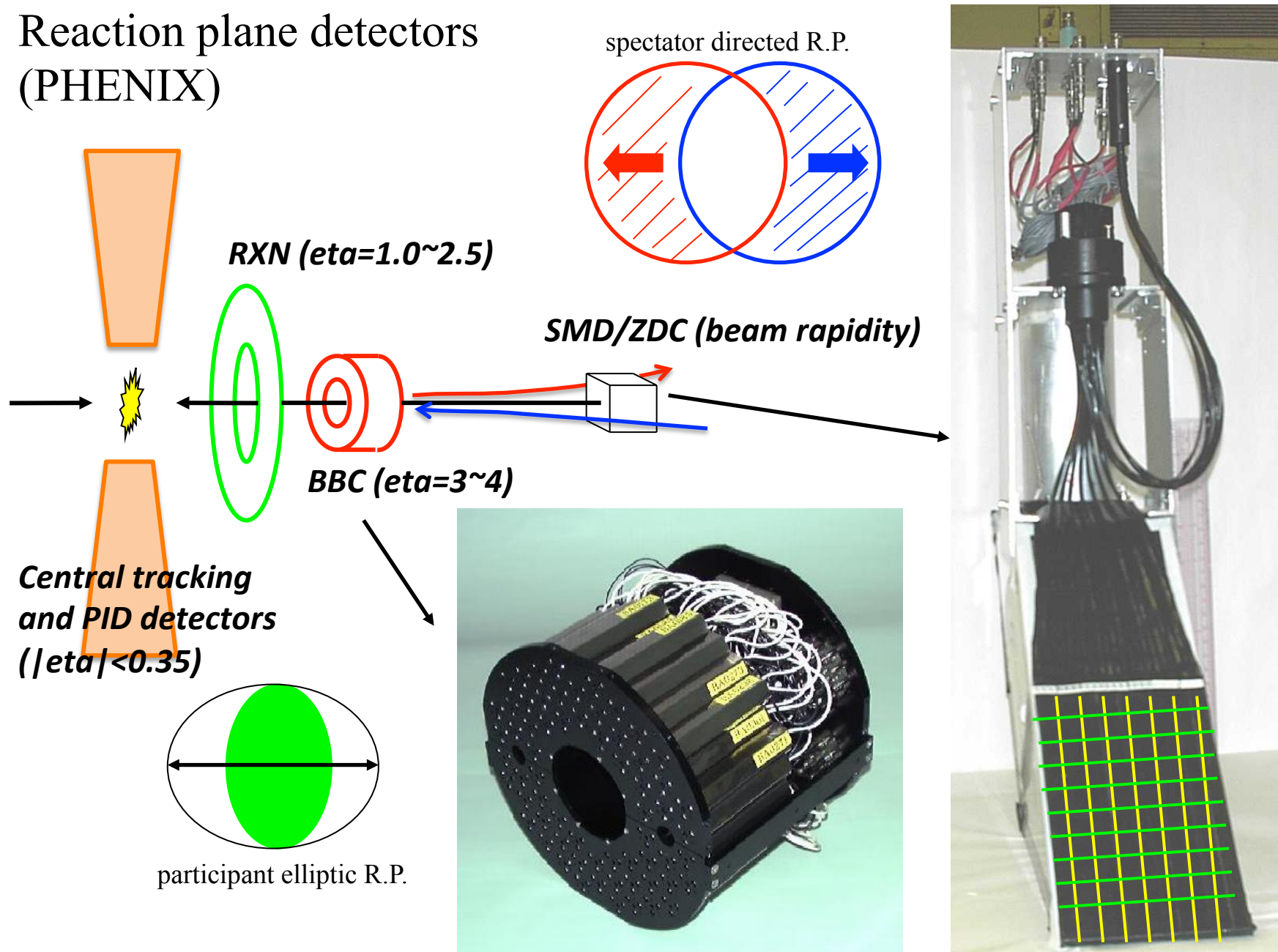
衝突エネルギー

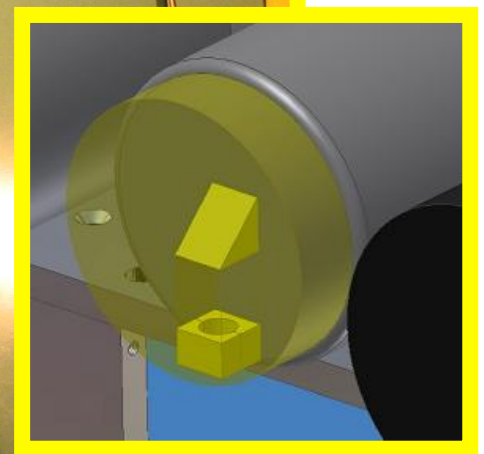
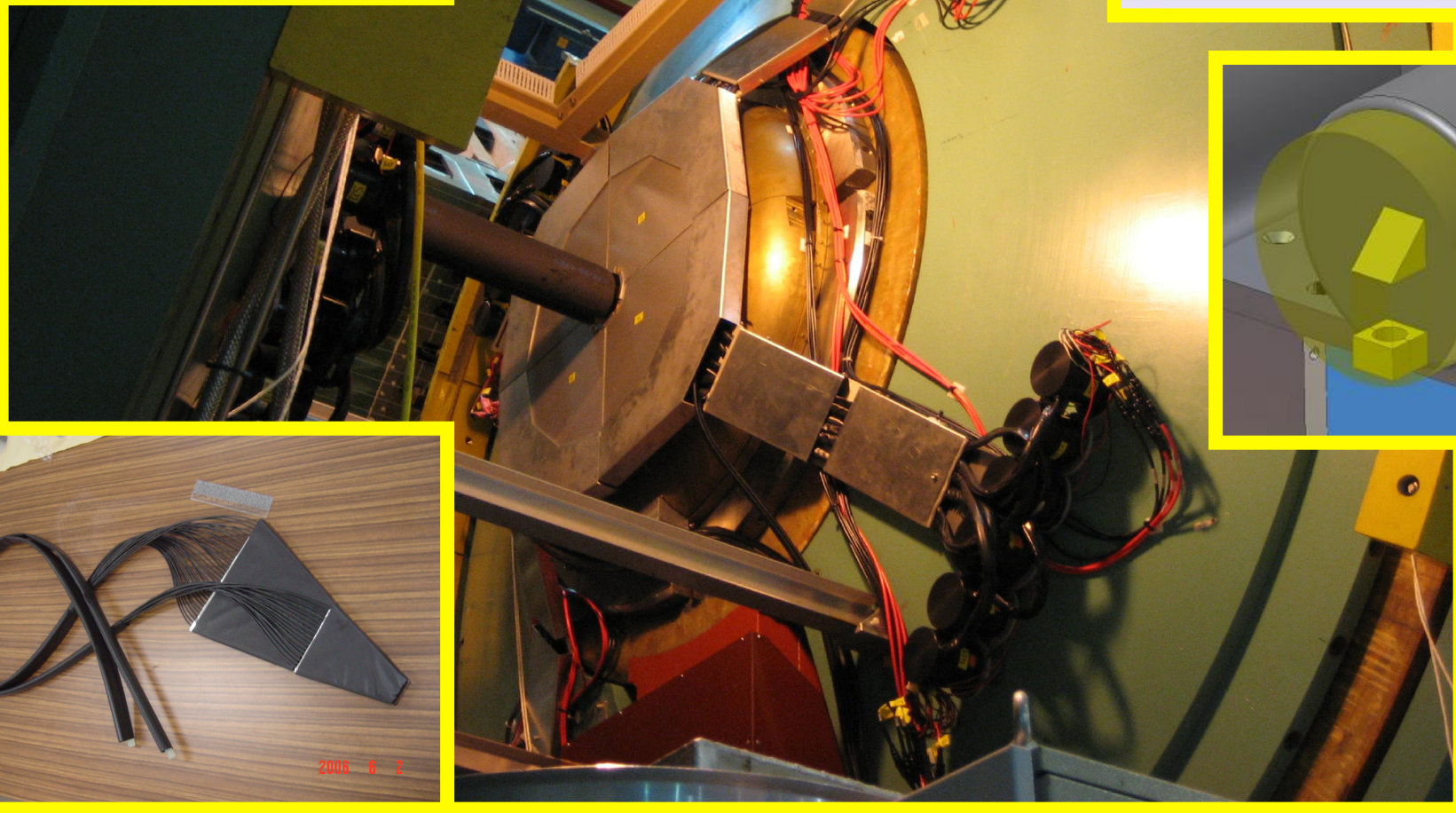
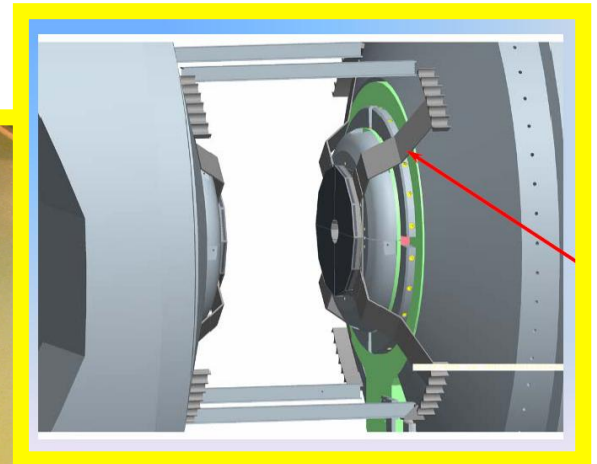
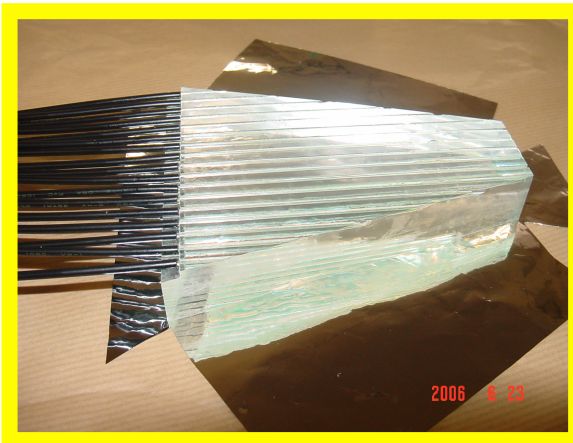
楕円の異方性



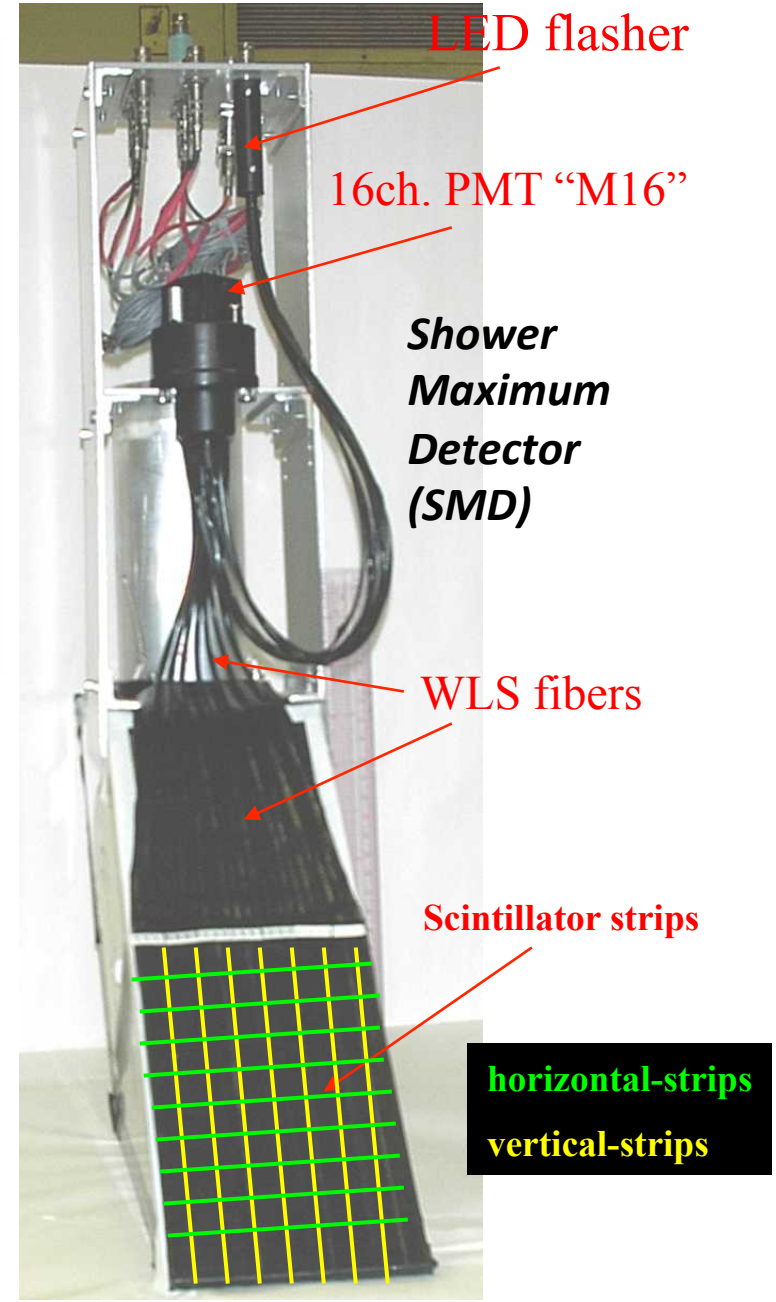
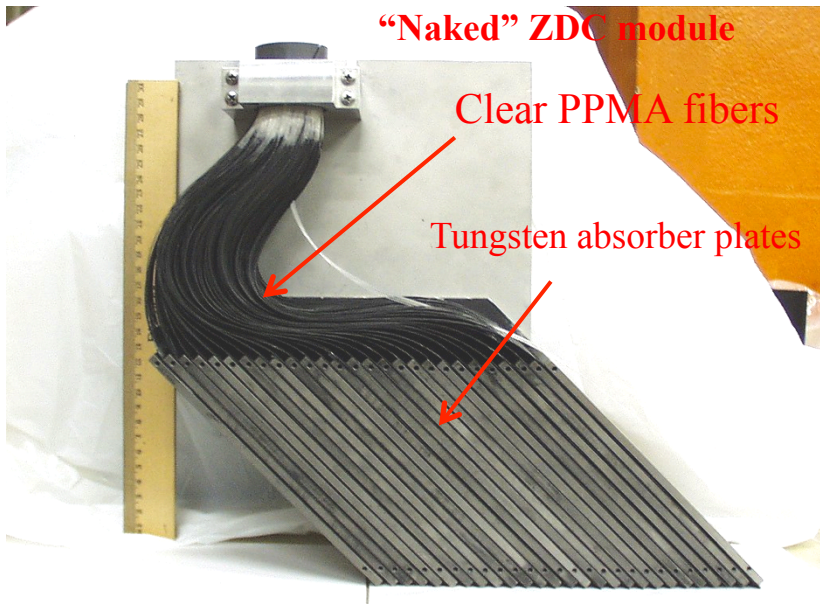
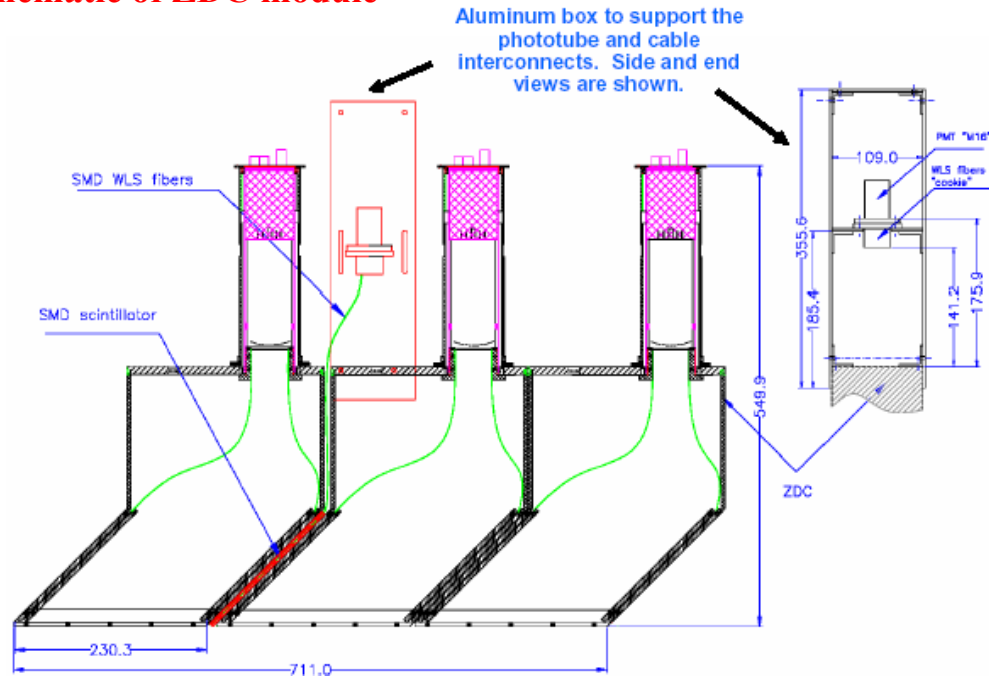
衝突エネルギー

Reaction plane detectors (PHENIX)



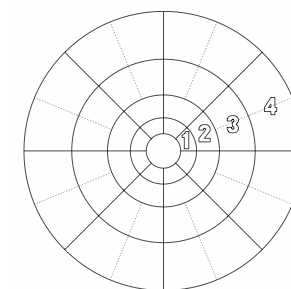
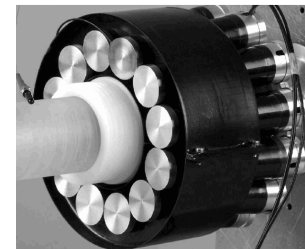
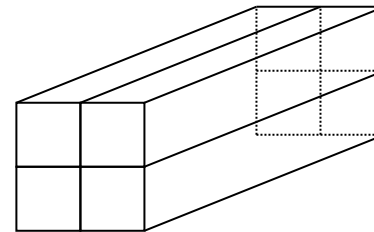


Schematic of ZDC module

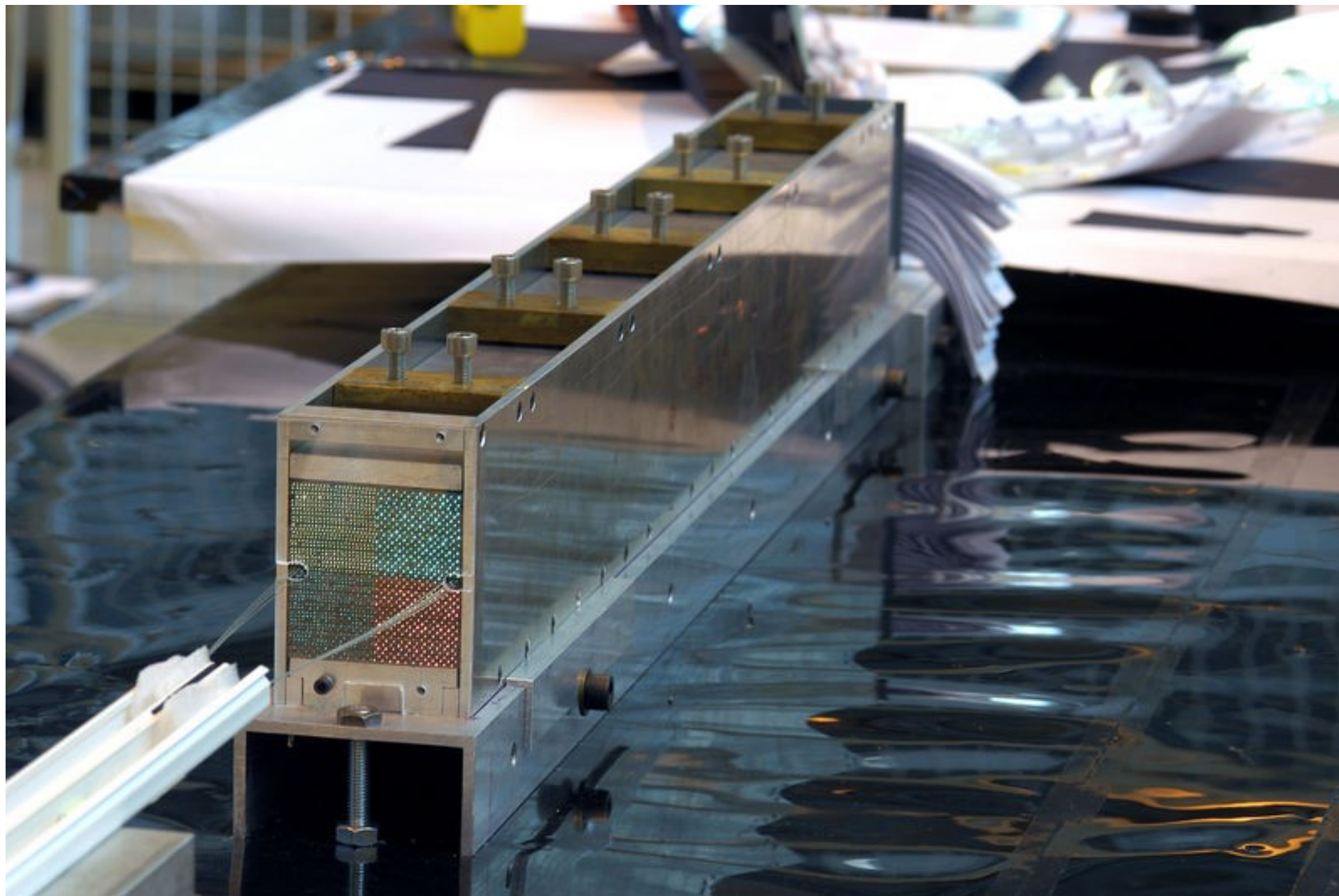


External Reaction Plane determination in ALICE for v_n measurement in TPC

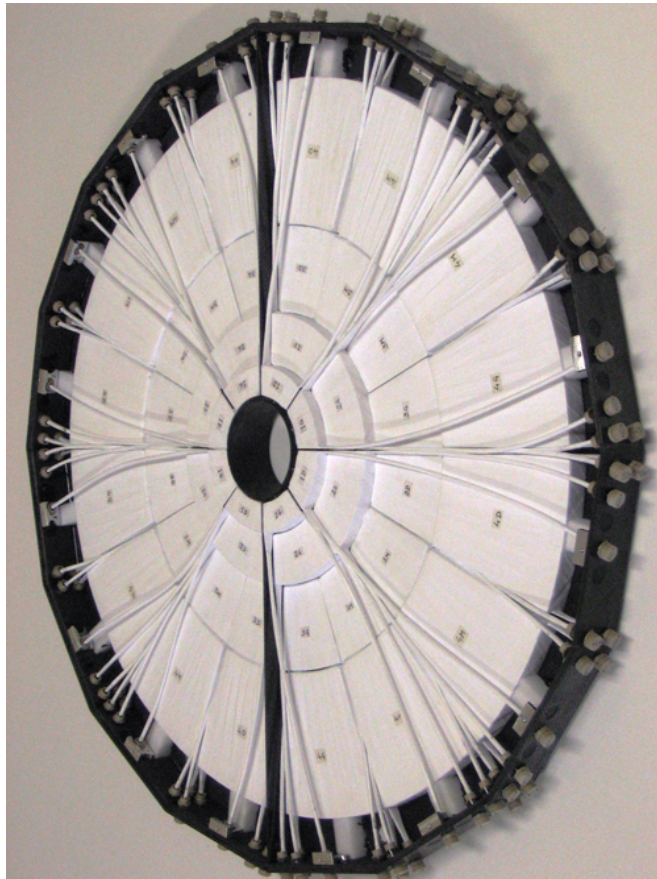
- * ZDC (2 arms, 4 segments in x/y)
- * T0 (2 arms, 1 ring/arm, 12 PMTs/ring)
T0C η : [-3.3 ~ -2.9]
T0A η : [4.5 ~ 5.0]
- * V0 (2 arms, 4 rings/arm, 8 segments/ring)
V0C η : [-3.7 ~ -3.2 ~ -2.7 ~ -2.2 ~ -1.7]
V0A η : [2.8 ~ 3.4 ~ 3.9 ~ 4.5 ~ 5.1]



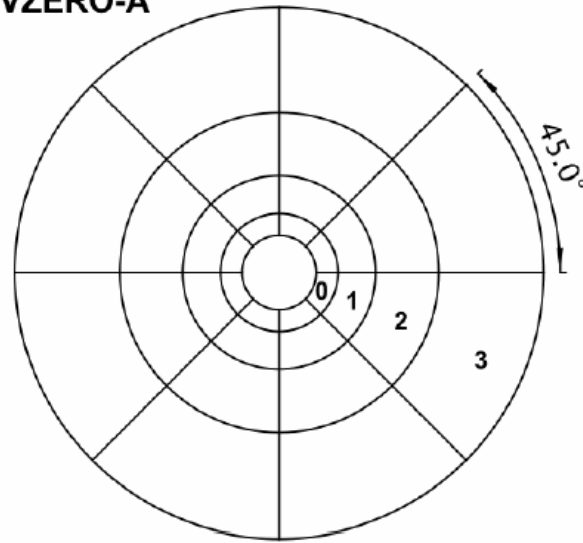
ALICE – ZDC



ALICE – V0



VZERO-A



VZERO-C

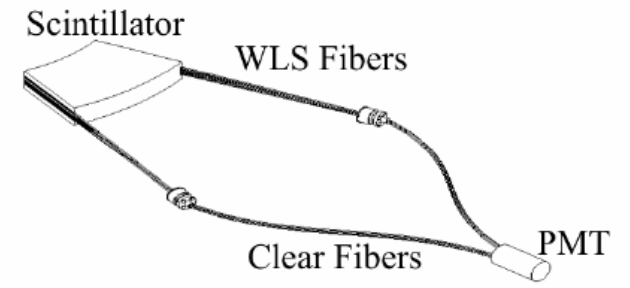
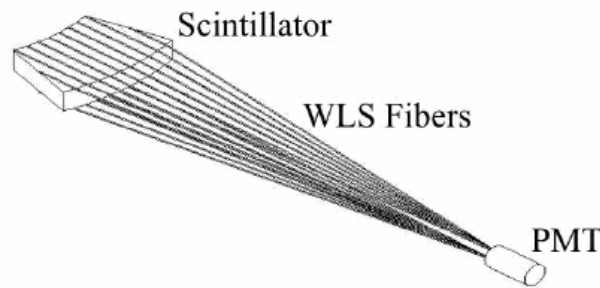
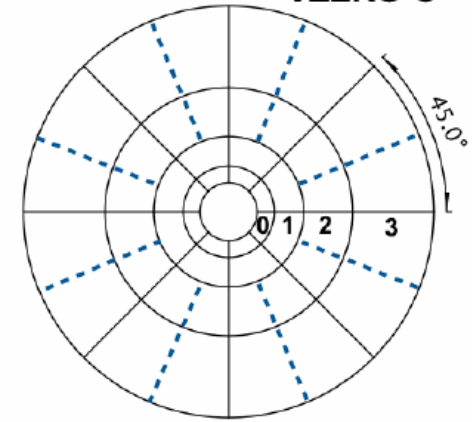
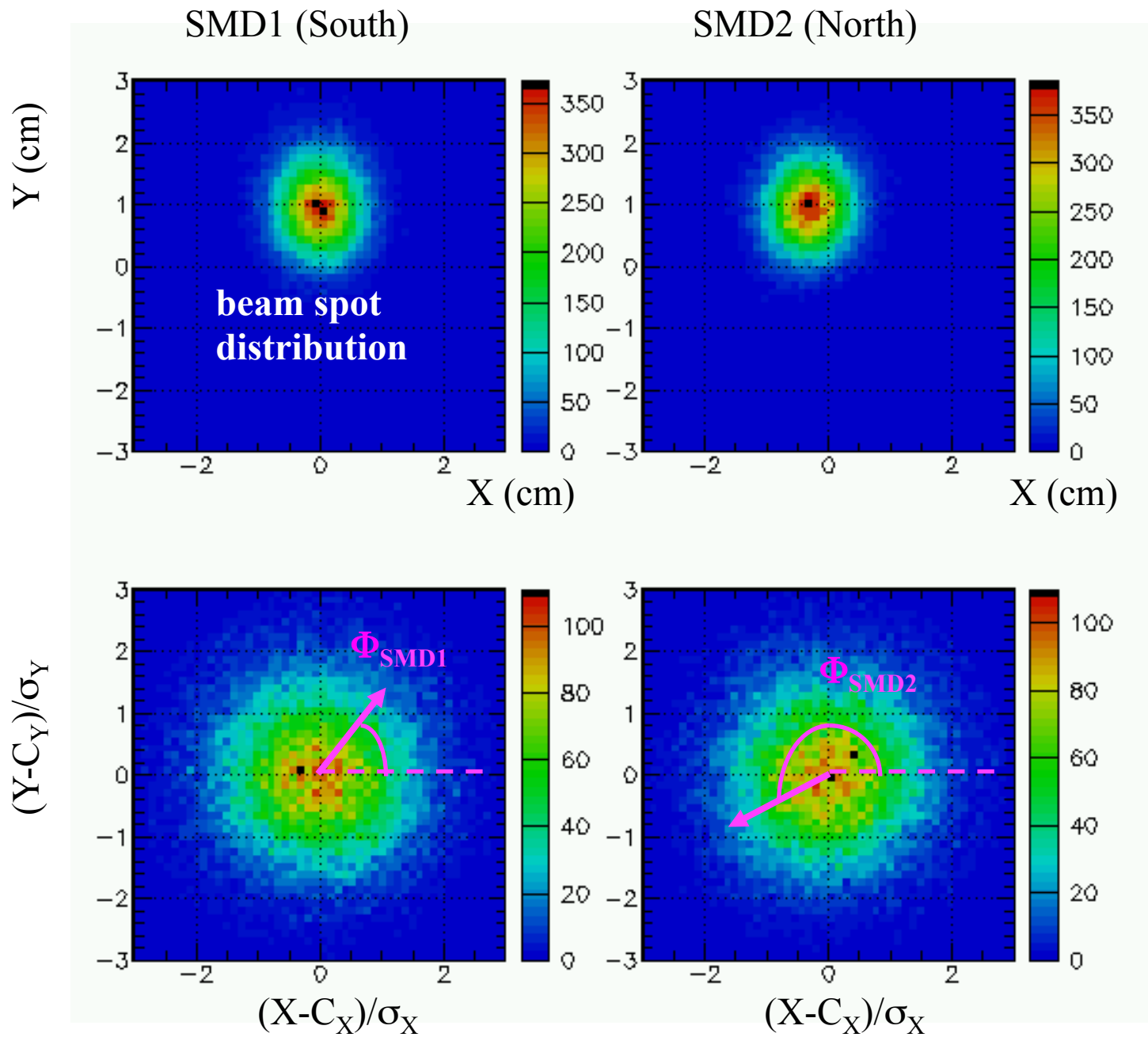
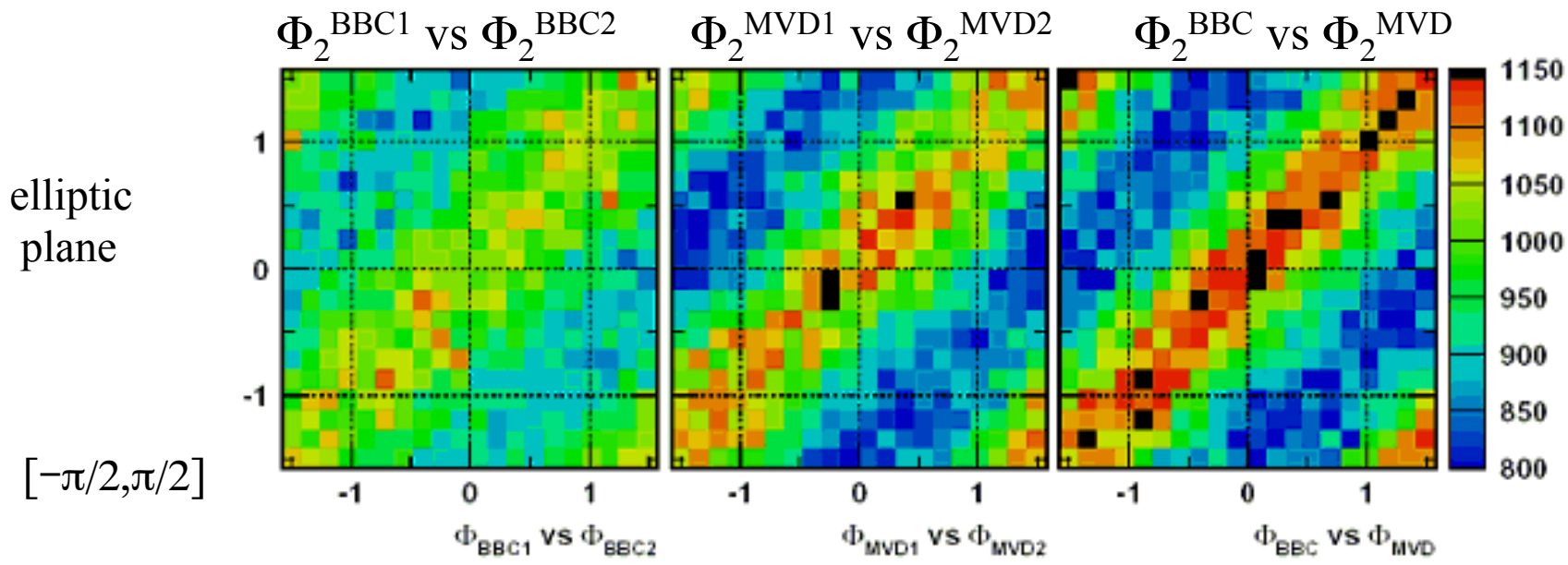
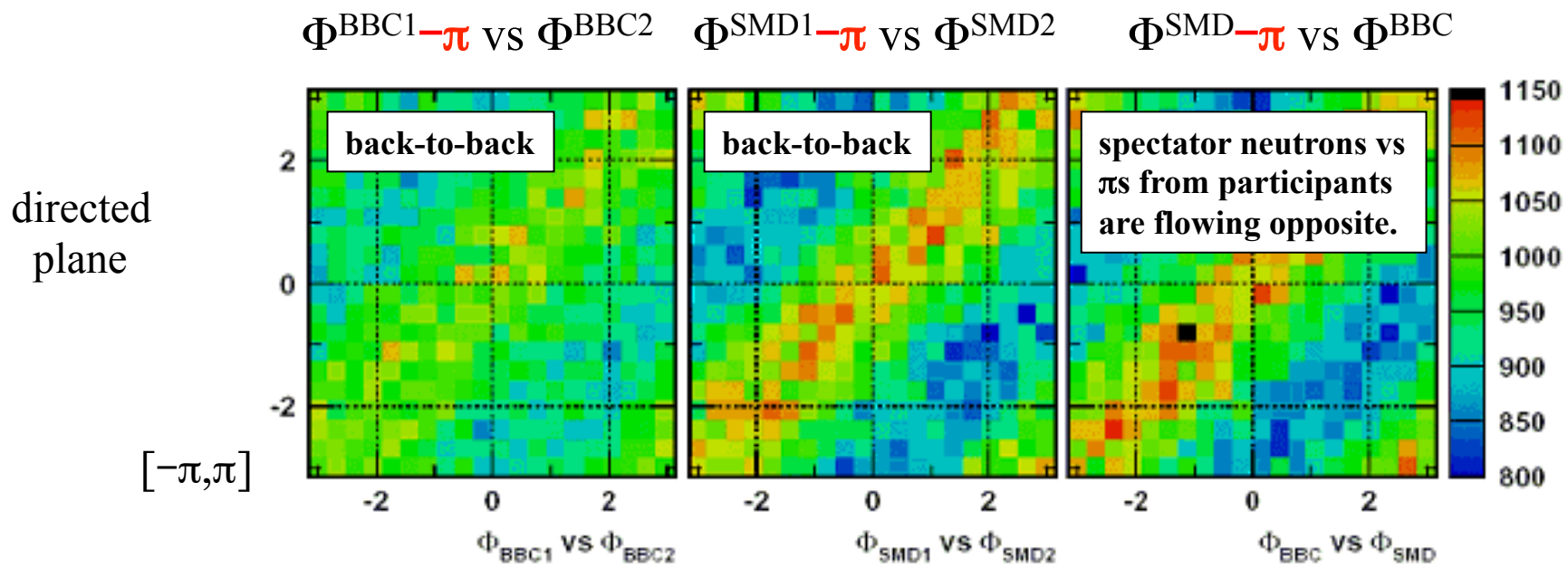
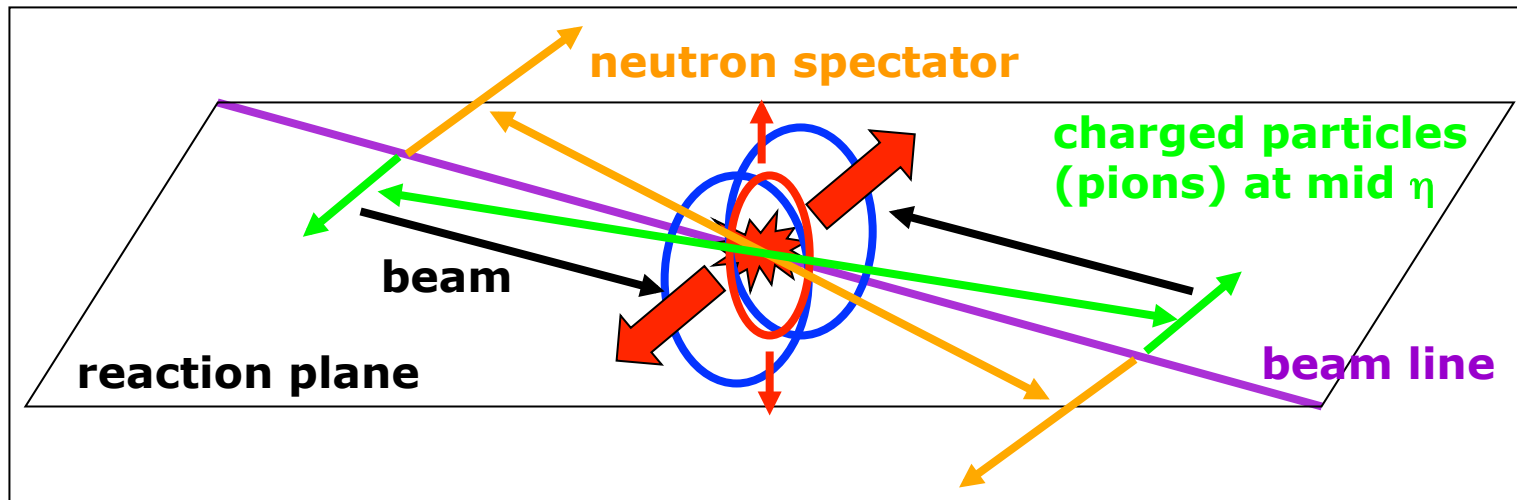


Fig. 2: Schematic drawings of elementary cell designs for VZERO-A (left) and VZERO-C rings 0-1 (right). For VZERO-C rings 2-3, two scintillating sets (scintillator and WLS fibers) are connected to a single PMT through four clear fiber beams (see Fig. 1).

PHENIX reaction plane detector / STAR reaction plane detector for BES2

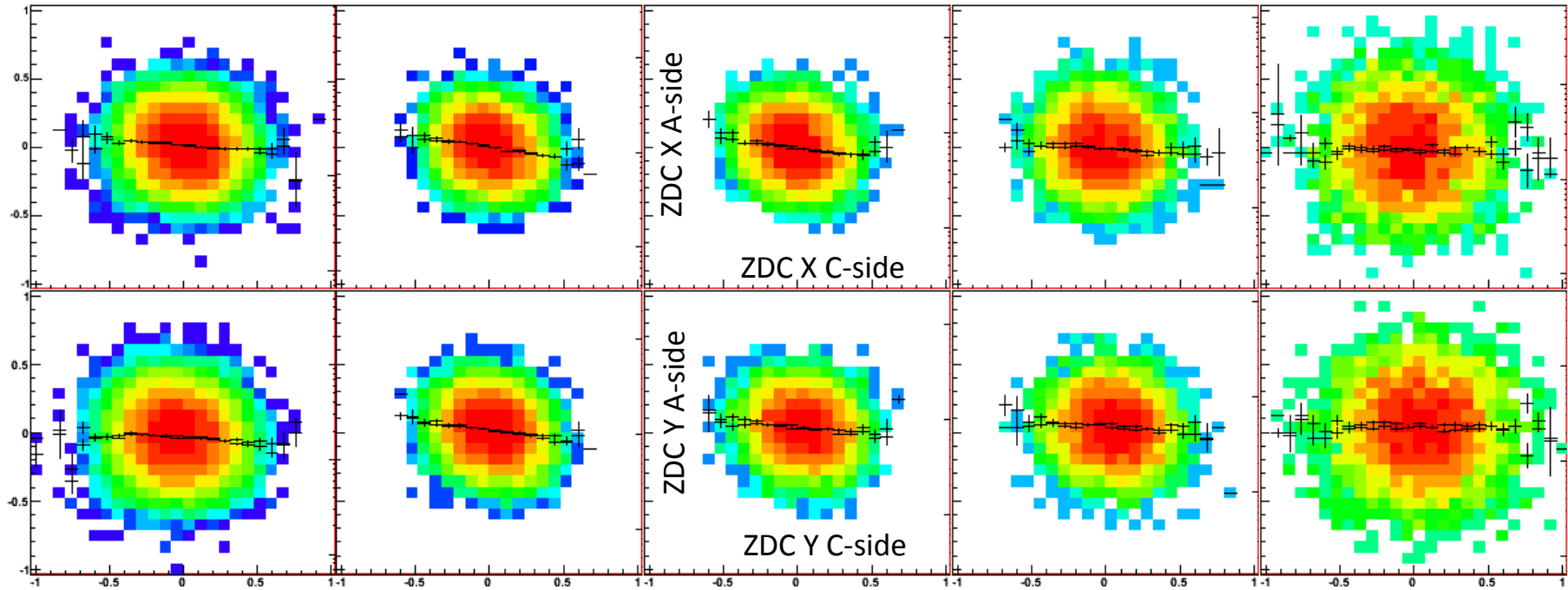






ZDC x/y position correlation between A and C side

TPC multiplicity bin

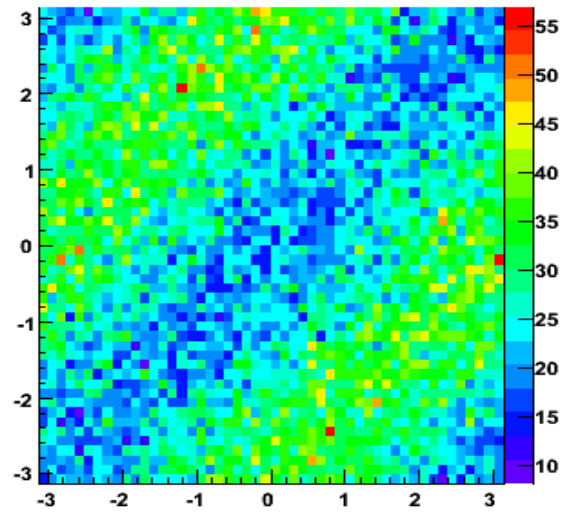


3 (-1,1)	4 (1,1)
1 (-1,-1)	2 (1,-1)

flipped x-coordinate in one(C or A) side

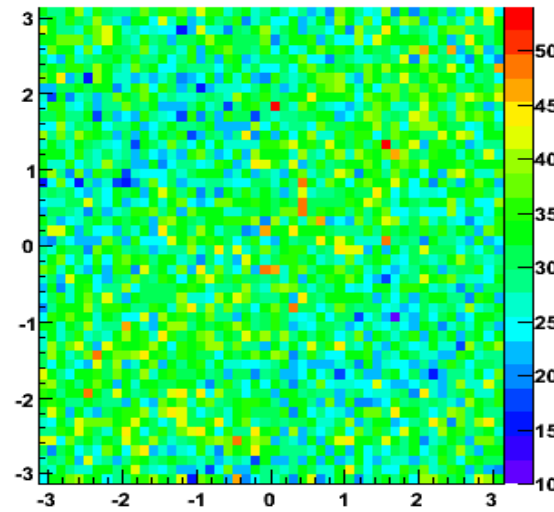
R.P. angle correlation between A and C side

ZDC(C) - ZDC(A) : dir.



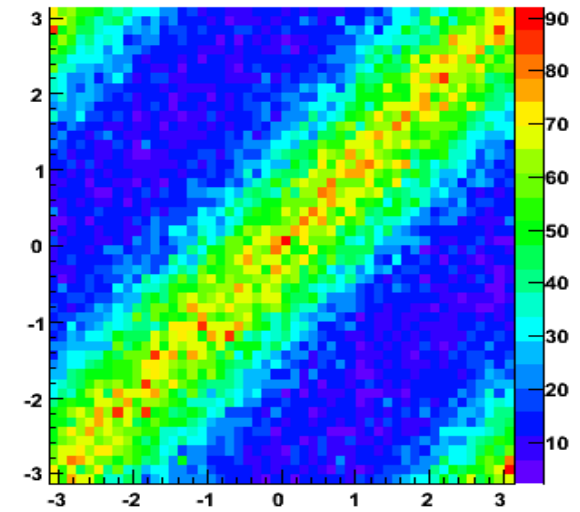
$$\Phi_{\{1\}}^{\text{ZDC(C)}} \text{ vs } \Phi_{\{1\}}^{\text{ZDC(A)}}$$

T0(C) - T0(A) : ell.



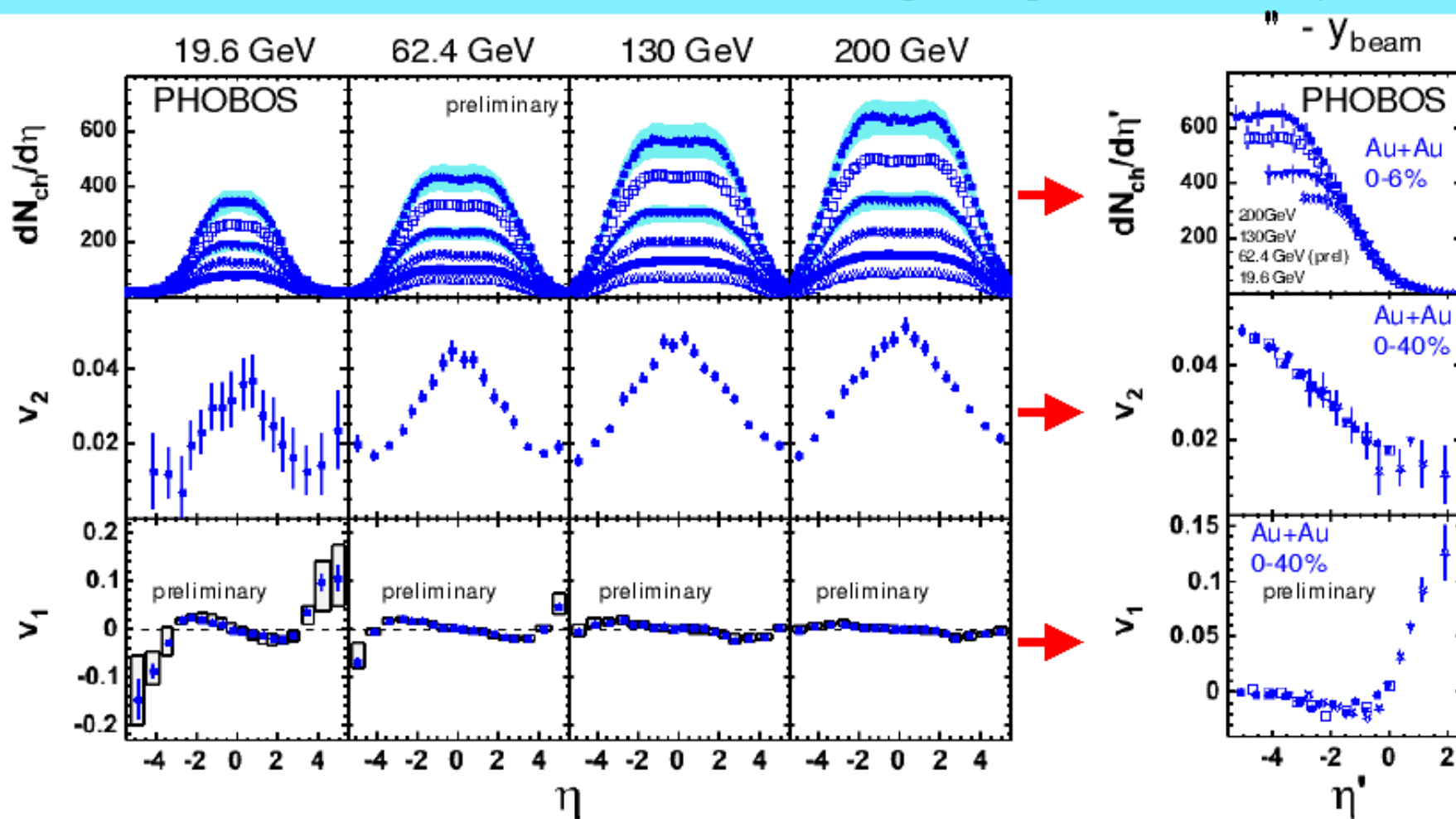
$$2 \Phi_{\{2\}}^{\text{T0(C)}} \text{ vs } 2 \Phi_{\{2\}}^{\text{T0(A)}}$$

V0(C) - V0(A) : ell.



$$2 \Phi_{\{2\}}^{\text{V0(C)}} \text{ vs } 2 \Phi_{\{2\}}^{\text{V0(A)}}$$

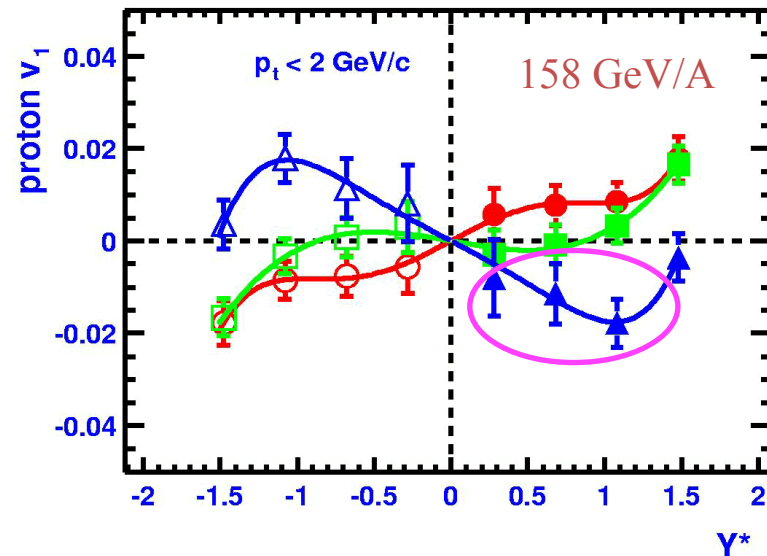
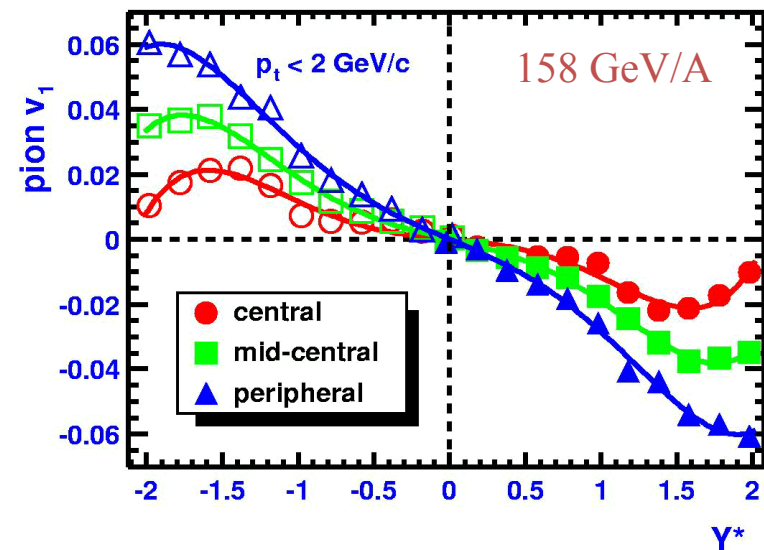
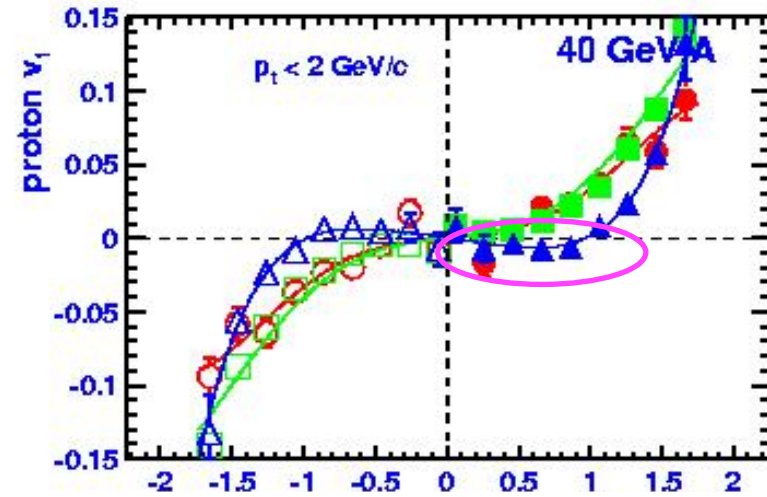
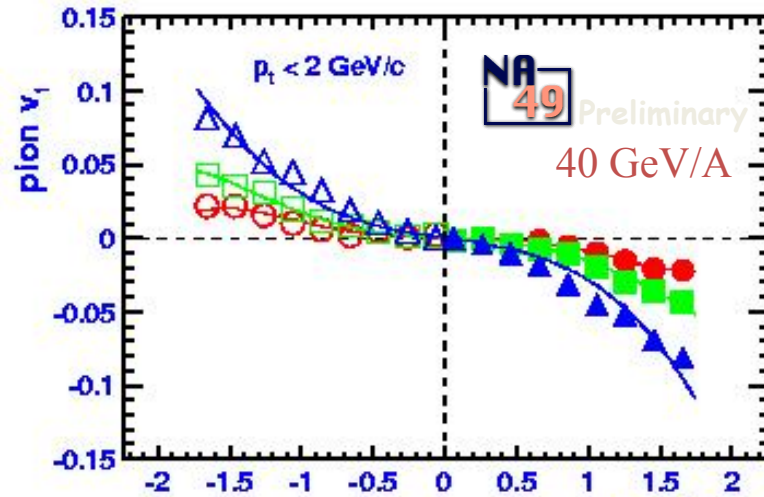
Limiting Fragmentation (Au+Au)



“Extended Longitudinal Scaling” of all longitudinal distributions

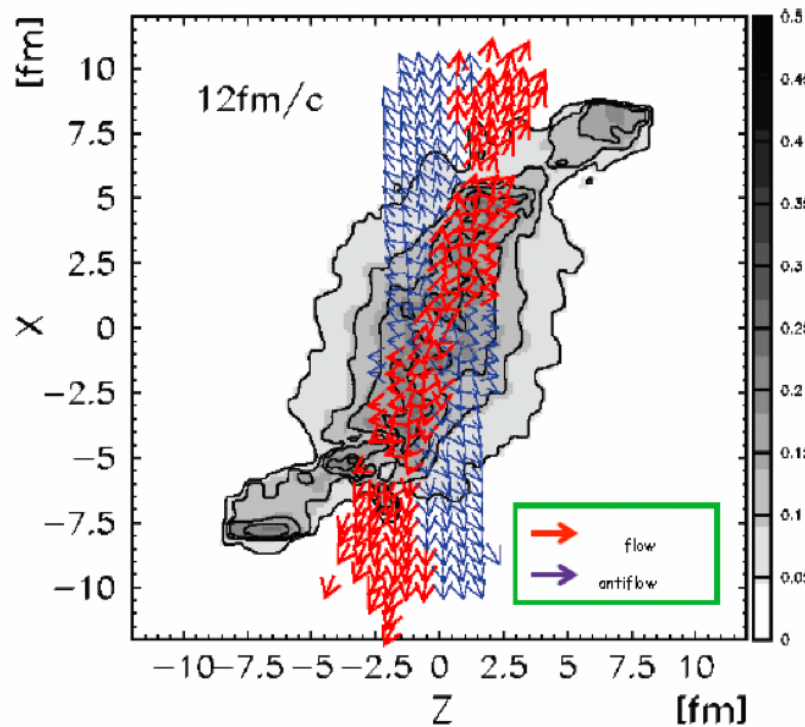
The wiggle (the 3rd flow component) is there.

A. Wetzler (NA49)



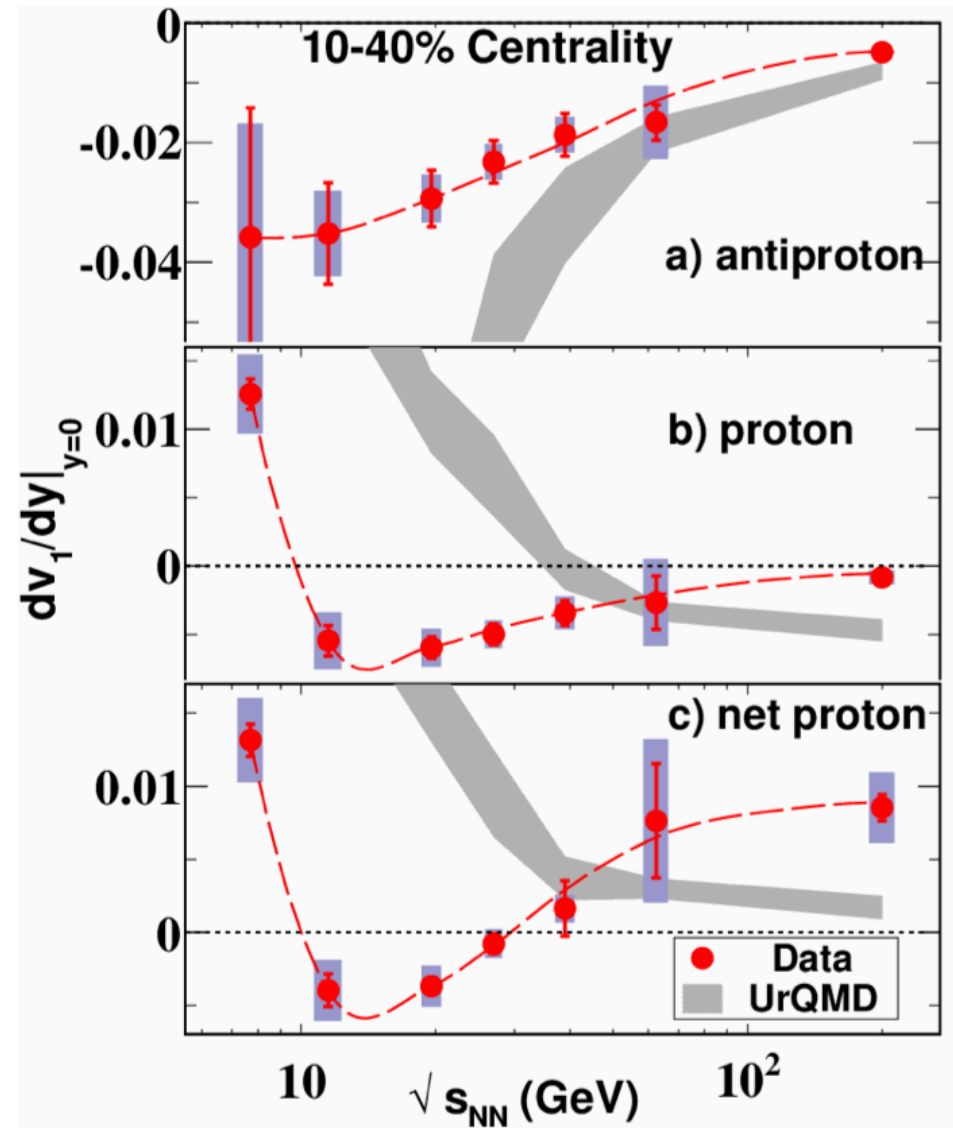
Directed flow v_1

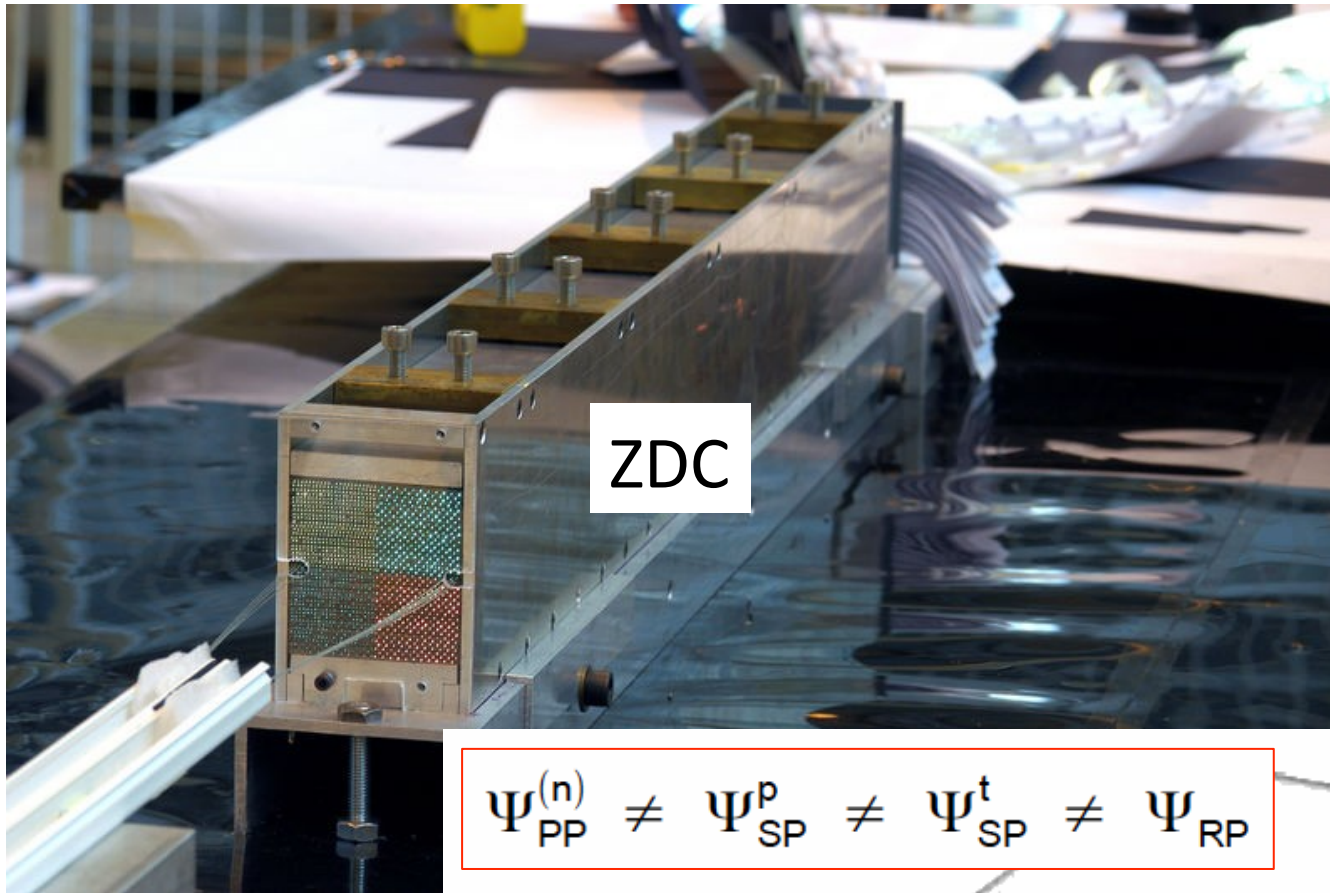
- strong anti-flow of pion (and p-bar)
- small but significant anti-flow of proton
- sign change of v_1 slope around 10GeV
- minimum around 20GeV



J. Brachmann et al., PRC 61, 24909 (2000).

PRL112, 162301(2014), arXiv:1401.3043



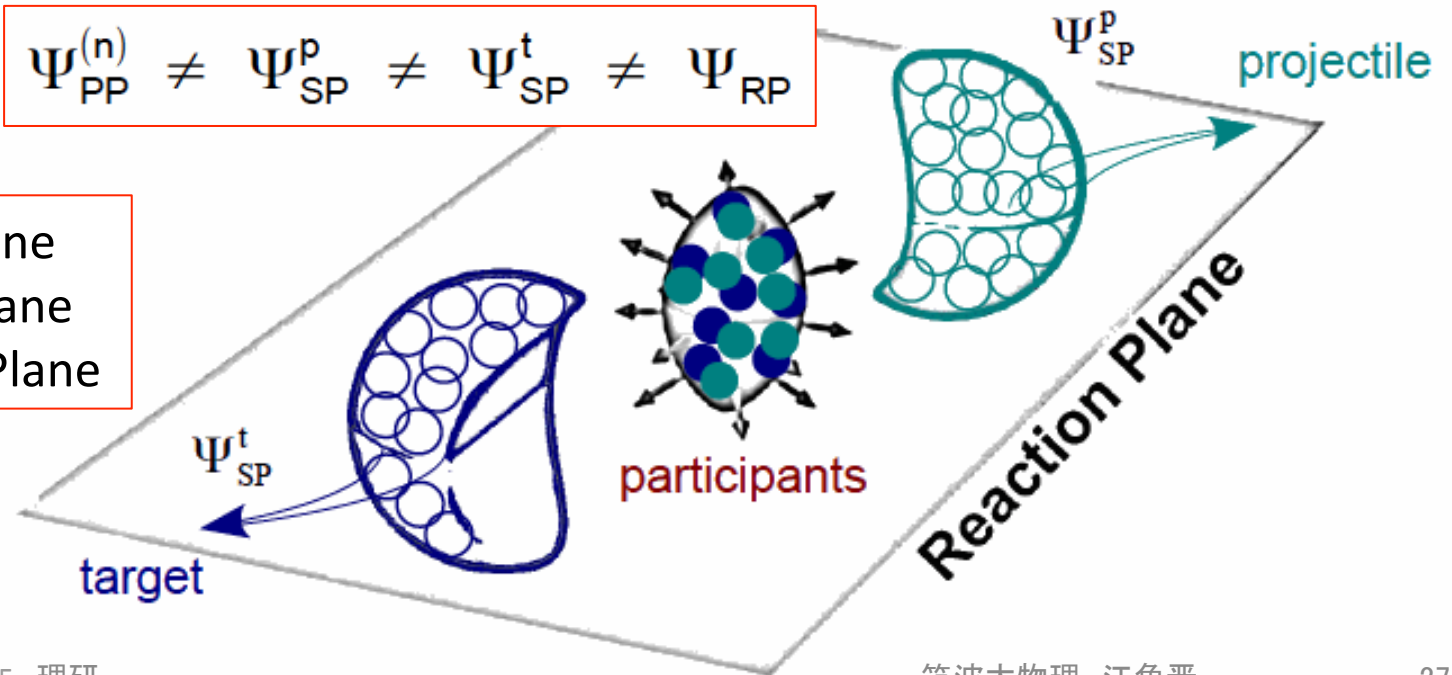


Spectator Plane from ZDC in ALICE

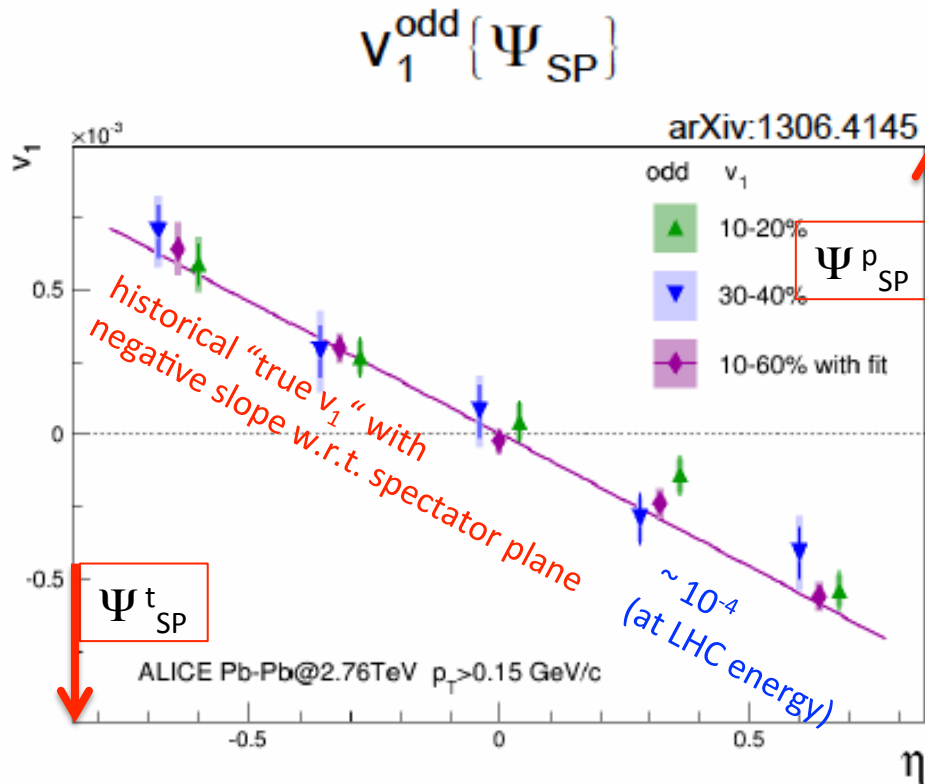
Transverse (sideward) impact from collision on spectators gives directed (v_1) plane Ψ_{SP} .

$$\Psi_{PP}^{(n)} \neq \Psi_{SP}^p \neq \Psi_{SP}^t \neq \Psi_{RP}$$

Ψ_{RP} : Reaction Plane
 Ψ_{SP} : Spectator Plane
 Ψ_{PP} : Participant Plane



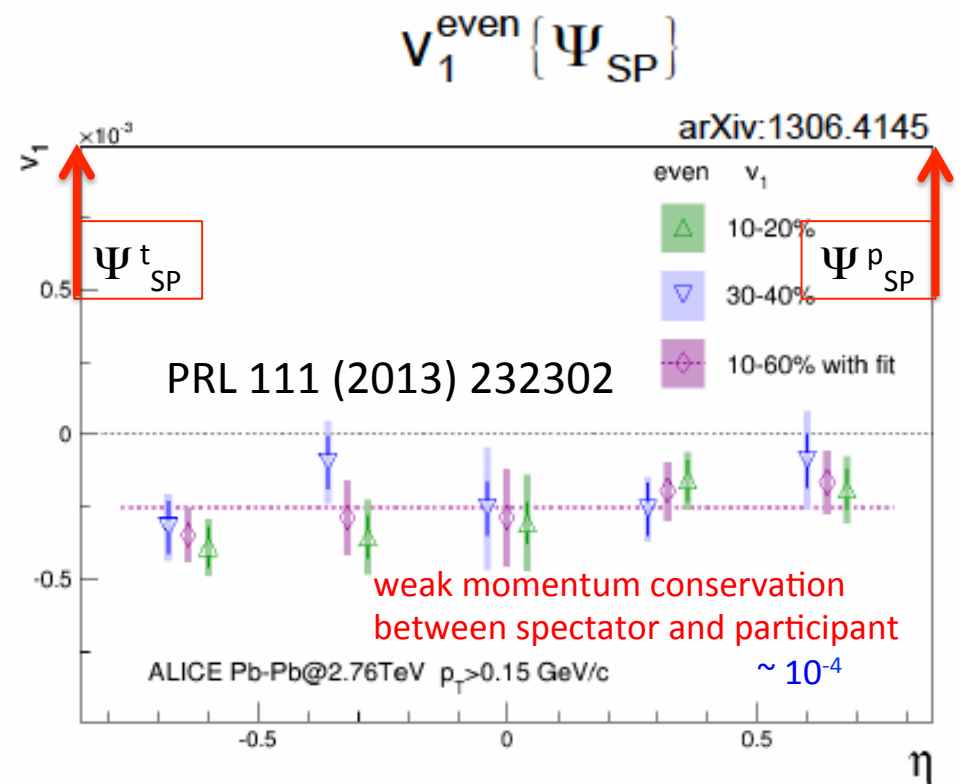
Rapidity dependence of v_1



Rapidity odd (probes flow in the reaction plane):

$$v_1^{\text{odd}}(-\eta) = -v_1^{\text{odd}}(\eta)$$

$$v_n^{\text{odd}} = \frac{1}{2} [v_1 \{ \Psi_{\text{SP}}^{\text{p}} \} + v_1 \{ \Psi_{\text{SP}}^{\text{t}} \}]$$

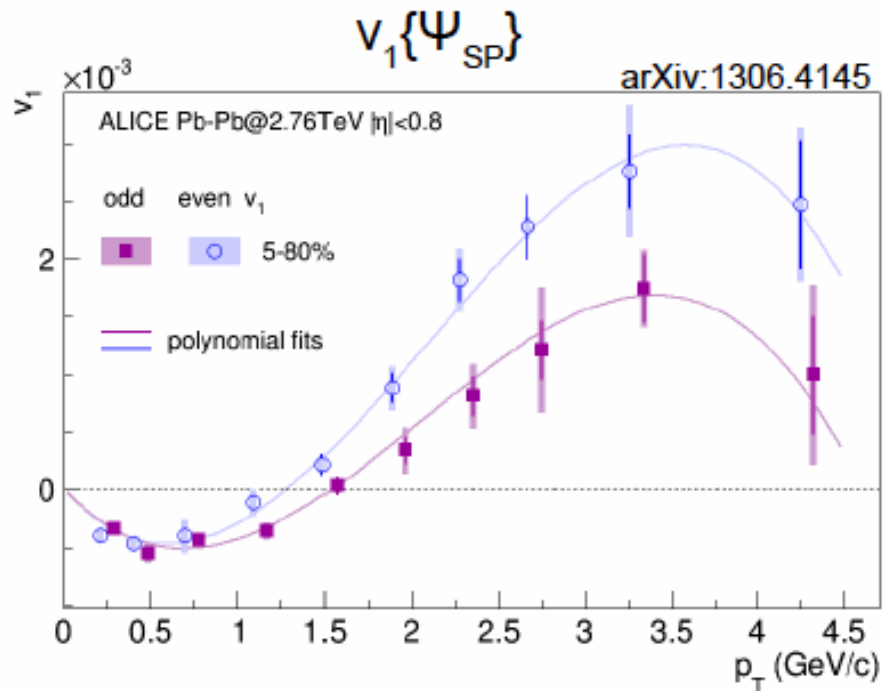


Rapidity even (sensitive to fluctuations):

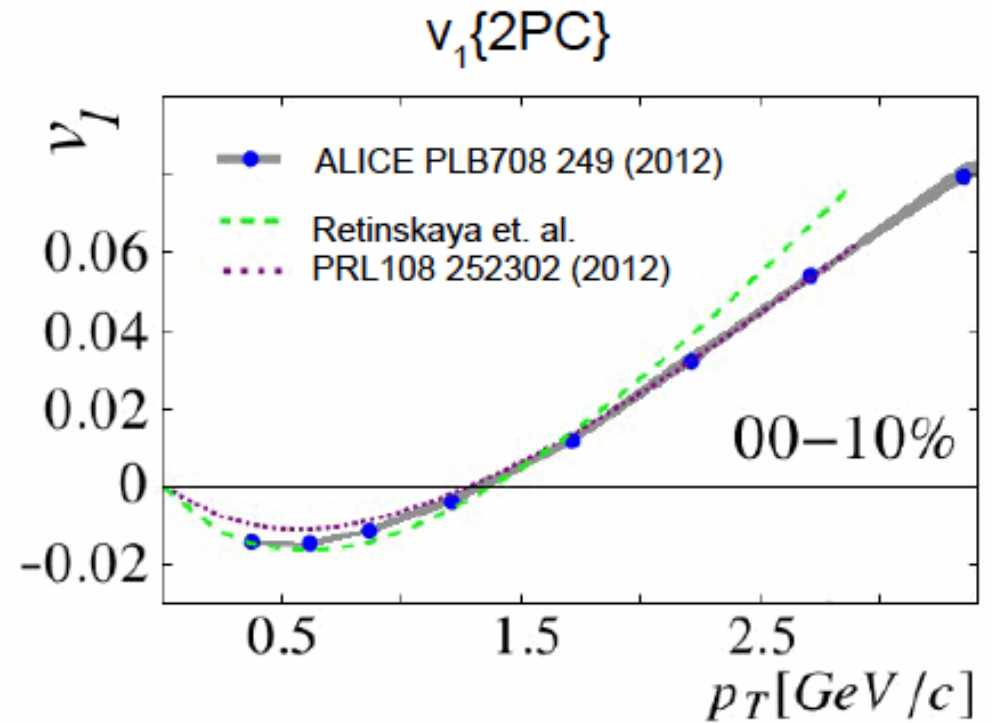
$$v_1^{\text{even}}(-\eta) = v_1^{\text{even}}(\eta)$$

$$v_n^{\text{even}} = \frac{1}{2} [v_1 \{ \Psi_{\text{SP}}^{\text{p}} \} - v_1 \{ \Psi_{\text{SP}}^{\text{t}} \}]$$

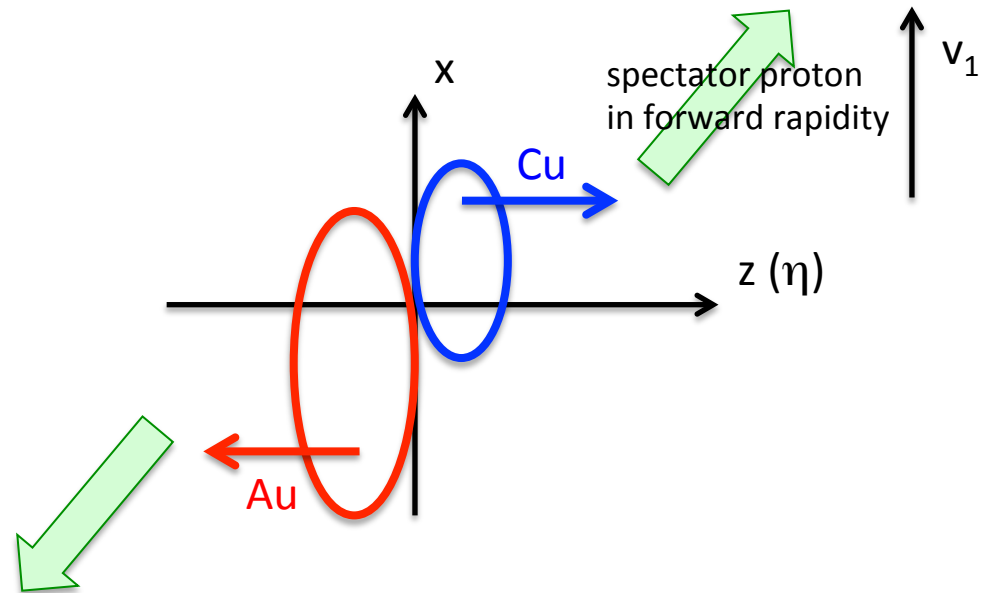
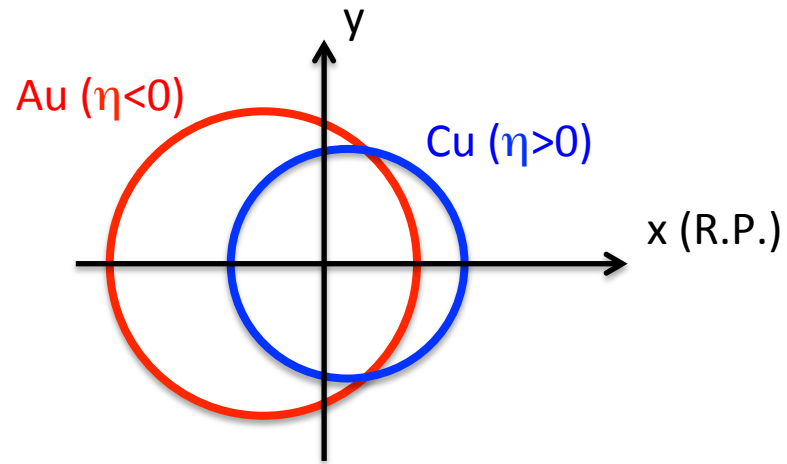
p_T dependence of v_1

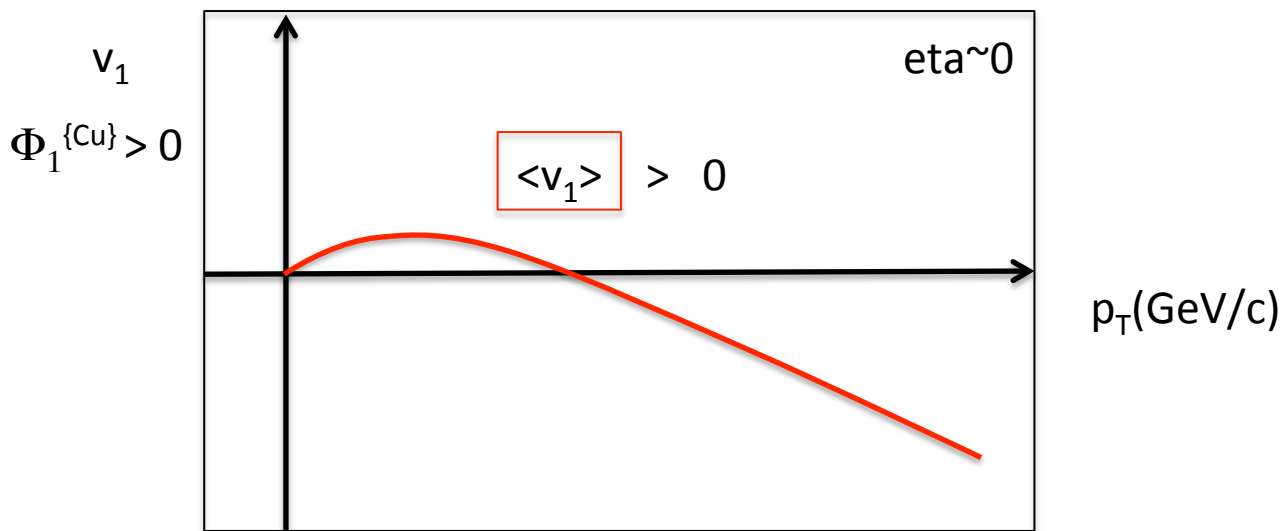
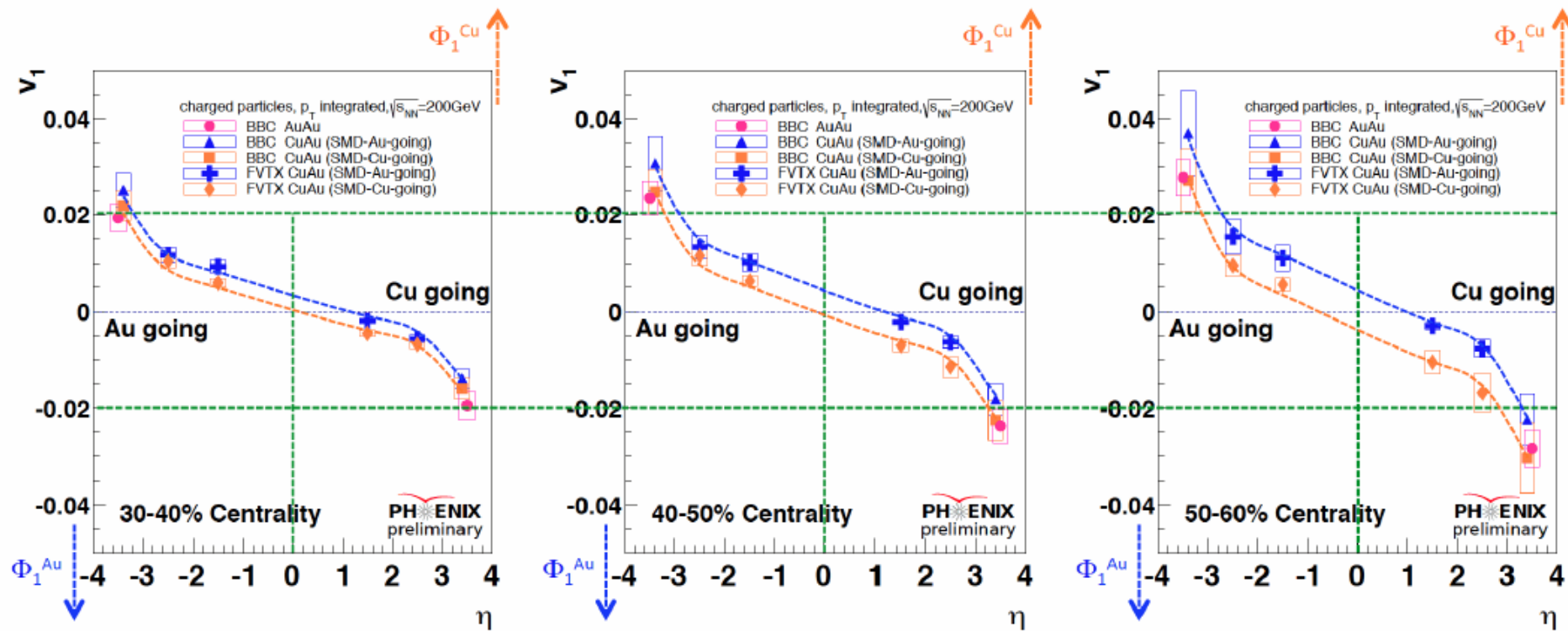


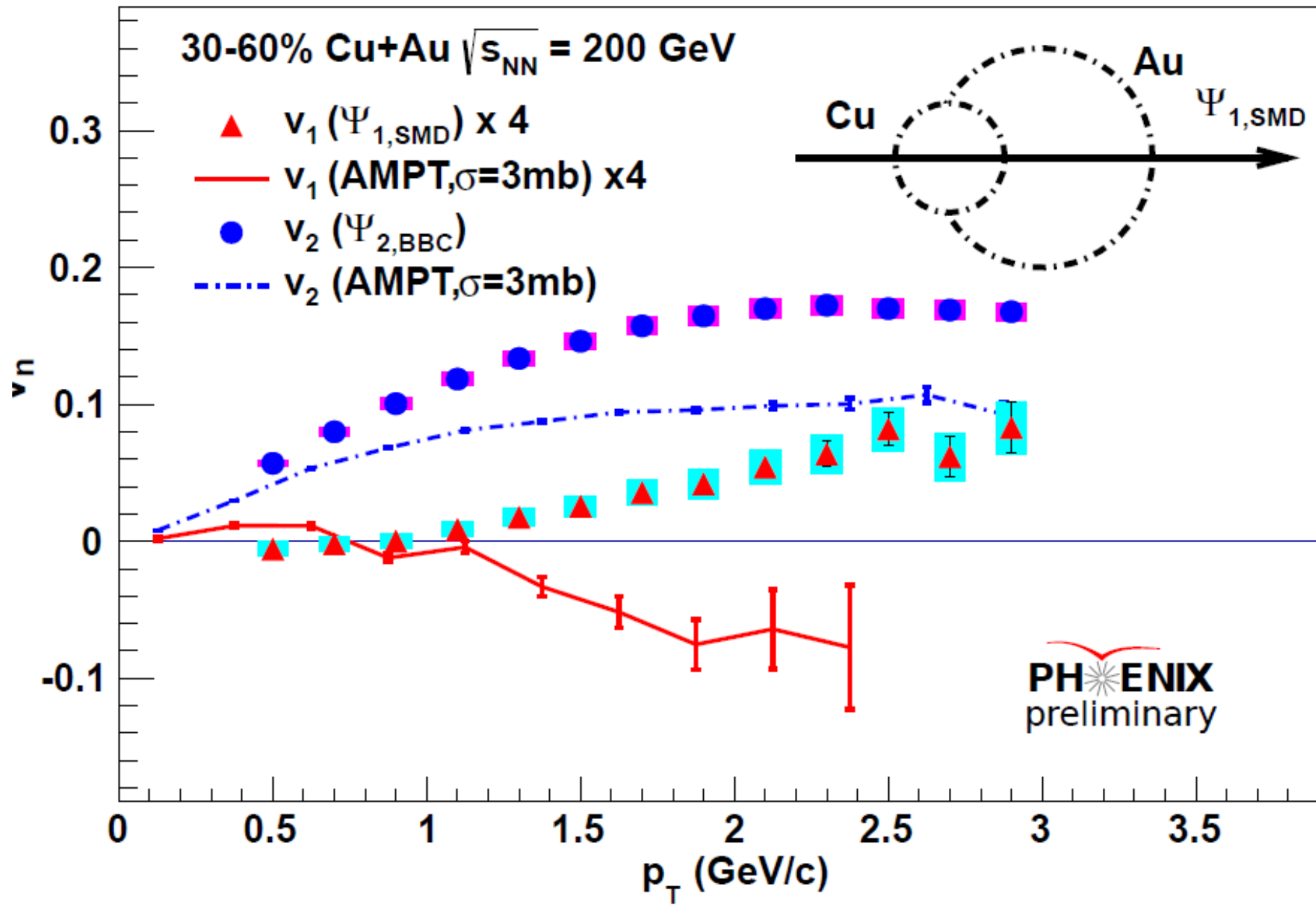
PRL 111 (2013) 232302



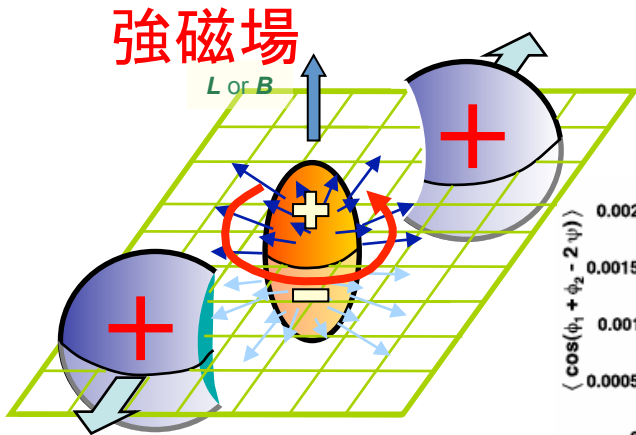
Amazing similarities of $v_1(p_T)$ shapes for these 3 cases, while $v_1\{2PC\}$ is much larger by more than factor of 10 caused by very strong momentum conservation.





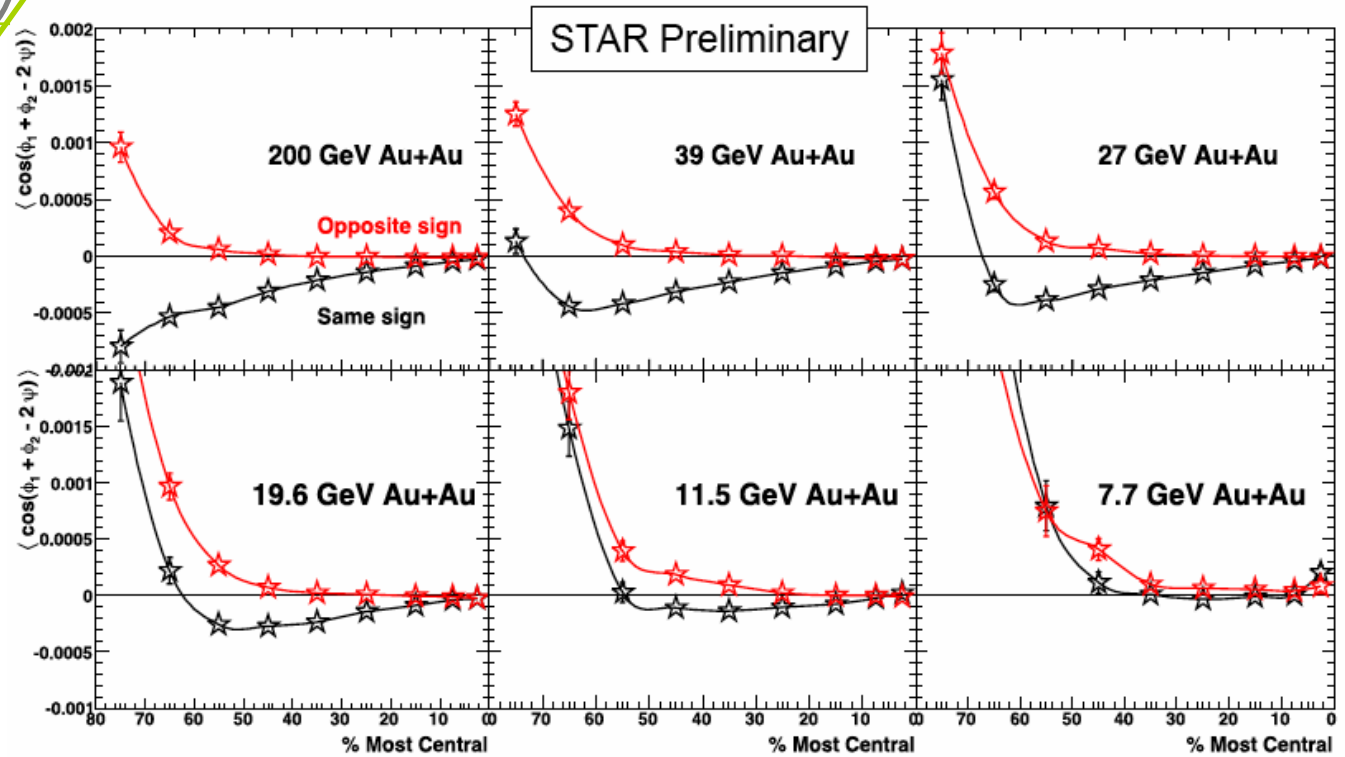
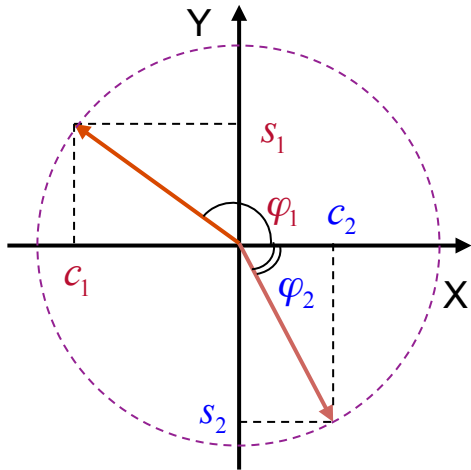


「反応平面に対する電荷非対称性」の測定 重イオン衝突による強い磁場中における QGP中の局所的パリティ非保存効果のシグナル？

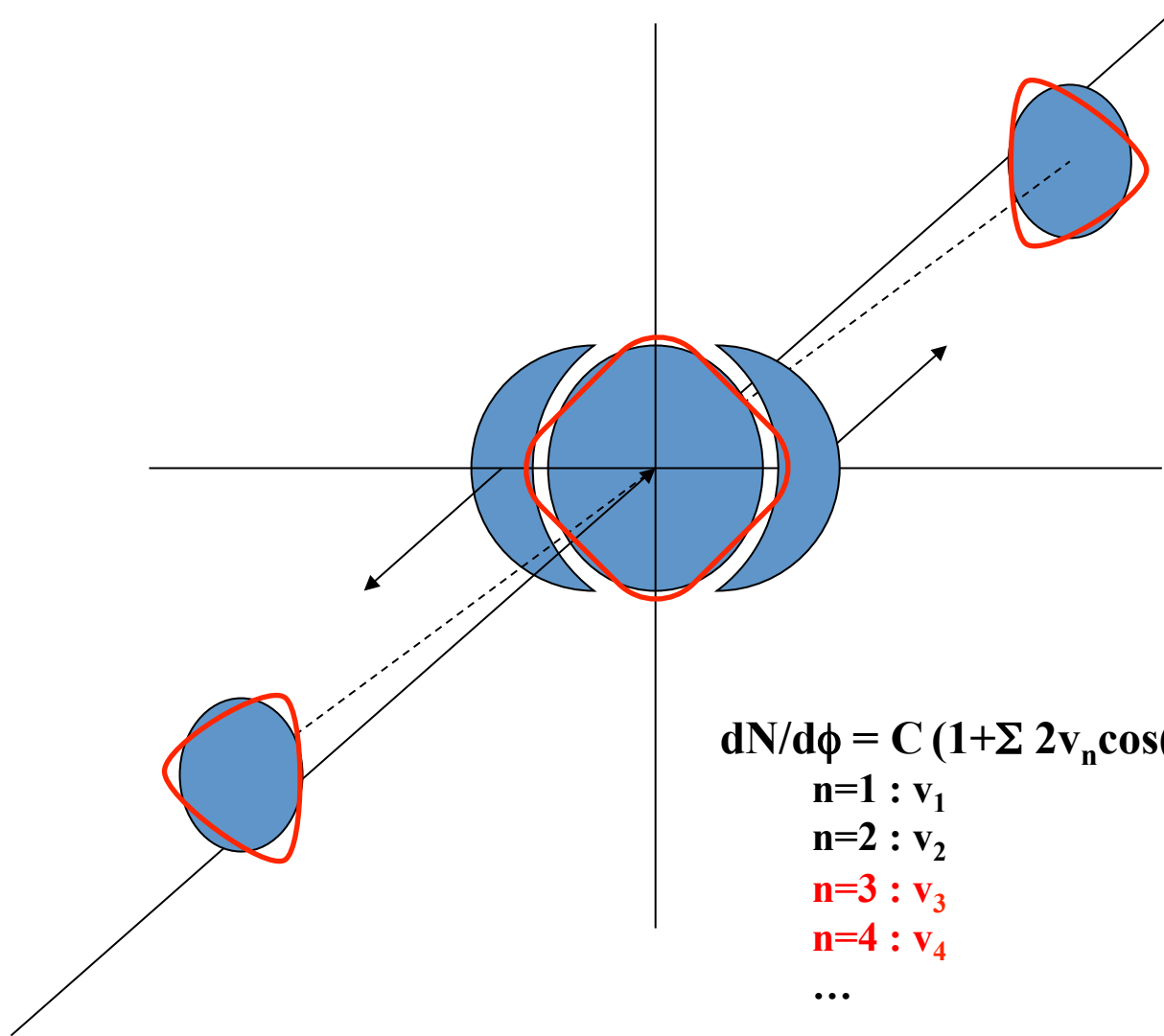


$$dN/d\phi \sim 1 + 2v_n \cos(n(\phi - \Phi)) + 2a_{+/-} \sin(\phi - \Phi) + \dots$$

$$\langle \cos(\phi_1 + \phi_2 - 2\Phi) \rangle \sim -\langle a_1 a_2 \rangle$$



STAR Preliminary, QM12

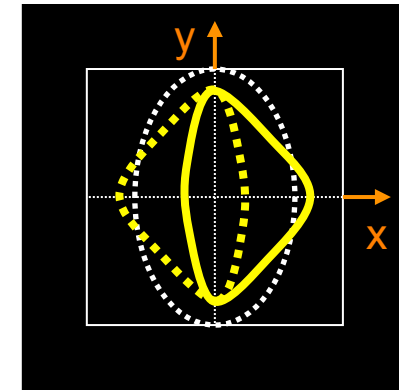
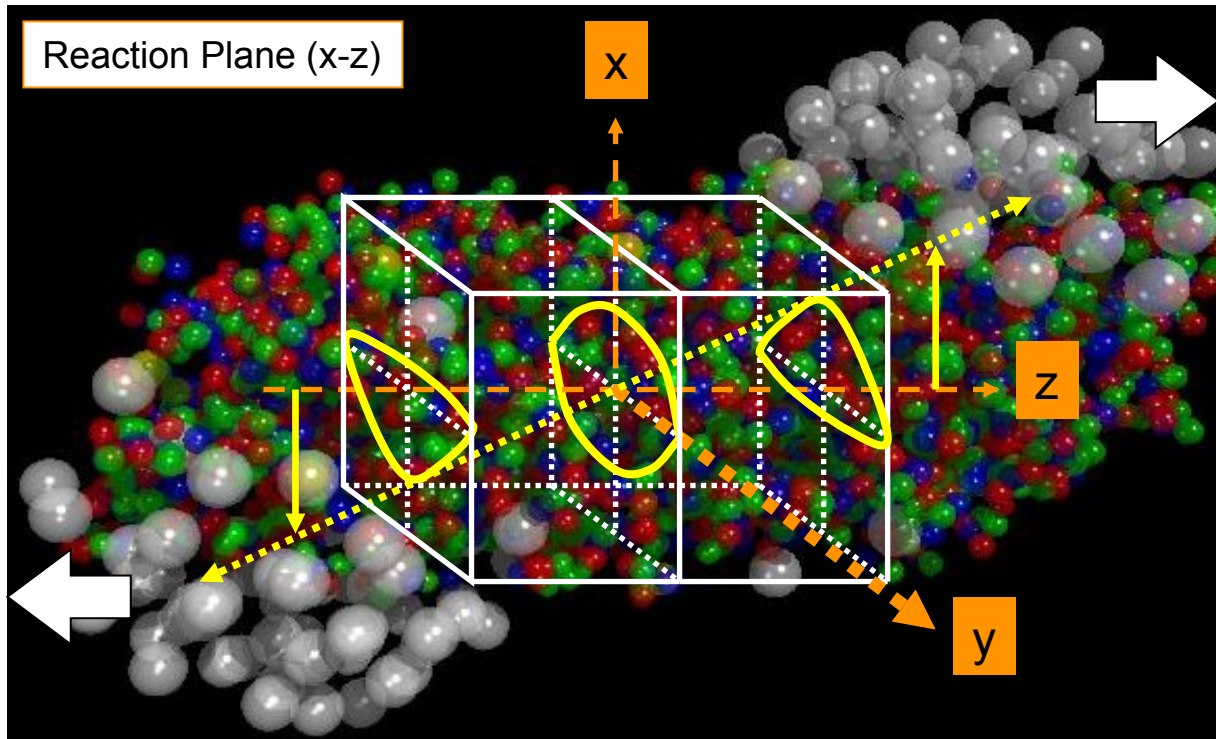


休憩

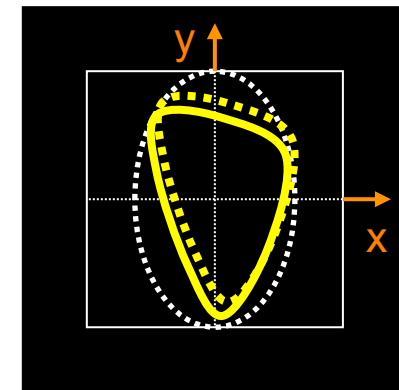
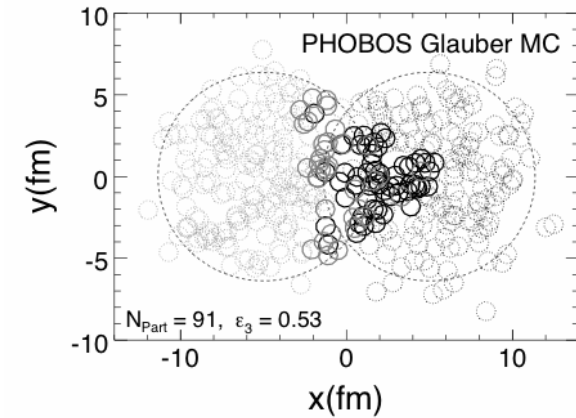
(後半は、高次異方性と粒子相関について)

Higher order event anisotropy --- v_3 ---

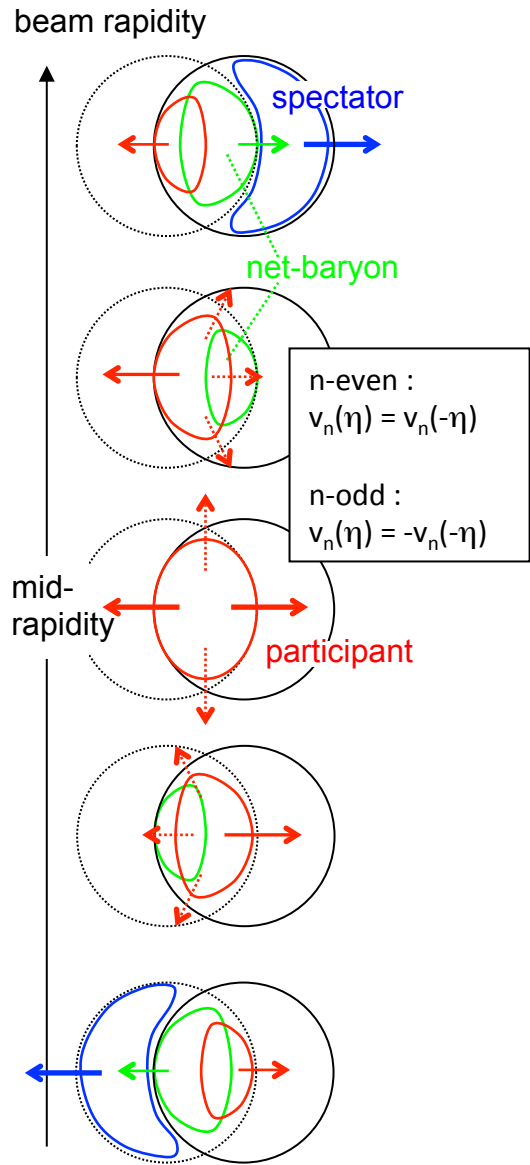
black-disk collision, sign-flipping v_3 like v_1
 initial geometrical fluctuation, no-sign-flipping v_3



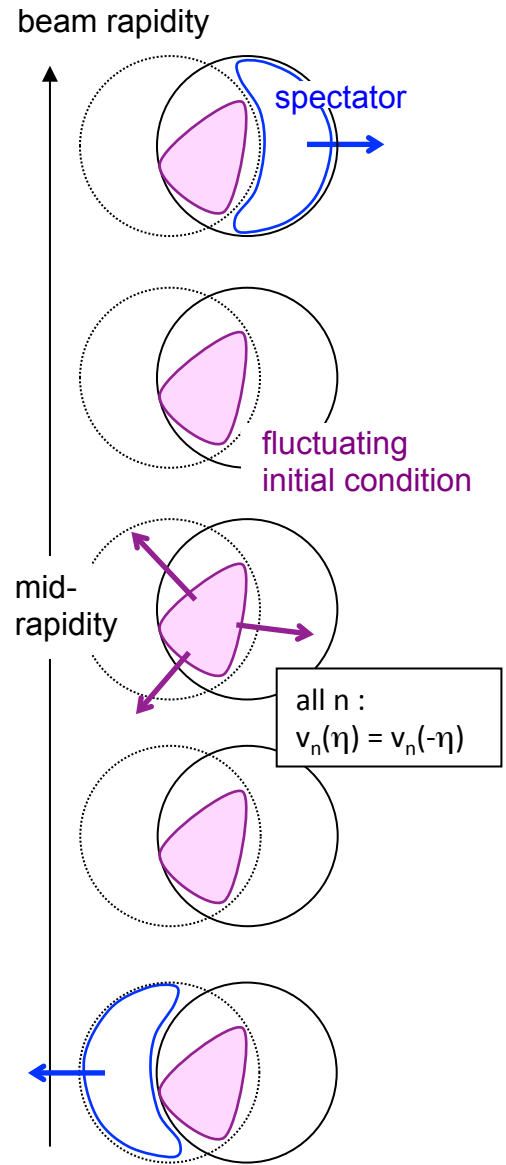
arXiv:1003.0194



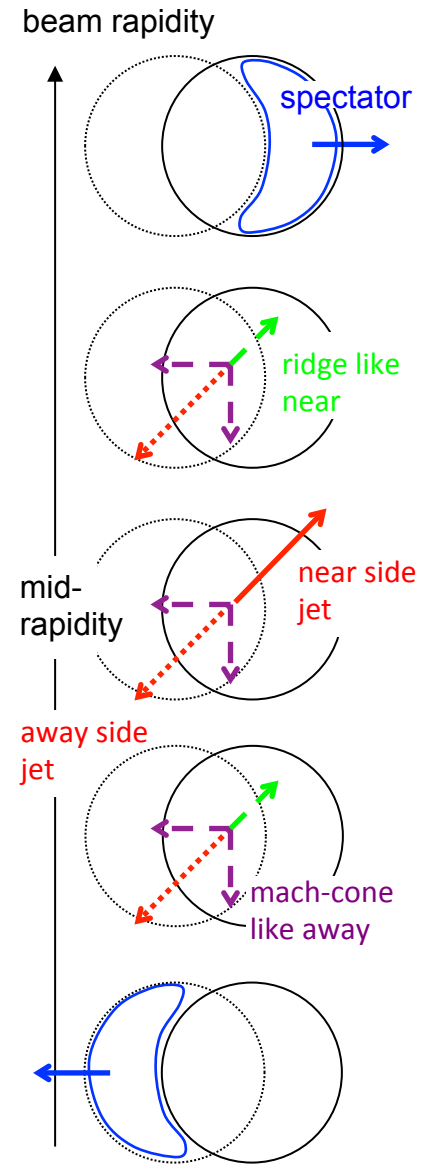
case1



case2

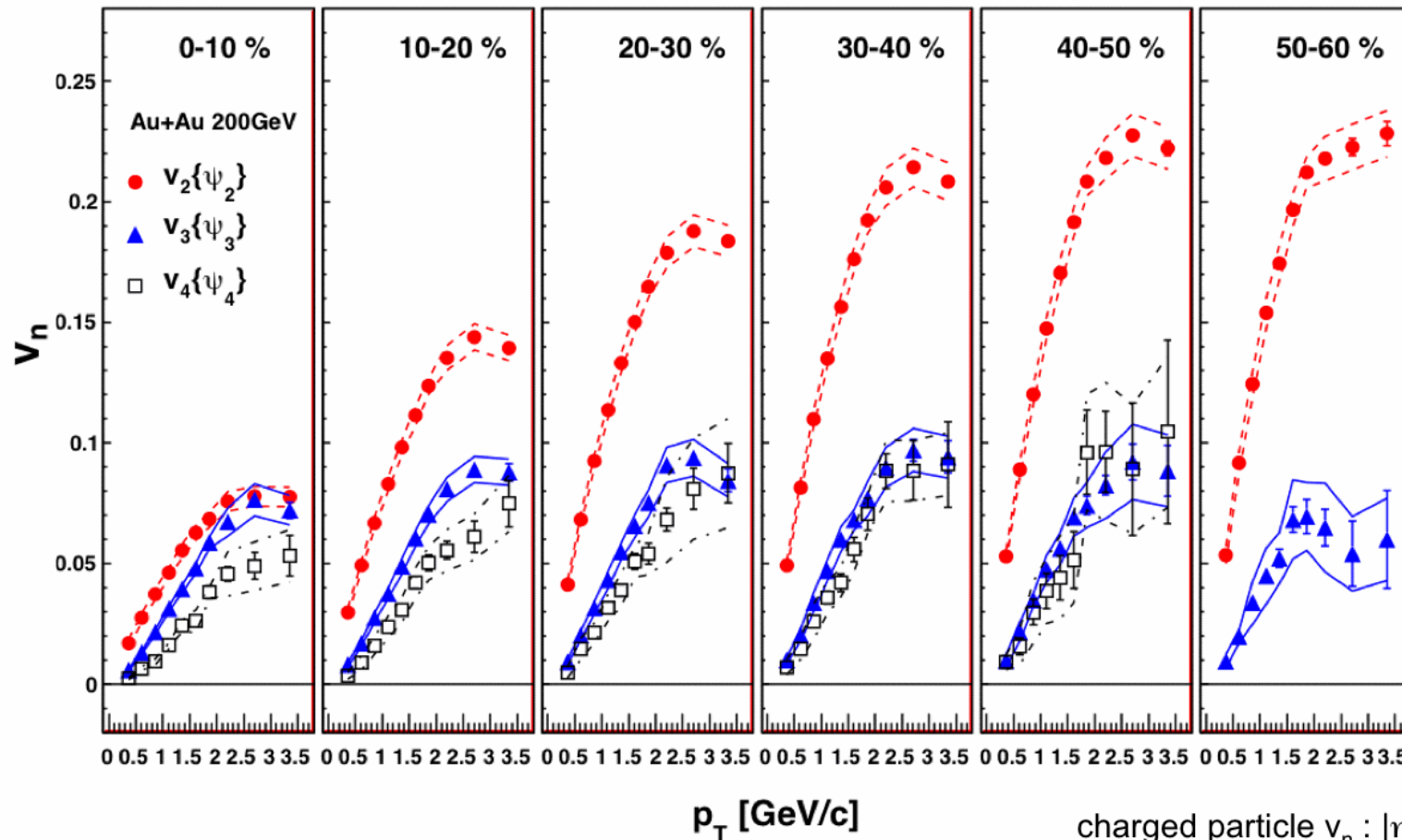


case3



$v_2\{\Phi_2\}$, $v_3\{\Phi_3\}$, $v_4\{\Phi_4\}$ at 200GeV Au+Au

arXiv:1105.3928



- (1) v_3 is comparable to v_2 at 0~10%
- (2) weak centrality dependence on v_3
- (3) $v_4\{\Phi_4\} \sim 2 \times v_4\{\Phi_2\}$

charged particle v_n : $|\eta| < 0.35$
 reaction plane Φ_n : $|\eta| = 1.0 \sim 2.8$

All of these are consistent with initial fluctuation.

Event plane (E.P.) method

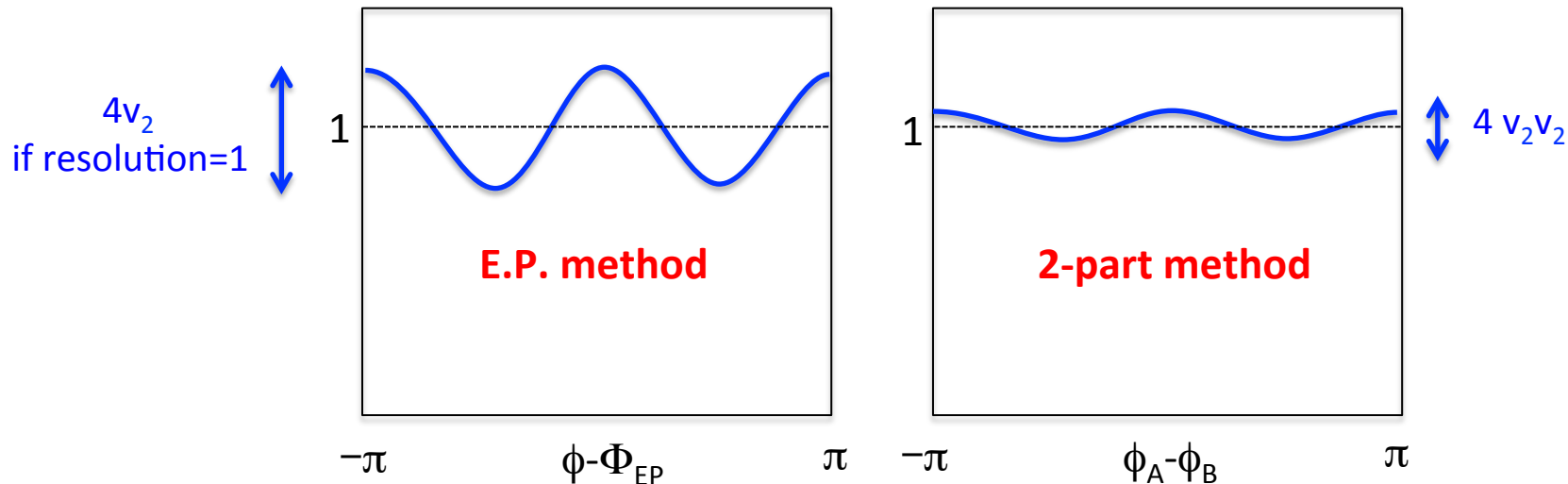
$$F(x) = 1 + \sum [2 p_n \cos(n x)]$$

$$\begin{aligned} v_n^{\text{Measured}} &= \langle \cos n(\phi - \Phi_{EP}) \rangle \\ &= \langle \cos n(\phi - \Phi_{RP}) \rangle \langle \cos n(\Phi_{RP} - \Phi_{EP}) \rangle \\ &= v_n^{\text{True}} \times \text{resolution}_{(n\text{-th order})} \end{aligned}$$

2-particle correlation method

$$\begin{aligned} p_n^{\{2\text{-part}\}} &= \langle \cos n(\phi_A - \Phi_{RP}) \rangle \langle \cos n(\phi_B - \Phi_{RP}) \rangle \\ &= v_n^{\{A\}} \times v_n^{\{B\}} \end{aligned}$$

- Rapidity-gap
- Scaler Product (S.P.) method
- 2(4,6,8,) particle cumulant
- Lee Yang Zero



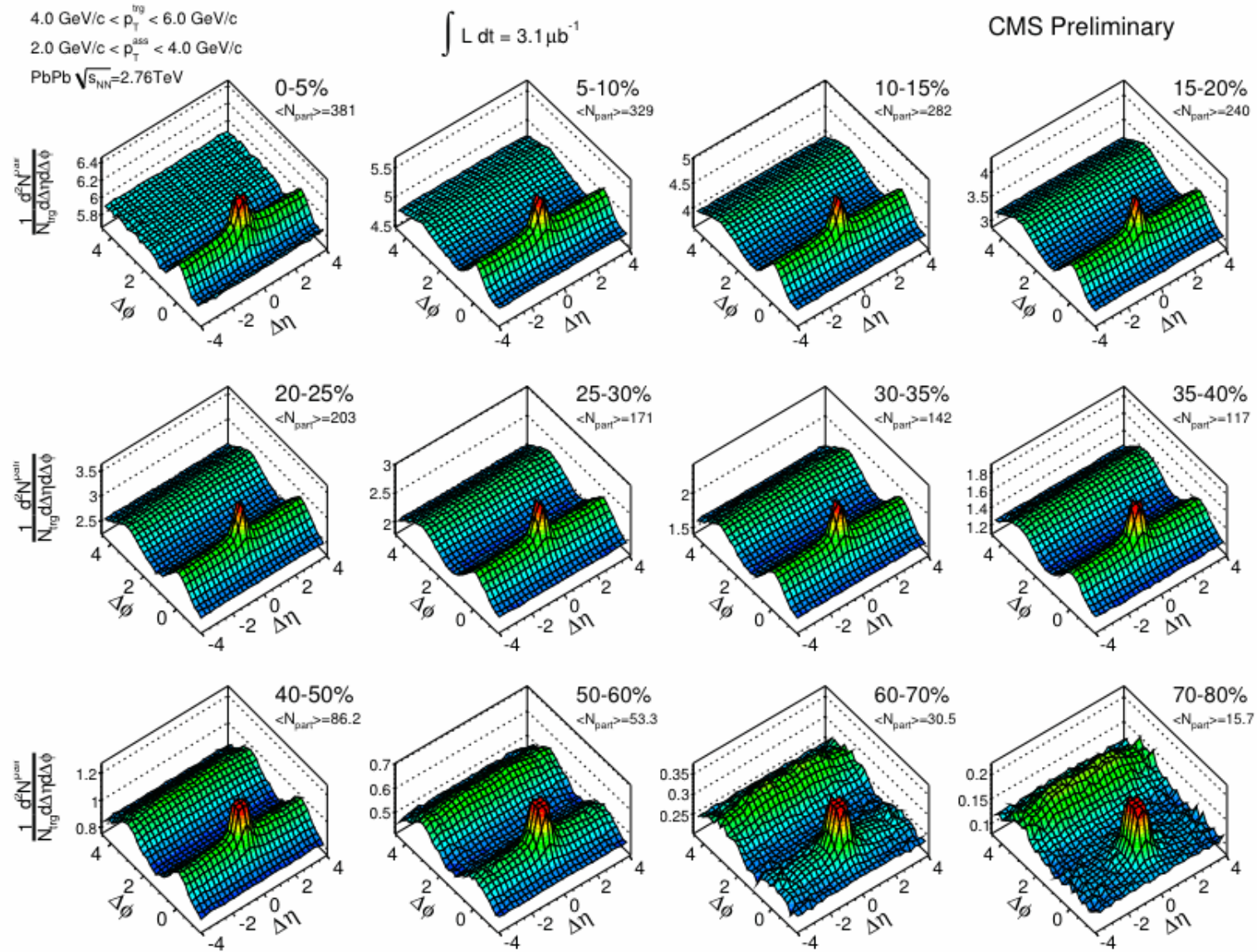
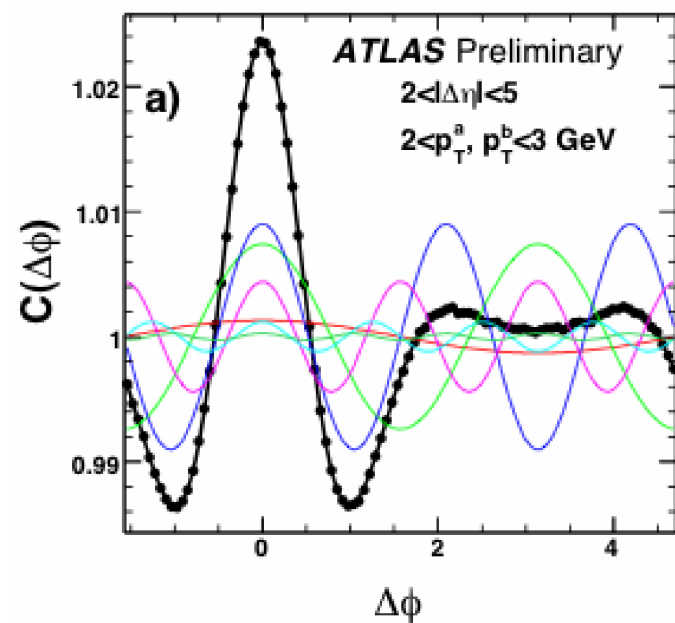
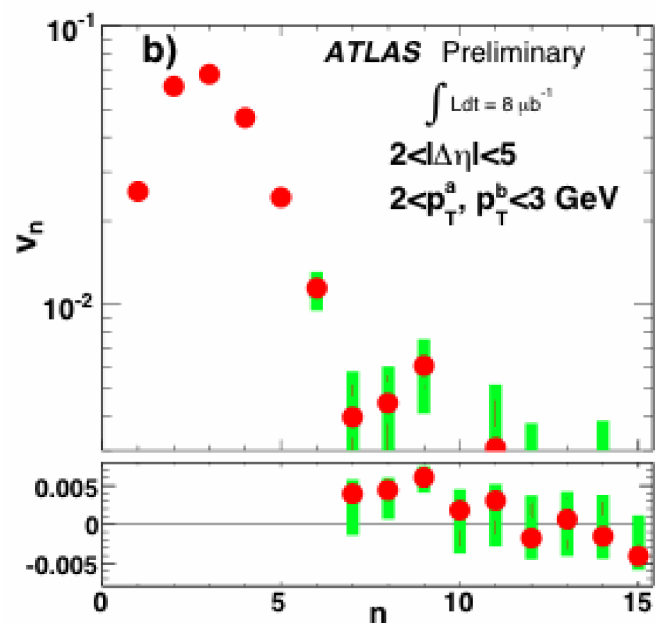
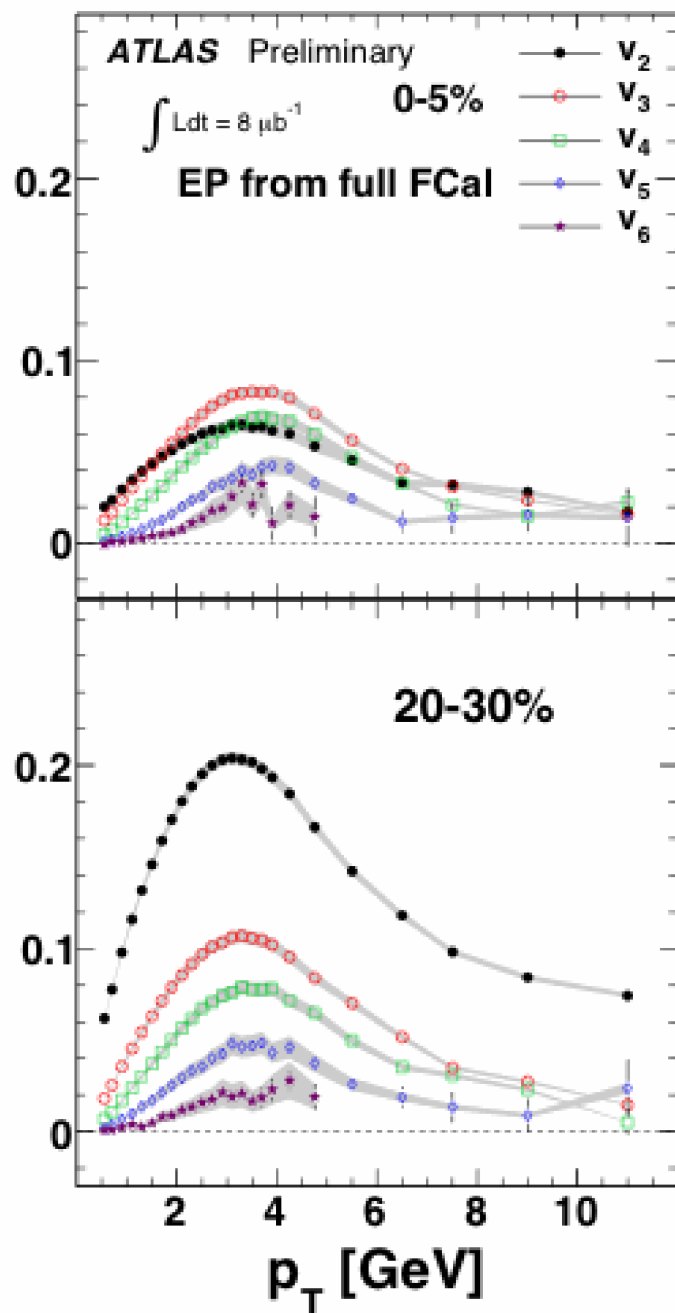
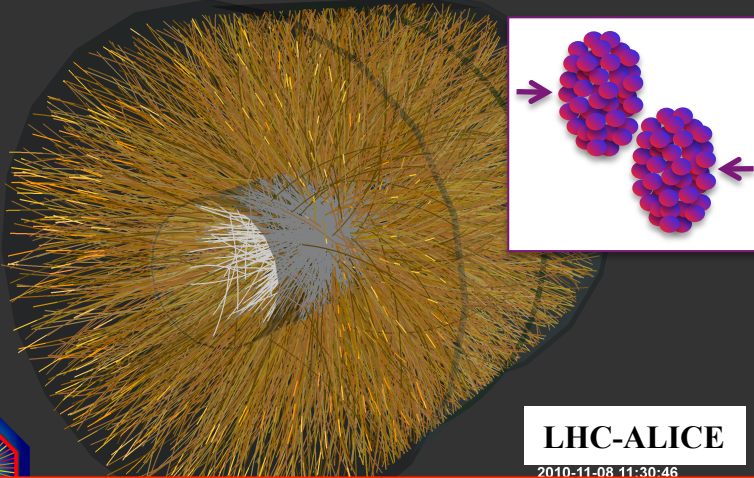


Figure 5: Two-dimensional (2-D) per-trigger-particle associated yield of charged hadrons as a function of $\Delta\eta$ and $\Delta\phi$ for $4 < p_T^{\text{trig}} < 6$ GeV/c and $2 < p_T^{\text{assoc}} < 4$ GeV/c in 12 centrality classes of PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV. The centrality labeling is such that 0-5% is the most central five percent of PbPb collisions.

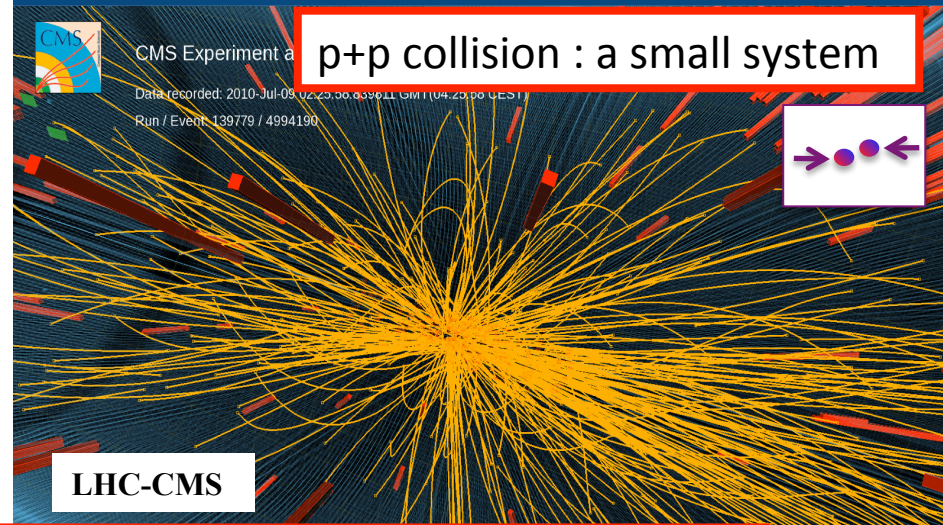


A+A collision : a large system

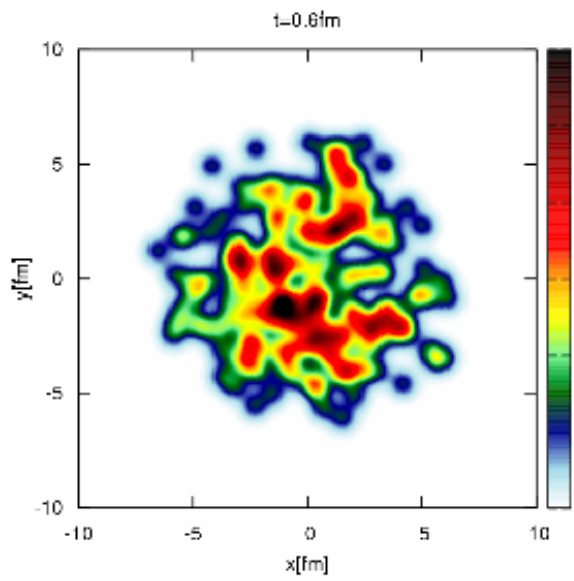


Results from High Multiplicity pp

p+p collision : a small system

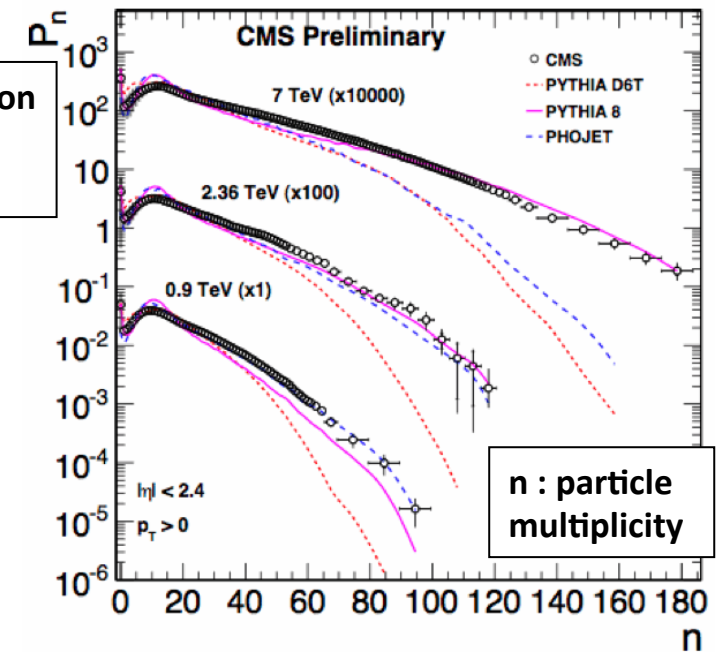


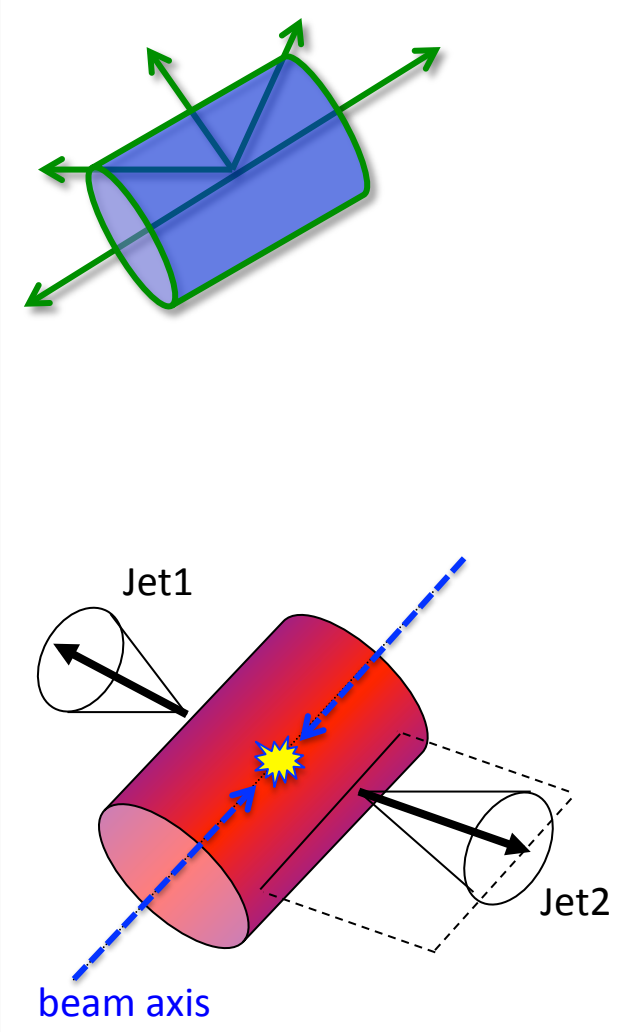
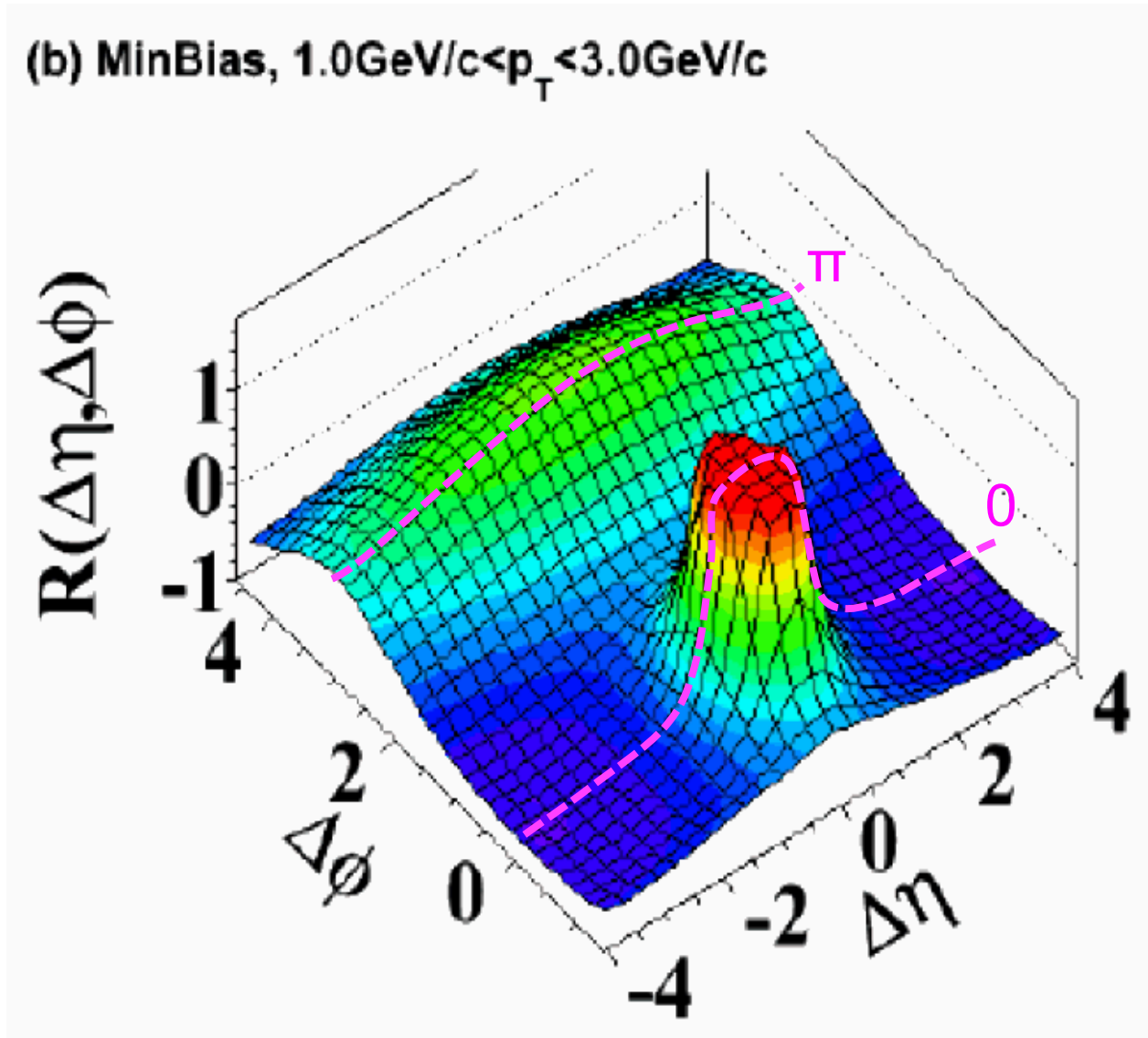
high temperature and density system <---> small and high multiplicity system



Probability distribution of event with "n" particles production

estimated initial energy density distribution in central A+A collision

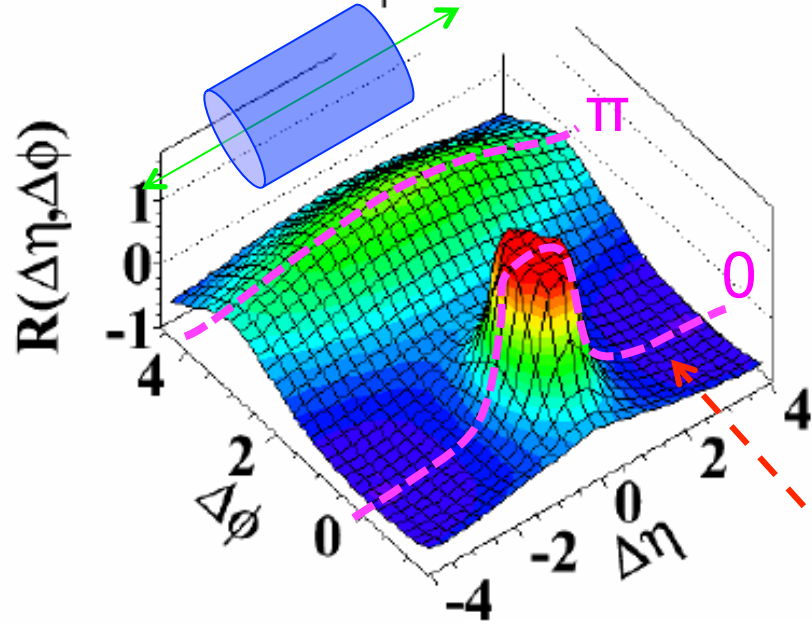




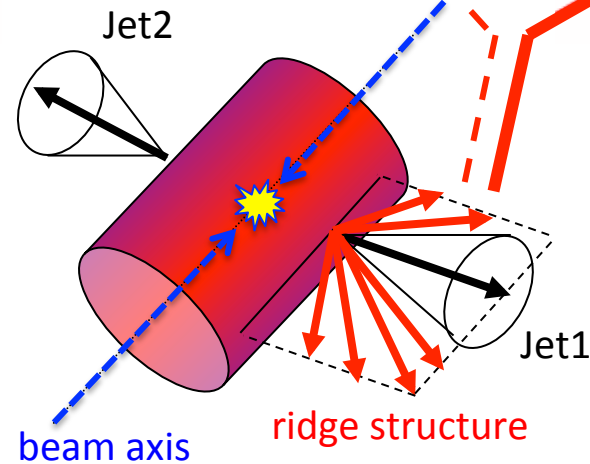
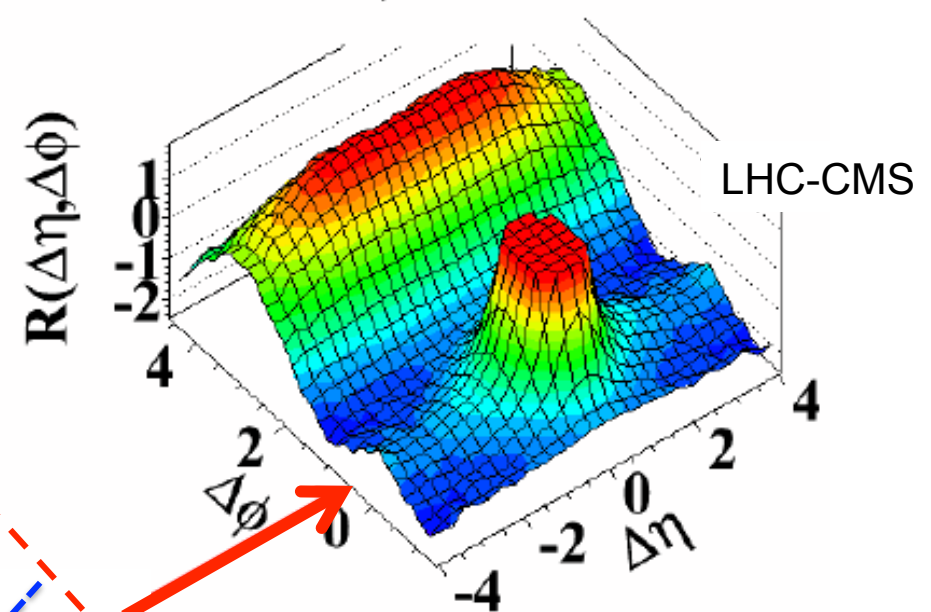
minimum bias p+p events

high multiplicity p+p events

(b) MinBias, $1.0\text{GeV}/c < p_T < 3.0\text{GeV}/c$

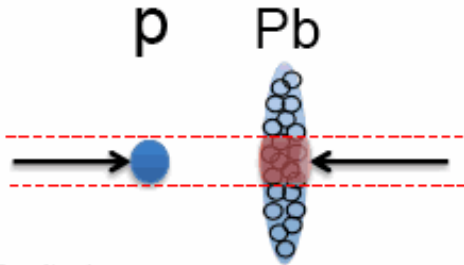


(d) $N > 110$, $1.0\text{GeV}/c < p_T < 3.0\text{GeV}/c$



- inter-correlation between di-jets
- correlated multi-parton interactions
- collective behavior in small and dense system

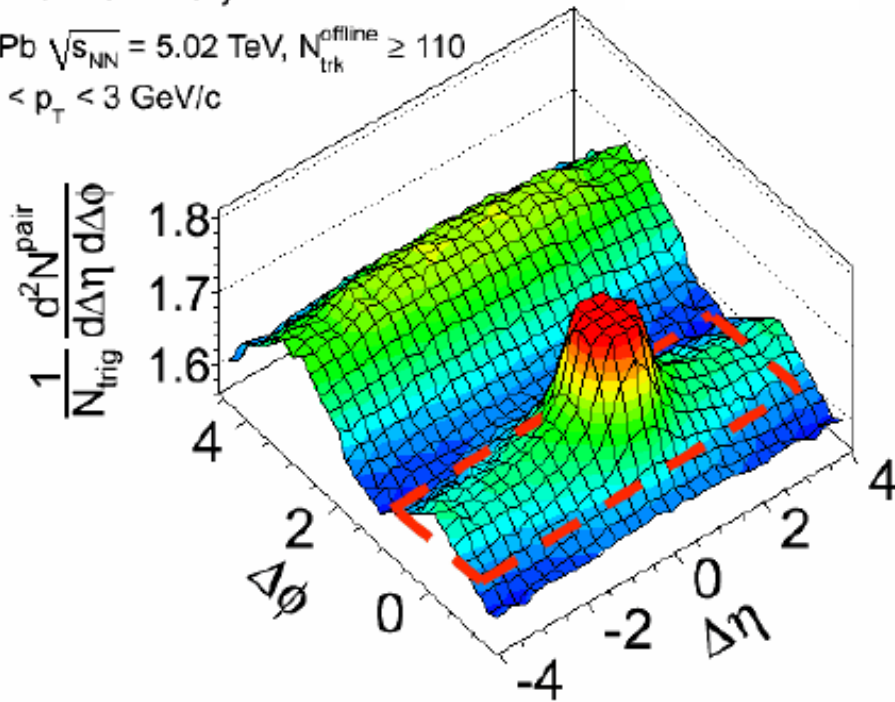
p+A collisions



CMS Preliminary

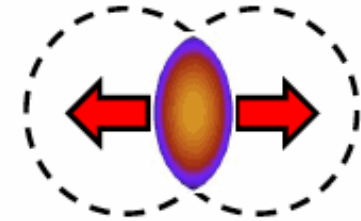
LHC-CMS

pPb $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV, $N_{trk}^{offline} \geq 110$
 $1 < p_T < 3$ GeV/c



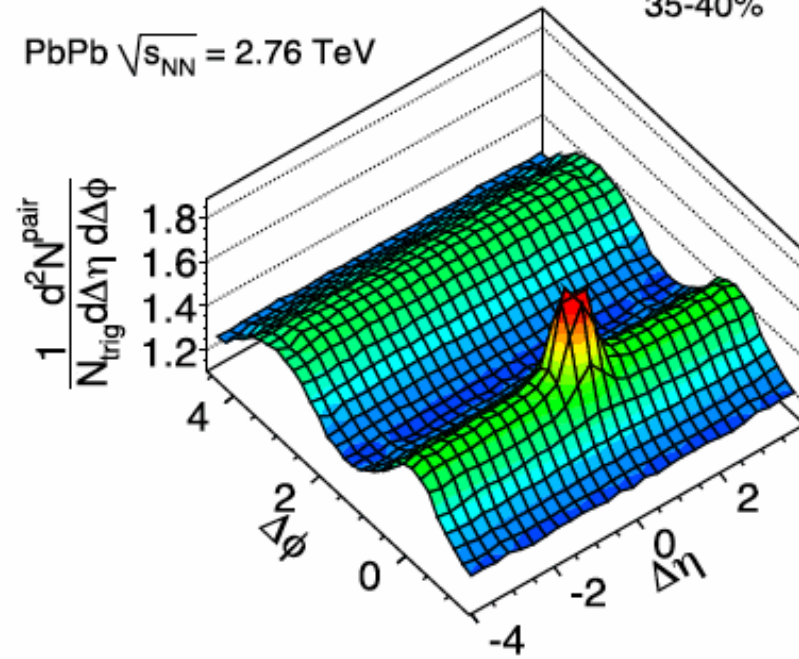
A+A collisions

Initial-state geometry
 +
 collective expansion



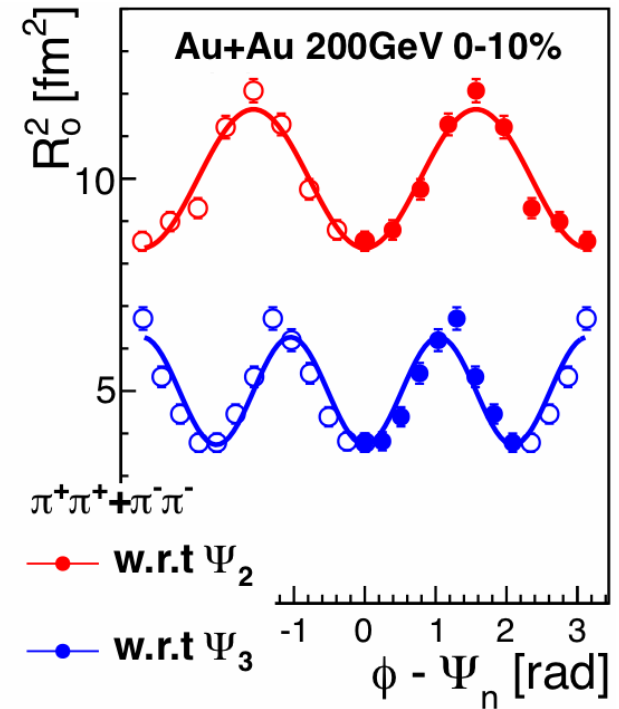
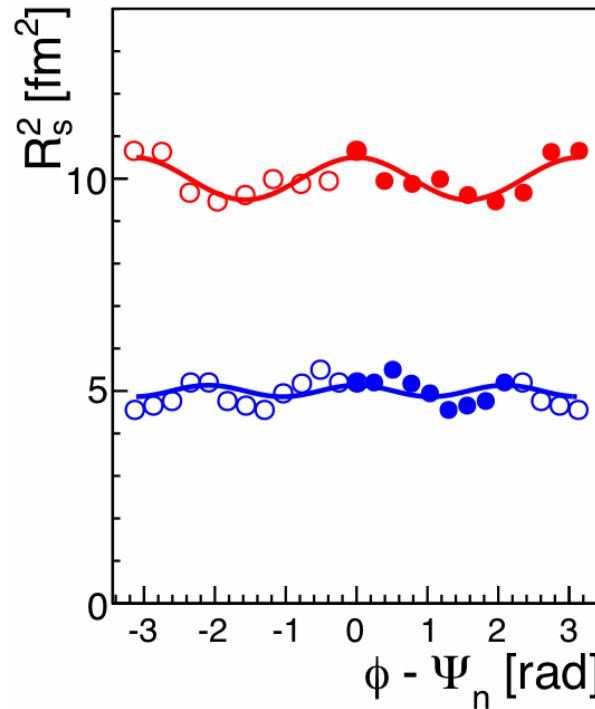
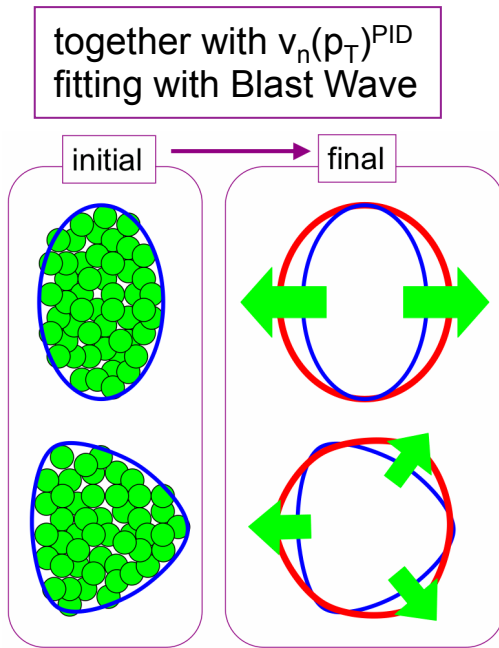
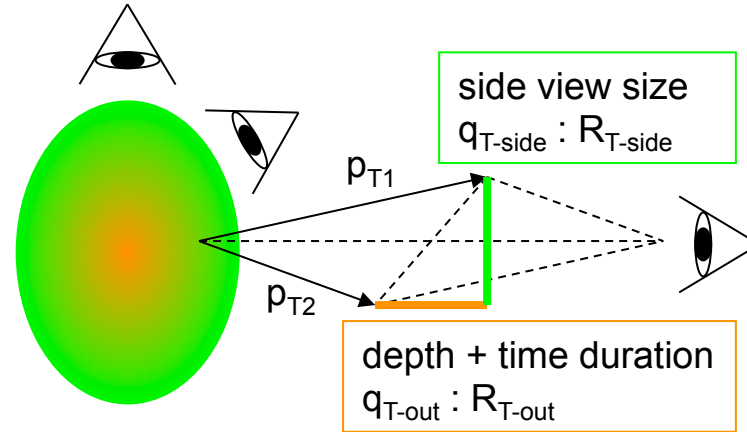
35-40%

PbPb $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV



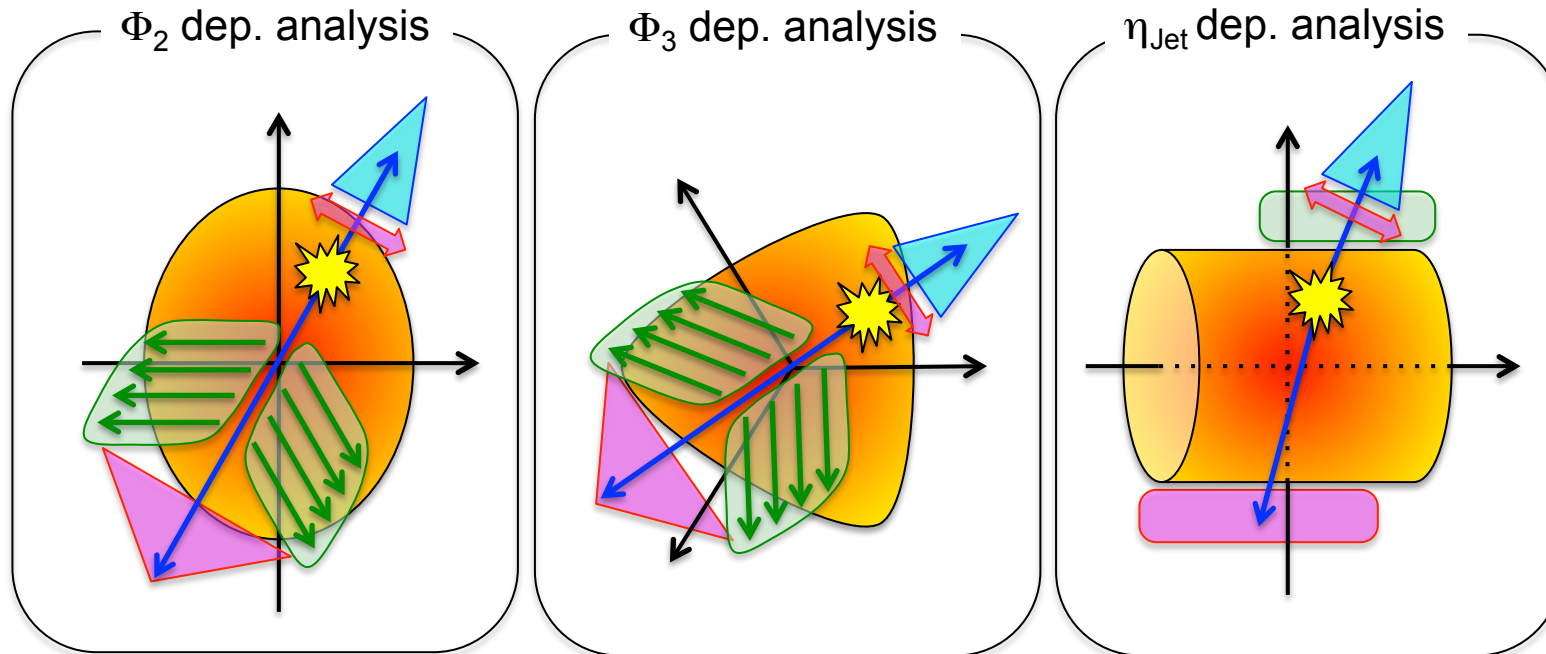
量子力学的2粒子干渉効果を使ったQGP凍結時の大きさや形状を測定する。

$R_{T\text{-side}}, R_{T\text{-out}}$ vs $(\phi - \Phi_2), (\phi - \Phi_3)$
 $R_{T\text{-side}}^{\text{oscill.}} < R_{T\text{-out}}^{\text{oscill.}}$ for $n=2,3$ (central)



PHENIX Preliminary, QM12

Further tests of hard-soft interplay using correlation between jet modification and geometry/expansion of QGP



methods

- Multi-particle correlation
- Jet-hadron / γ -hadron correlation
- Jet fragmentation function
- Di-jet distribution

Yet another axis as a control parameter to define path length, geometry and expansion.

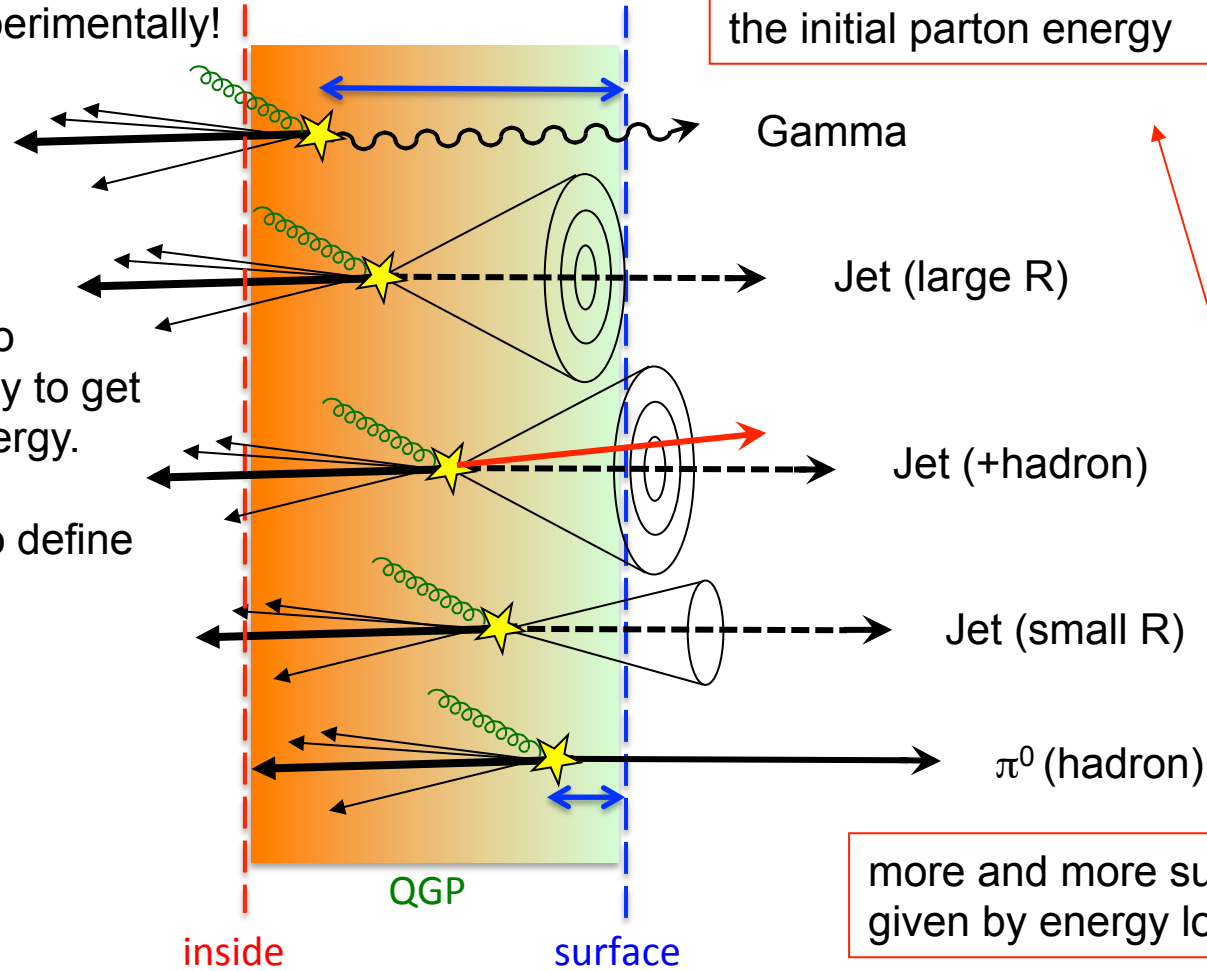
Systematic test of energy loss and redistribution with photons, jets and hadrons

These two effects (energy loss and redistribution) can not be clearly separated experimentally!

Closer and closer to the initial parton energy

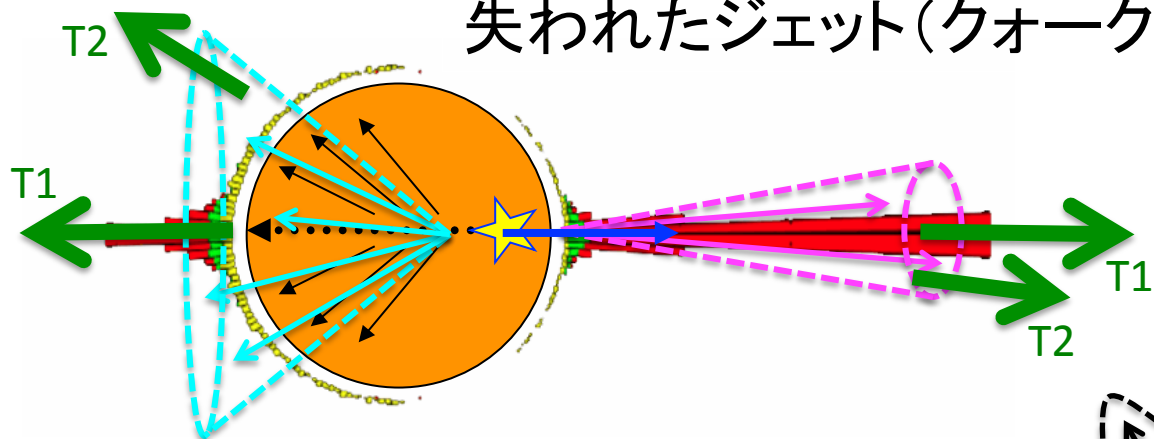
Jet reconstruction is to recover the lost energy to get the original parton energy.

Jet as a control tool to define path length

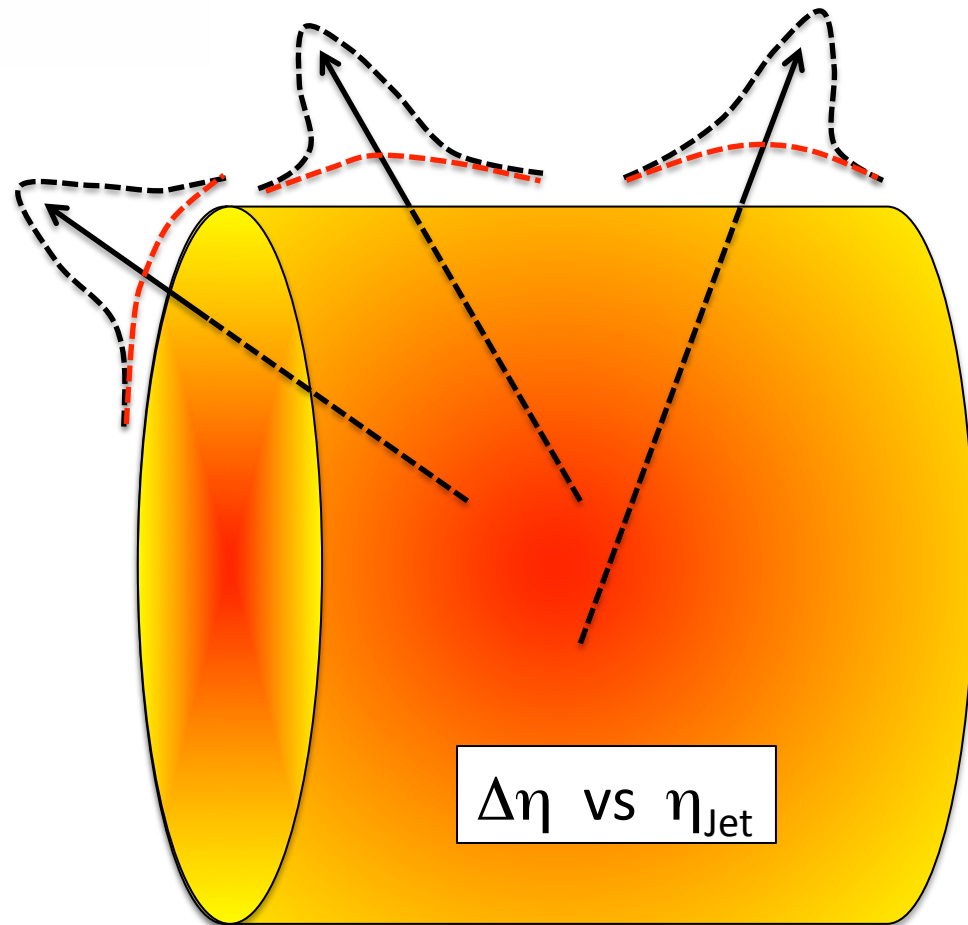
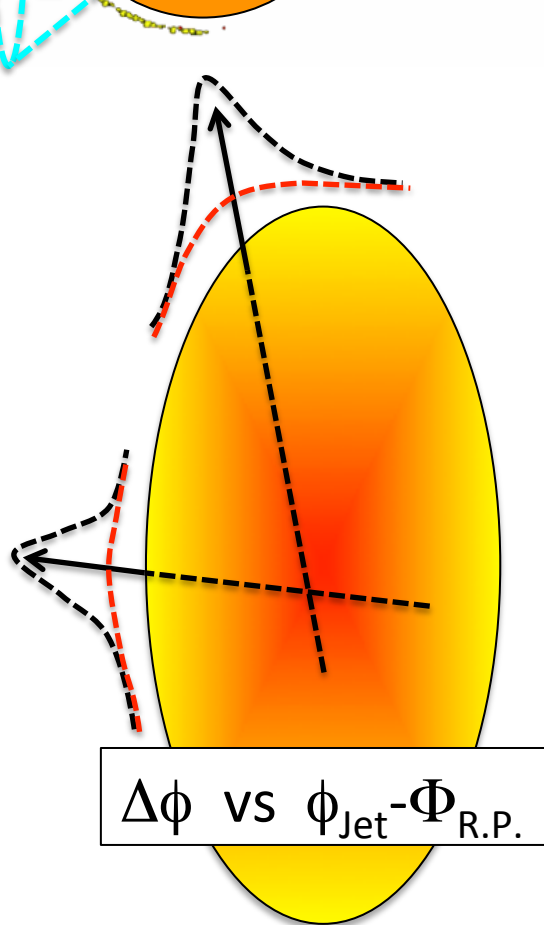


more and more surface bias given by energy loss

失われたジェット(クォーク)のエネルギーはどこへ？



ジェット軸に対する
粒子相関分布の変化



おわり

(明日は、フローとゆらぎの物理結果について)

- 11. 実験的に何を以てQGPとするのか？
- 13. 衝突直前後の物理、QGPとしておよそ平衡化していることをどうやって知るか。
- 16. QGP発見と言える根拠
- 17. クォーク・グルーオンプラズマの発見といえる決定的なエビデンスは現状では何であると総括しているのか？
- 33. そもそも実験でどのような量を測っているのか、そこからわかる事を知りたい。
- 43. これまでの重イオン衝突実験から、結果的にQCDの相転移について何が(新しく)分かったと言えるのか？
- 52. Glauber、多自由度、中心度、揺らぎなど 多重度揺らぎ、negative binomial(その背景？)
- 58. 理論計算および実験結果の信頼している事と疑った方が良い事について、重イオン衝突実験で高温になると言っているが、非平衡系で温度のようなものは存在するのか？
- 61. 中心衝突度と衝突係数の関係について
- 65. RHICの実験結果が出た後に、重イオンでの時間発展と宇宙の熱史との類推が紹介されていたが、最近はあまり聞かない。RHICでの重イオン衝突実験が終わりに近づいているが、その集大成を初期宇宙の理解に役立てることが実現できるか？どこに困難があるか？
- 75. 重イオン衝突における熱化過程についてとそれに対して感度のいい測定量・測定可能性について
- 77. 重イオン実験の将来の見通しに関して
- 78. LHC、RHICではそれぞれ何が測定可能な量なのか。各実験グループがそれぞれ何を測るのに向いているのか
- 79. 重イオン衝突の様々な観測量に関する詳しい説明など
- 131. 20年後の展望

23. 非対称衝突や v_2, v_3 の解析によってどのような事象の理解をより深めることが出来るか
32. QGPの η/s が小さいという話があるが、どのような実験結果と理論で示されているのか知りたい。
35. $v_1 > 0$ の方向を実験的にどう決めているか
38. フローに関する実験結果の現状とQGPの流体力学的性質の関係
42. Flow解析について
51. ハドロン化 quark number scalingの衝突エネルギー依存性は定量的にどこまで理解されているか？ hadronic rescatteringの影響？ Entropy問題は怎么样了か？
56. 構成クォーク数スケーリング(とそこからのずれ)はどのように決着したのか／させるのか。理論家の解釈を聞きたい
100. quark number scalingはなぜ成り立つのか。また、どのエネルギー領域で正当性が確認されているのか。
80. 重イオン衝突の時間発展について理論や実験から何がわかったか、や QGPの特徴として粘性がよく取り上げられますが、他にもどのような量が測定可能か等が知りたいです
91. v_n のはかり方はいろいろなやりかた(EP, LYZ, n粒子相関)があるが、それらの違い。
108. v_n の計算手法について。理論と実験で比較する際に気をつけるべき点などが知りたいです

49. pA(dA) クローニン効果の粒子種(pi,K,p)依存性は何を意味するか？ フローに頼らない多粒子相関
60. high-multiplicity p+p、及びA+A衝突におけるflowやridgeについて、その起源に関する理論的予想、またその予想を確かめるためにどのようなものを実験的に測れば良いのか、加えて実験的にはこれまでに何を測ってきたのか、を包括的に説明して欲しいです
71. pA衝突とAA衝突の両方でflowが観測されているが、何か違うところはないのか？
72. 今の段階で、AA衝突でのflowがQGPの存在に対する証拠と言えるか？
86. LHCの結果が出る以前では、陽子+陽子衝突:QGPは出来ない、金+金中心衝突:QGPが出来ている、というのが解釈(あるいは暗黙の了解?)だったと思うのですが、LHC以後、その解釈がどう変わったのか、R_AAは結局どう解釈したらよいのか？
106. collectivity in small systems
96. QGPの生成の強い根拠のひとつとして、 v_2 の測定があったと思うが、AA以外の小さなシステムでも見えている。これは、どう理解すればよいのか。
124. pAで見えている流体的な振舞の起源。初期なのか流体なのか？ AAでのフローなどの発見は、本当に流体的な振舞の結果なのか？

7. ゆらぎの根本的な話が聞きたいです。理論側から、実験側で測定してもらいたいもの 実験側から、実験で測定できるがまだ測定されていないもの(e.g. direct photon $v_{2,3}$ in Cu-Cu)
26. バリオンストップングとバリオンの揺らぎの関係。stopped nucleon で臨界点付近の揺らぎがわかるのか？
31. QCD臨界点の有無 実験でどれぐらいまでわかるのか あったら(なかったら)何が見えるはずか
50. QGPを特徴づける性質(粘性など) 臨界点近傍での散逸と揺らぎとその膨張系におけるダイナミクス
62. QCDの相転移がクロスオーバーか1次相転移かを重イオン衝突実験ではどのように区別できるのか？
68. ゆらぎの物理について。QGPについて。
84. 1st order相転移のシグナルとcrossoverのシグナルの差異はあるのか？
85. ハドロンの観測量は過去の履歴を保存しないということが常識(v_2 などは除く)であるのに、なぜ臨界点の探索にハドロンの揺らぎが採用されているのか
99. RHICのBESで測られている物理量の全般的なレビュー(揺らぎ、HBT、 v_1 etc)。
133. 11月のJ-PARC研究会で、J-PARCでは流体描像が成り立たないのではという話がありましたが、それはなぜなのか。また、もしそうなった場合、QCD相図をサーベイするツールとしてうまく機能するのかという点を伺いたいです

53. Femtoscopy HBT puzzleはどうなったか？特に初期フローの存在は本質か？理論と実験の比較はどこまでApple-to-Appleか？

57. 理論計算の結果と比較する際に電磁気力による影響をどのように考慮しているのか。例 Correlation FunctionからSource Functionに変換する際等

120. 重イオンの時空発展にあつて、QGPの物性量をいかに綺麗に正確に引き出すことができるのか？何を見ることが重要なのか？ジェット、重クォーク、レプトン、光子、 ν_n の測定はどこまで本当に迫れるのか？

44. 直接光子の識別方法について。2粒子相関の解析方法について
73. 測定された「光子」が熱光子だという証拠はあるか？どこまで確証のあることか？
101. 熱光子は本当にQGPからの「熱的」な光子と理解できるのか。また、そうだとすると、そうして推定される「温度」 T はどこの温度なのか。
102. thermal photon puzzleの現状。 v_3 の結果を踏まえて。
128. 光子・レプトン対はQGPの直接的信号になるとよく言われますが、実験室での観測からQGPの「どのような性質」を明らかにすることができるのかを知りたいです
27. ジェットとQGP媒質応答、EOS, 音速との関係。
118. ハードプローブとQGP中でのエネルギー損失機構について
134. ハードな散乱とはどういうものなのでしょうか。重イオン衝突で用いられるのはなぜ金原子なのでしょうか。jetがQGP中でどのようにエネルギーを失うのか

1. これまでのRHICとLHCにおける重イオン衝突実験で、強い磁場や電場の効果は見えているのか。

15. Chiral magnetic effectの実験的な観測方法

103. 衝突直後に強い磁場は本当に存在しているのか。存在するとすれば、そのタイムスケールは。また、実験的にそれを確かめることはできるのか。

112. カイラル磁気効果は高エネルギー重イオン衝突では観測できなかったのか？