

Najgorętsze krople materii wytworzone na LHC

Adam Bzdak

AGH, KZFiJ

Plan

- Wprowadzenie do $A+A$
- Przepływ eliptyczny, trójkątny, hydrodynamika
- Odkrycie na LHC w $p+p$ i $p+A$
- Korelacje 2- i wielu-cząstkowe
- Podsumowanie

Nowy stan materii



$T \sim 300 \text{ K}$

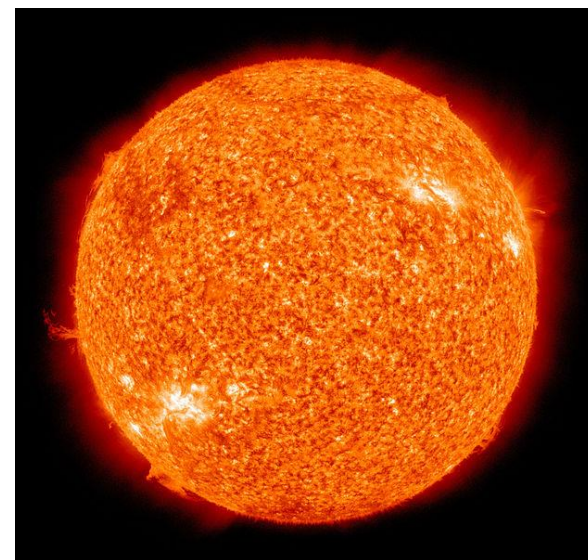


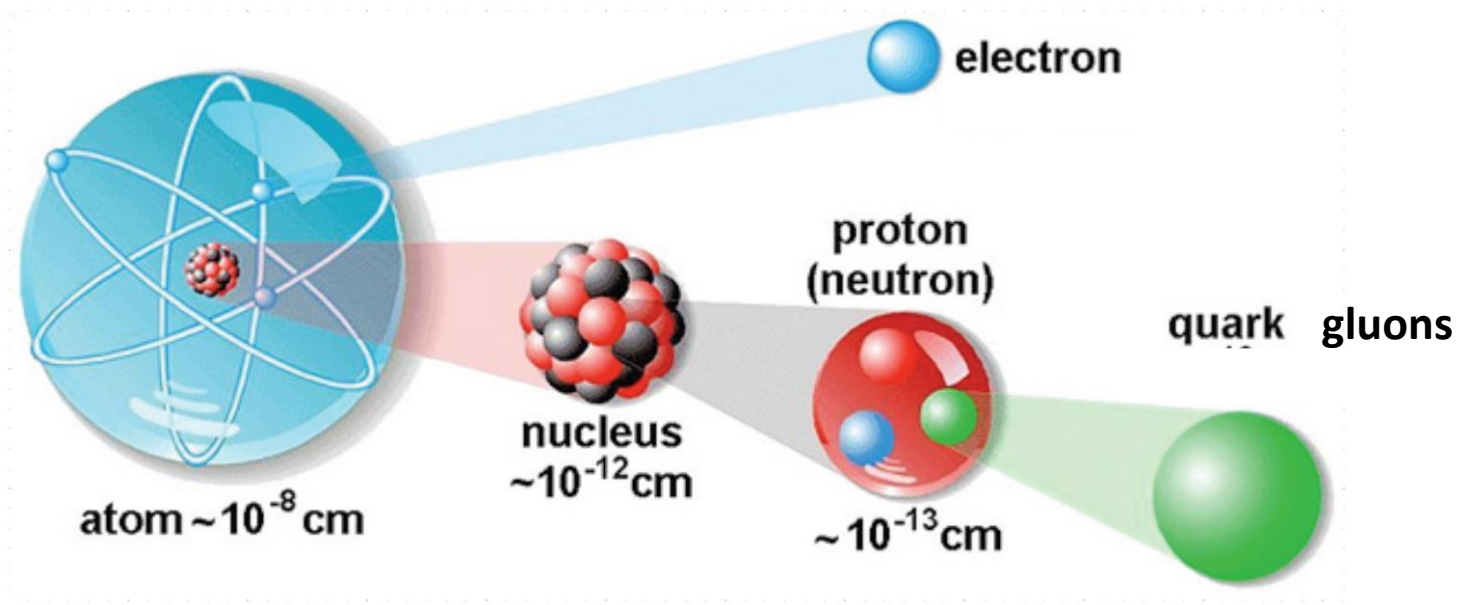
$T \sim 1500 \text{ K}$

Gaz atomów złota: $T \sim 3000 \text{ K}$

Aby stopić protony
RHIC and LHC: $T \sim 10^{12} \text{ K}$

Środek Słońca: $T \sim 10^7 \text{ K}$





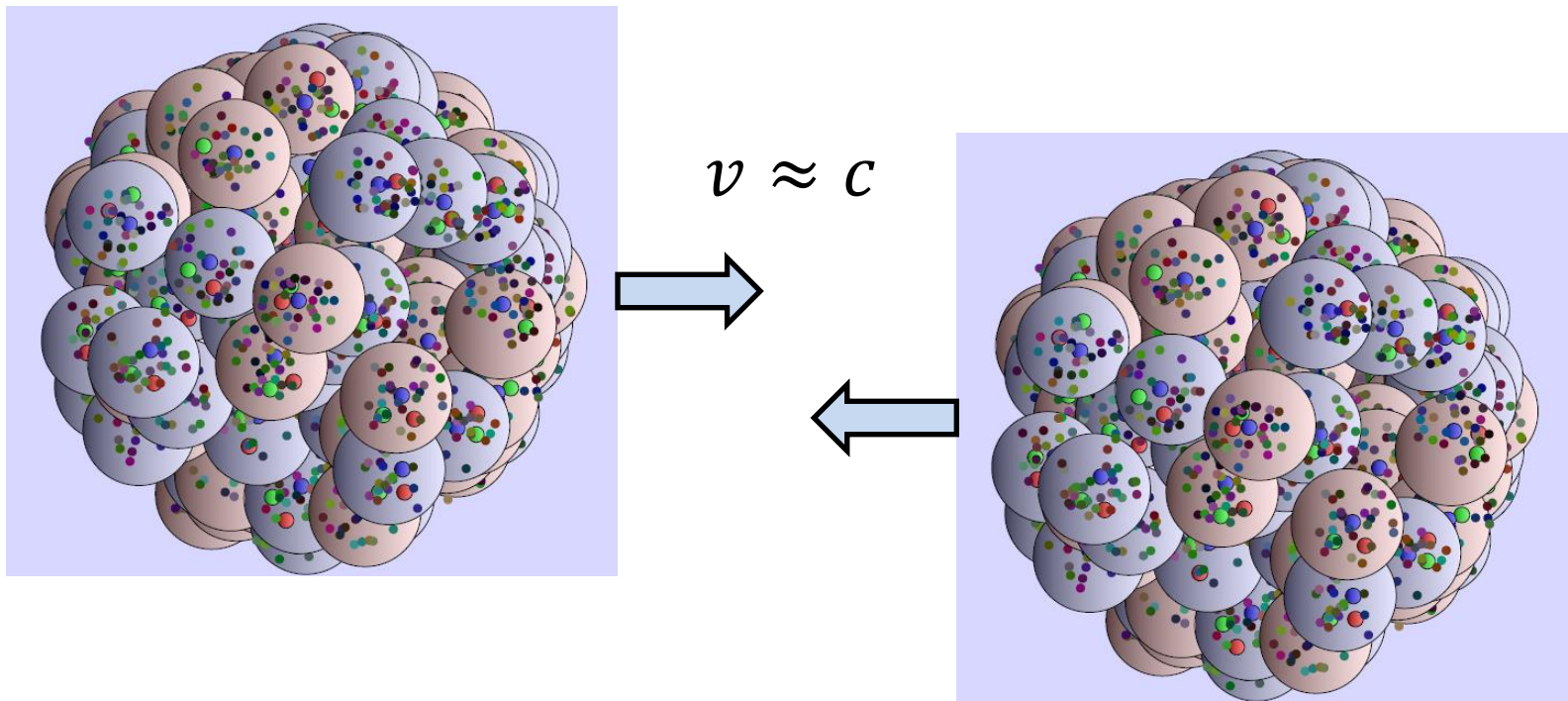
Chcemy badać **plazmę kwarkowo-gluonową**

Jak wytworzyć tak dużą temperaturę?

Zderzamy jądra **złota** (Au) lub **ołowiu** (Pb) z prędkościami bliskimi prędkości światła

Au = 197 nukleonów

Pb = 208 nukleonów



RHIC – Relativistic Heavy Ion Collider, Nowy Jork, USA

Au+Au, 20 - 200 GeV (w układzie p+p)

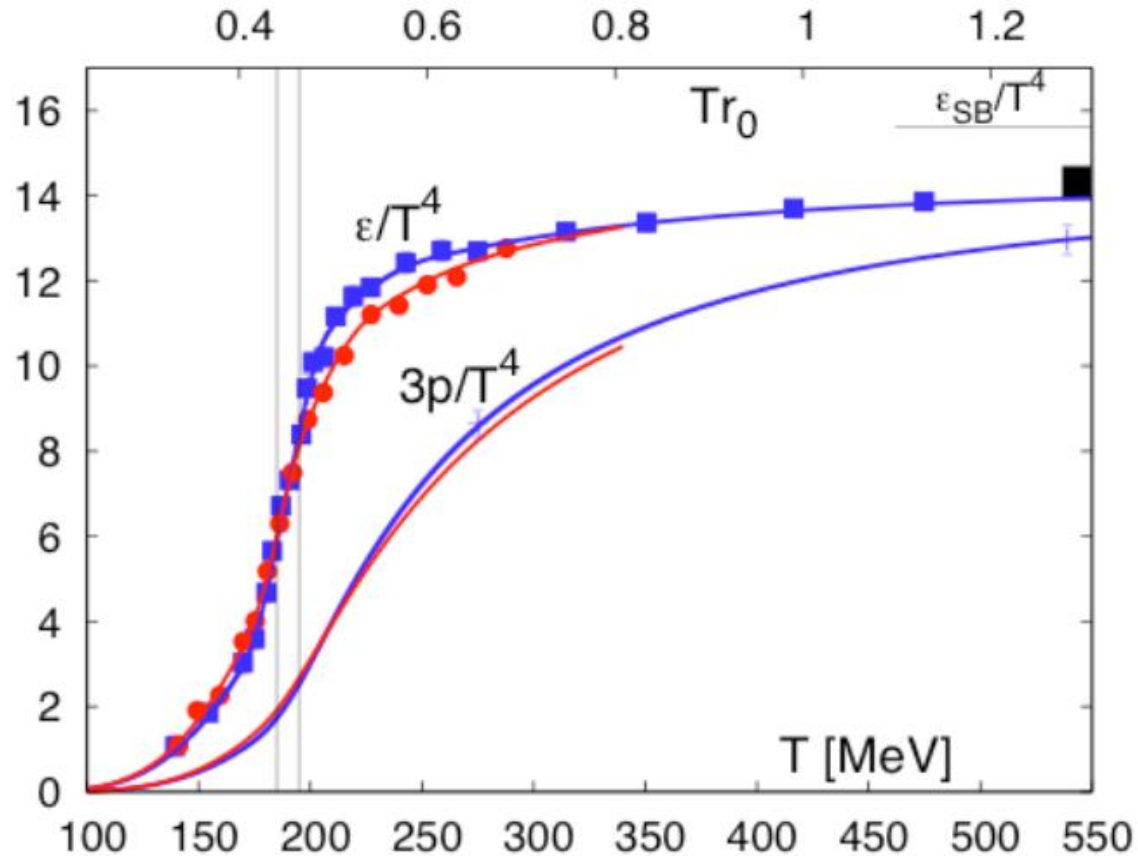
d+Au, 200 GeV

LHC – Large Hadron Collider

Pb+Pb, 2760 GeV (w układzie p+p)

p+Pb, 5020 GeV

Obliczenia QCD (chromodynamika kwantowa) na sieciach

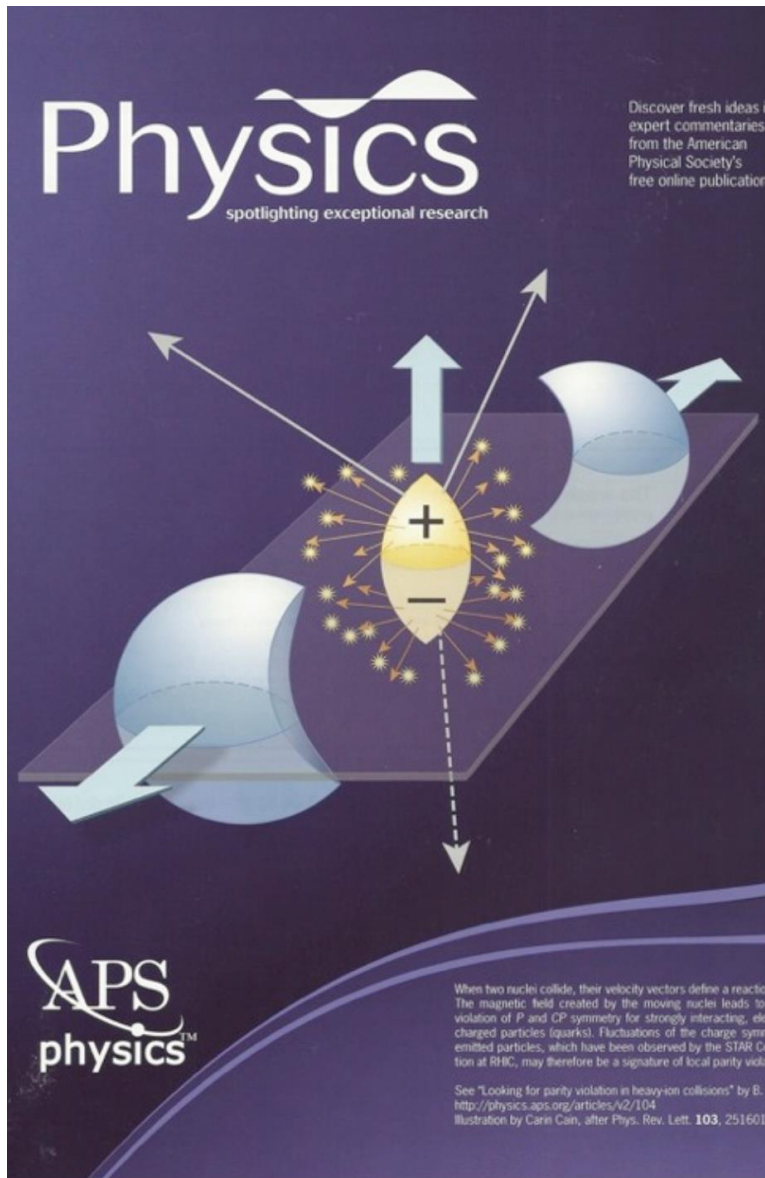


Ciągłe przejście z gazu hadronów do plazmy kwarkowo-gluonowej (?) przy $T \approx 200$ MeV (10^{12} K)

Chcemy badać diagram fazowy QCD



Zderzenia ciężkich jąder to także źródło wielkich pól magnetycznych



Łatwo policzyć, że pole magnetyczne w środku **fireballa** równa się

$$B \approx 10^{18} \text{ Gaussa}$$
$$10^{14} \text{ Tesli}$$
$$1 (\text{masa pionu})^2$$

Czas życia pola B jest bardzo krótki.

Dla porównania inne źródła pola magnetycznego

The 45 Tesla Hybrid:

$$45 \text{ Tesli} \sim 4.5 \cdot 10^{-13} m_{\pi}^2$$

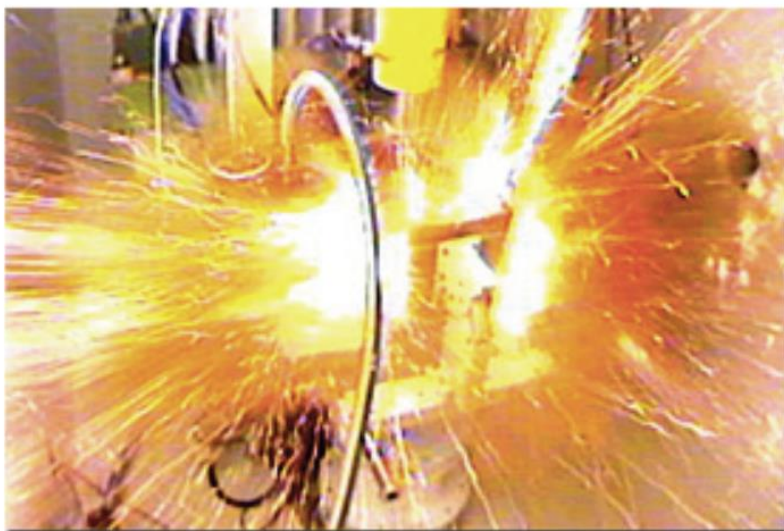
Magnesy pulsacyjne:

$$100 \text{ Tesli} \sim 10^{-12} m_{\pi}^2$$



Strength	45 tesla
Type	Hybrid
Bore size	32 mm (~1.25 inches)
Online since	December 1999
Cost	\$14.4 million
Weight	31,752 kg (35 tons)
Height	6.7 meters (22 feet)
Operating temperature	-271 °C (-456 °F)
Water used per minute	15,142 liters (4,000 gallons)
Power required	33 MW

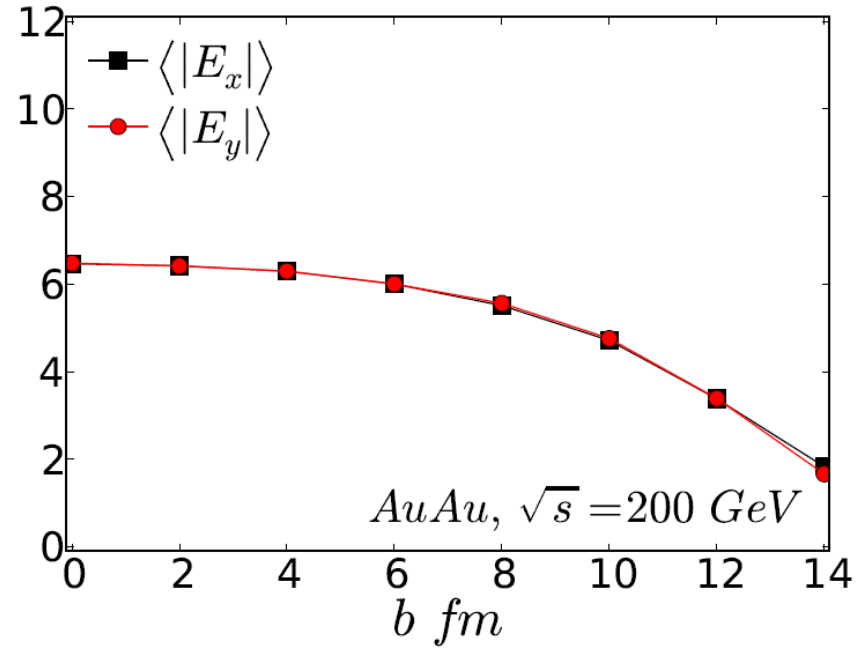
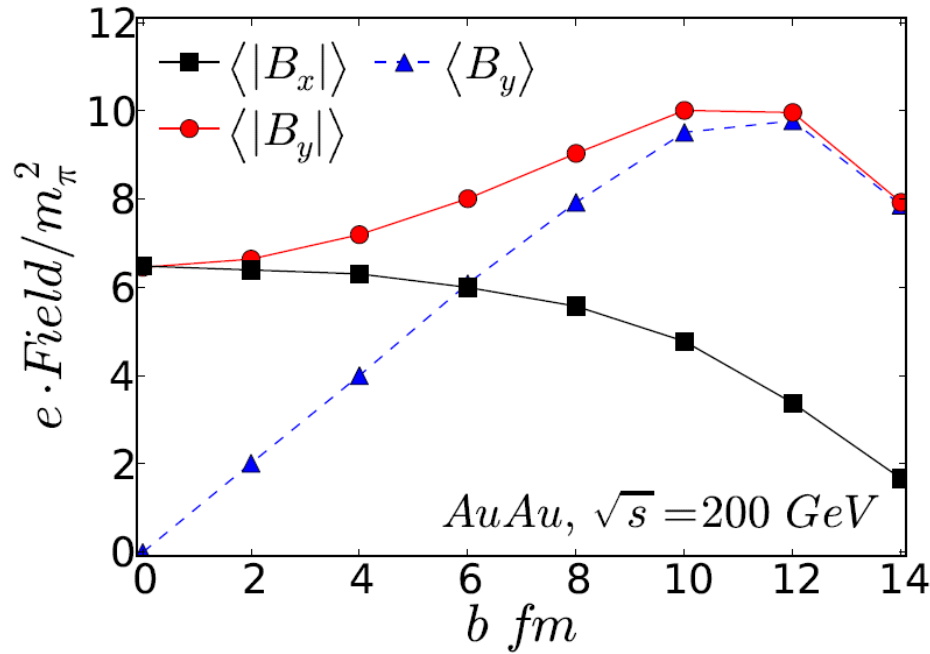
Photo Credit: Larry Gordon



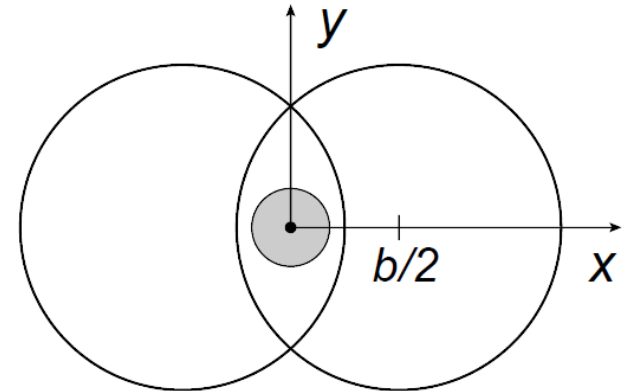
$$\text{Pulsary: } 10^{-6} - 10^{-5} m_{\pi}^2$$

$$\text{Magnetary: } 10^{-4} - 10^{-3} m_{\pi}^2$$

Konkretny rachunek (z fluktuacjami funkcji falowej jąder)

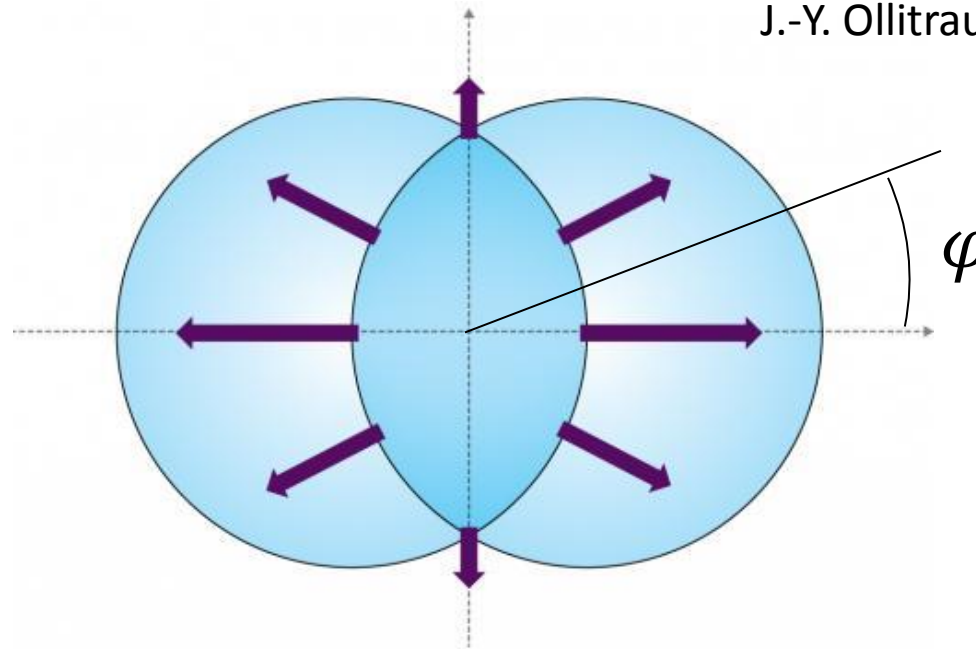


b – parametr zderzenia



Lekcja z RHIC, przepływ eliptyczny (elliptic flow)

J.-Y. Ollitrault, PRD 46 (1992) 229



kąt azymutalny φ

$$\frac{dN}{d\varphi} \sim 1 + 2 v_2 \cos(2\varphi) + \dots$$

dla pionów, kaonów,
protonów, itd

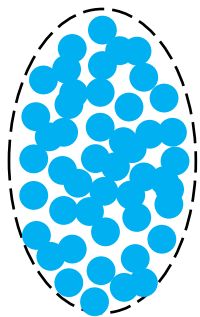
RHIC i LHC: $v_2 \sim 0.1$, to jest bardzo duża liczba

Silnie oddziałująca materia, która zachowuje się jak płyn

Relatywistyczna hydrodynamika

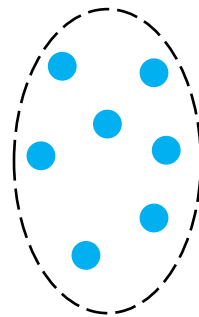
λ – średnia droga swobodna

L – rozmiar systemu



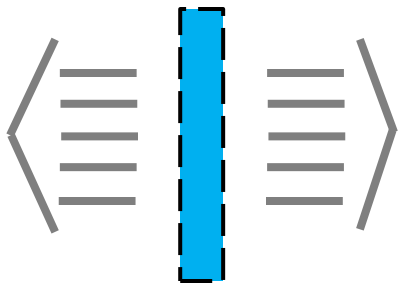
$$\frac{\lambda}{L} \ll 1$$

mechanika płynów

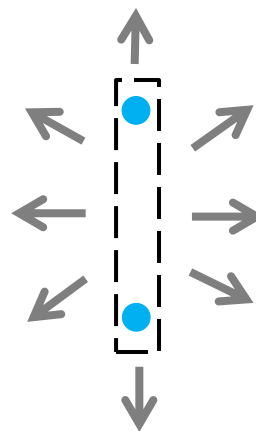


$$\frac{\lambda}{L} \sim 1$$

mechanika statystyczna

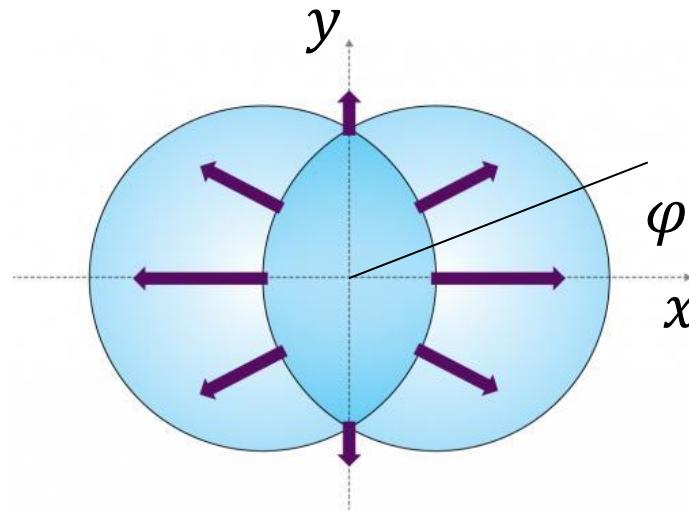


przepływ jest anizotropowy



“przepływ” jest izotropowy

Hydrodynamika daje nietrywialne korelacje wielocząstkowe



$$C_2(\Delta\varphi) \sim \cos(2\Delta\varphi)$$

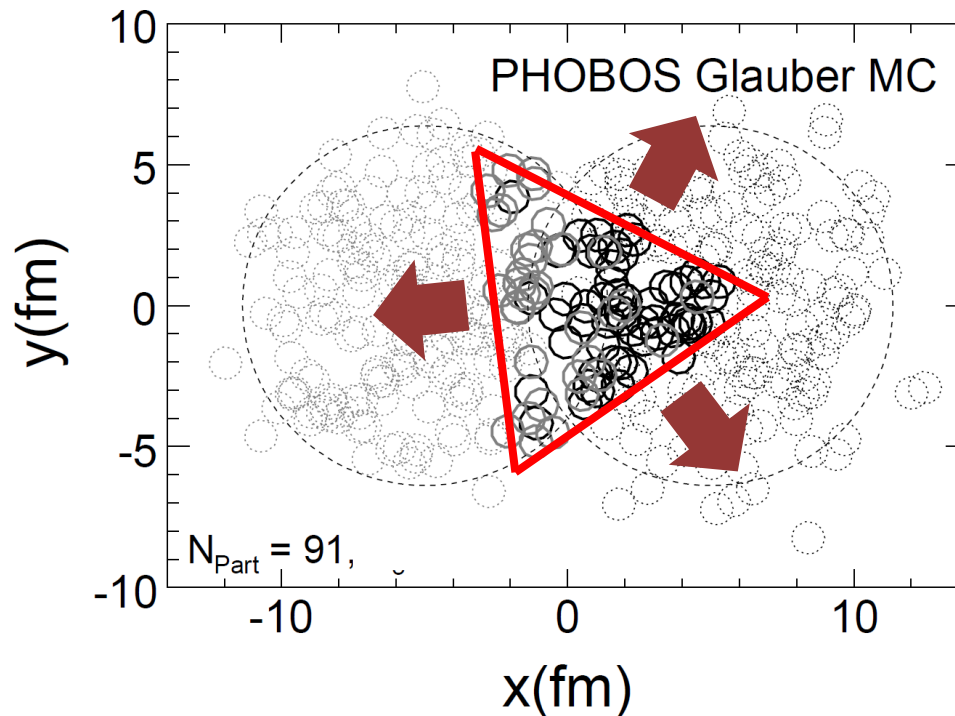
$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$$

C_2 ma maksima dla $\Delta\varphi = 0$ i $\Delta\varphi = \pi$

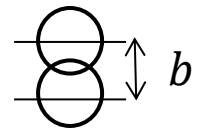
Są też korelacje 4-, 6-, 8-, ... , N-cząstkowe, jest to charakterystyczne dla przepływu **kolektywnego**

Przeptyw trójkątny

są przypadki, gdzie układ wygląda jak trójkąt



Glauber MC model



$$\sigma_{in}(b) \sim e^{-b^2/\gamma}$$

nieelastyczny p. czynny

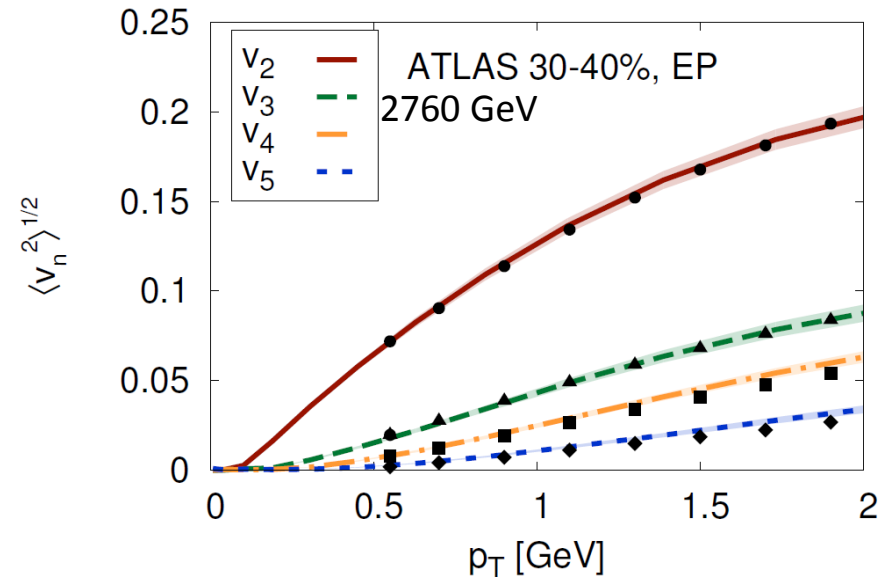
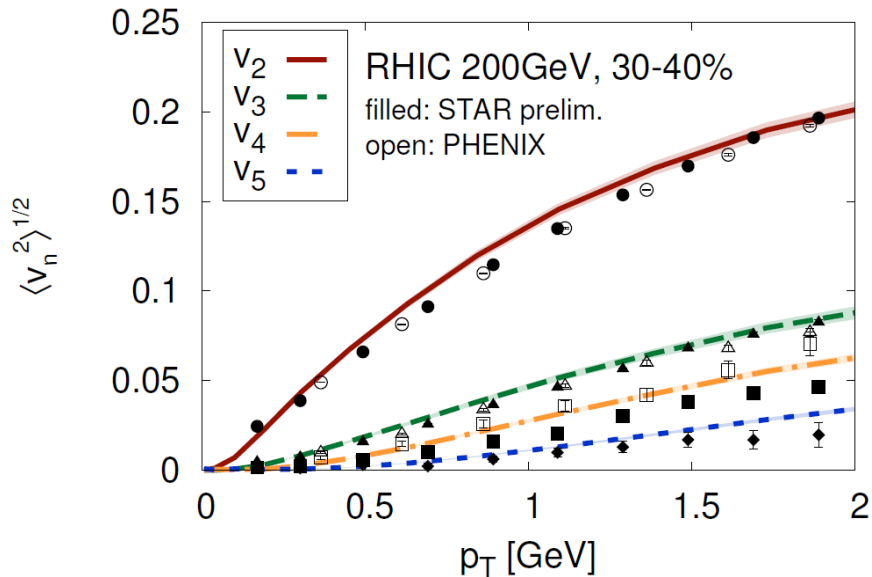
$$C_2(\Delta\varphi) \sim \cos(3\Delta\varphi)$$

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$$

Możemy też mieć bardziej skomplikowane kształty:

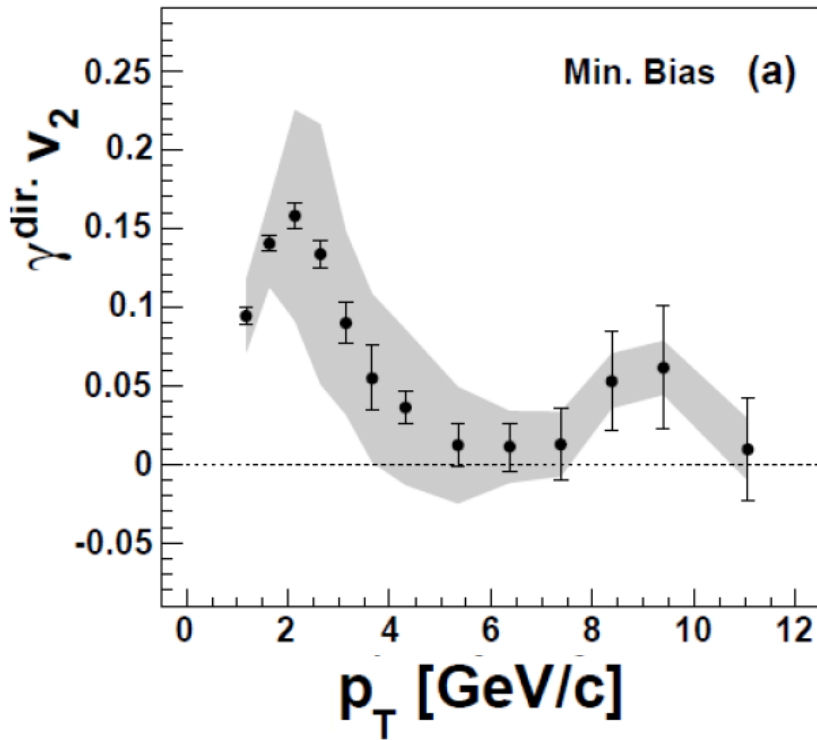
$$C_2(\Delta\varphi) \sim \sum_n \langle v_n^2 \rangle \cos(n\Delta\varphi)$$

Na RHIC (Au+Au) i LHC (Pb+Pb) hydrodynamika odnosi sukcesy



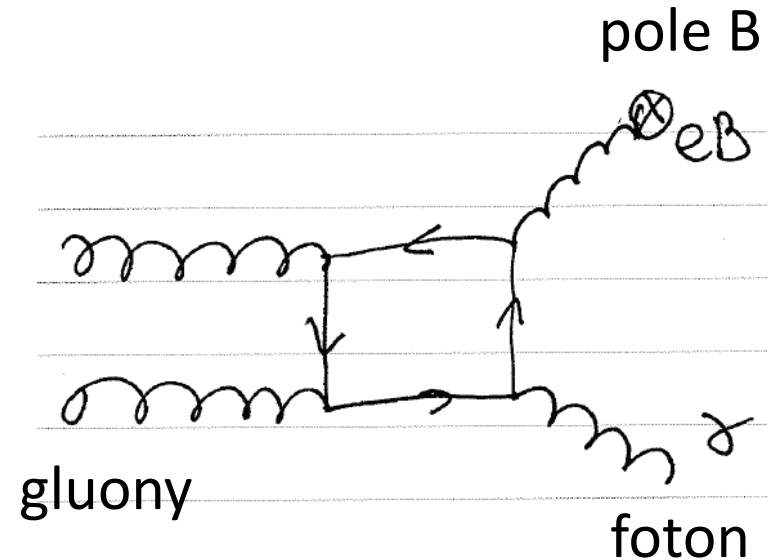
bardzo mała lepkość,
 $\eta/s \sim 0.1 - 0.2$

Zagadka – przepływ eliptyczny dla fotonów



Fotony praktycznie nie oddziałują ze sobą i nie oddziałują silnie!

może pole B?

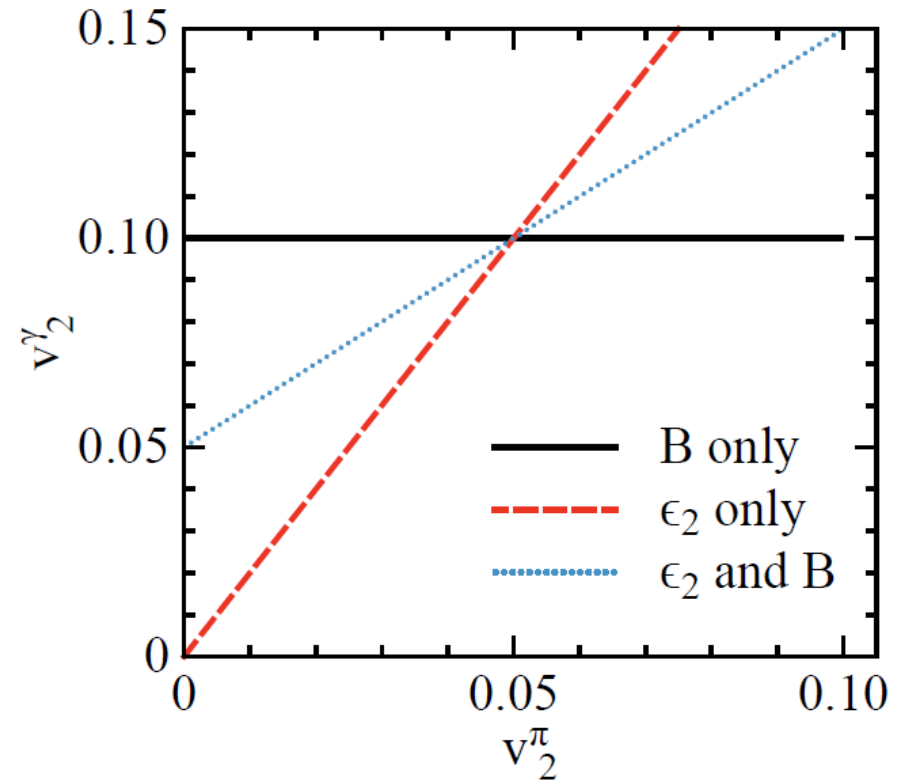
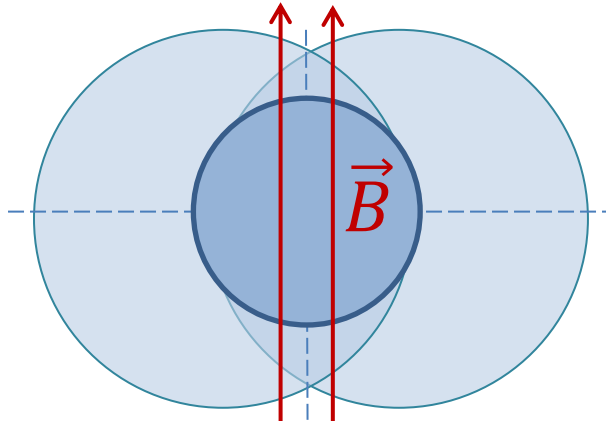


G.Basar, D.Kharzeev, V.Skokov, Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 202303

A.B., V.Skokov, Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 19, 192301

Eksperymentalny test

Czekamy na przypadki z małym v_2 dla pionów i dużym polem B

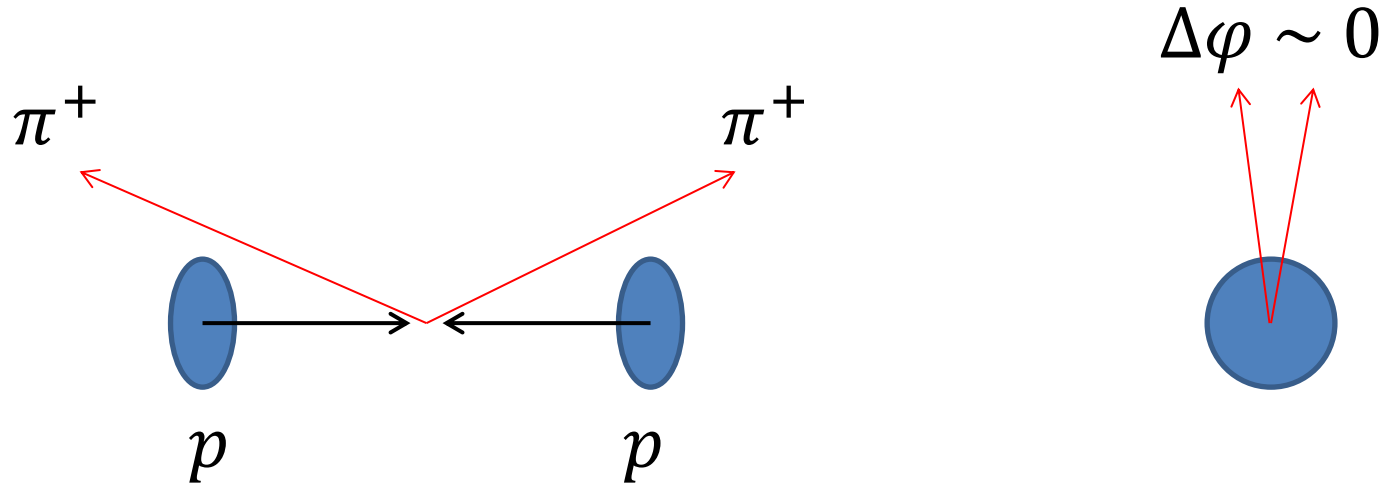


A.B., Phys. Rev. C85 (2012) 044919

A.B., V.Skokov, Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 19, 192301

Odkrycie na LHC

Zderzenia proton-proton przy energii 7000 GeV

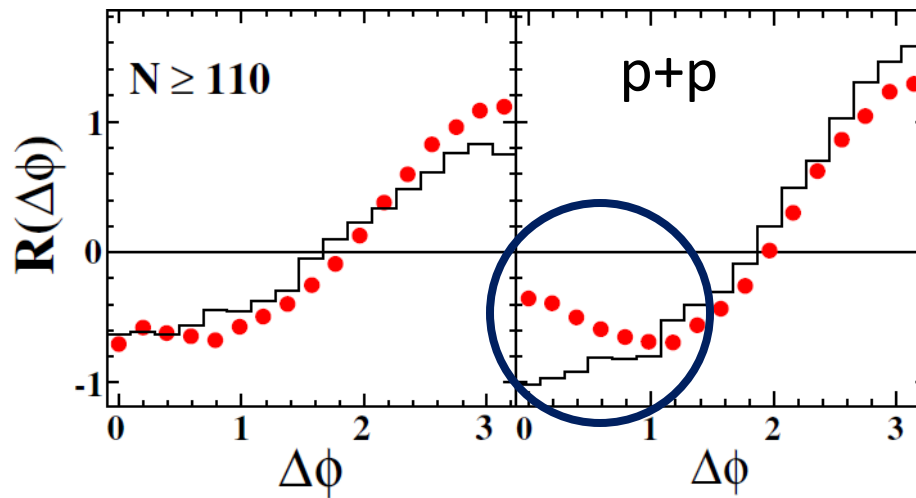
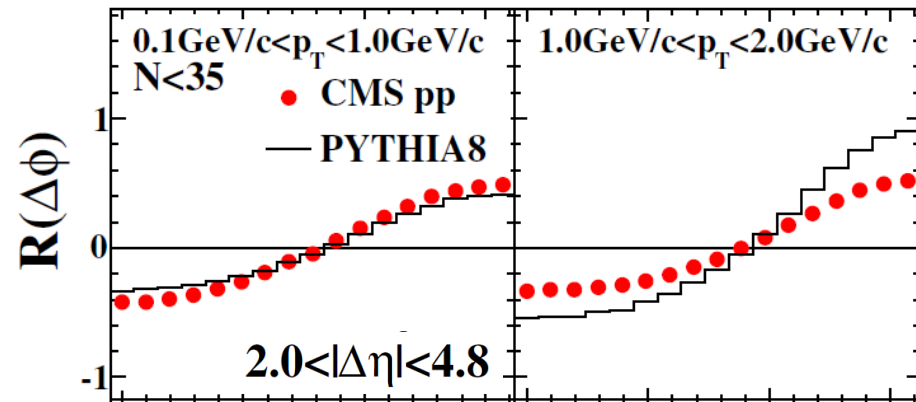


Cząstki z dużą przerwą w rapidity preferują ten sam kąt azymutalny!

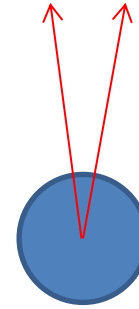
↓
miara prędkości podłużnej

Nie do zrozumienia (?) w perturbacyjnej QCD.

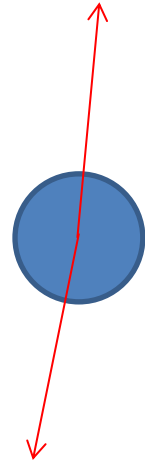
Dane eksperymentalne p+p



$\Delta\phi \sim 0$



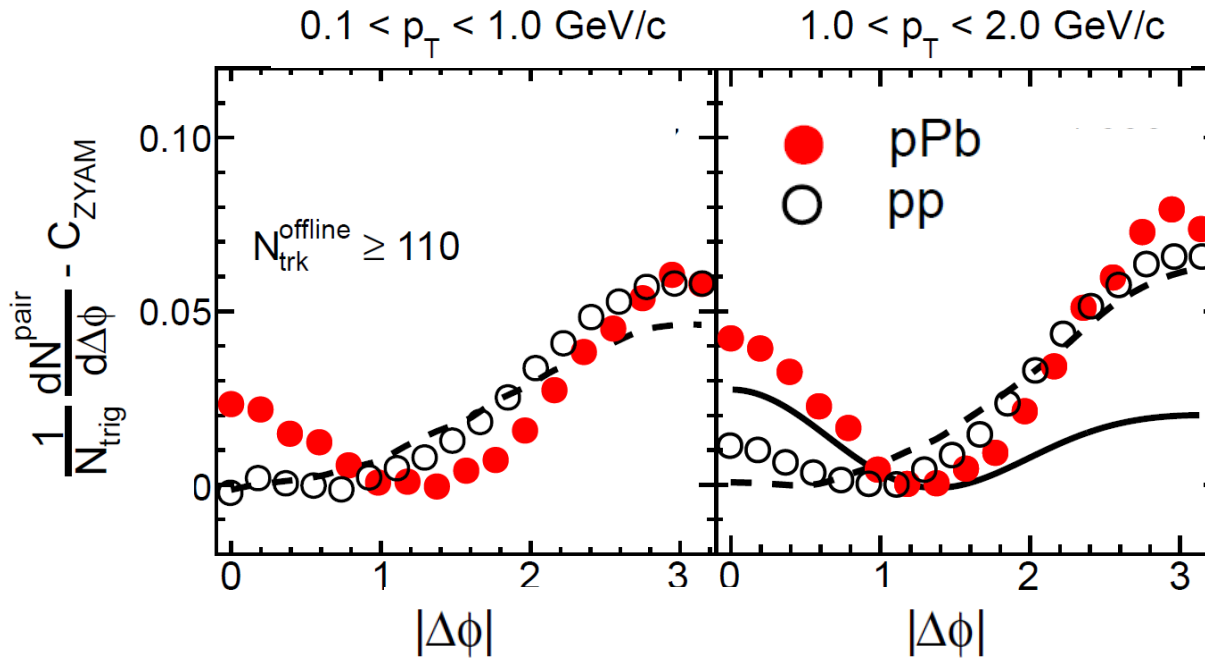
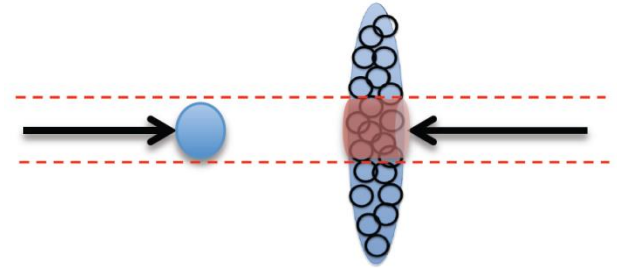
$\Delta\phi \sim \pi$



N – liczba wyprodukowanych cząstek
 $\langle N \rangle \approx 16, \quad p_T > 0.4 \text{ GeV}, \quad |\eta| < 2.4$

Im więcej cząstek tym silniejszy efekt!

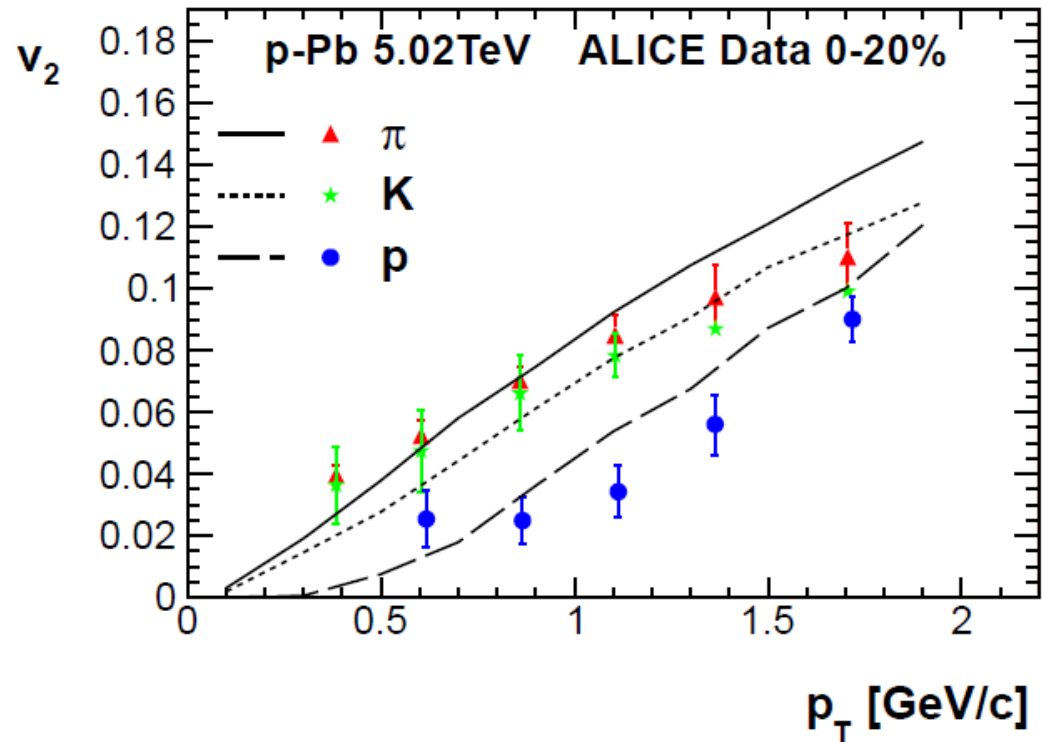
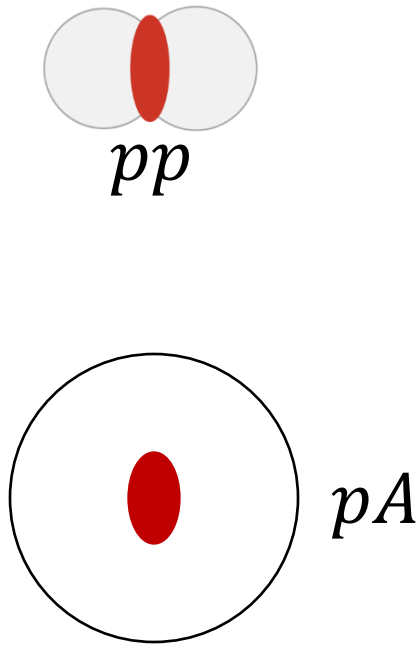
Zderzenia p+Pb przy energii 5020 GeV
 Obserwuje się dokładnie taki sam efekt.



Efekt ten został przewidziany w
 P. Bożek, PRC 85 (2012) 014911

CMS Coll., Phys. Lett. B718 (2013) 795
 ALICE Coll., Phys. Lett. B719 (2013) 29
 ATLAS Coll., Phys. Rev. Lett. 110, 182302 (2013)
 PHENIX Coll., Phys. Rev. Lett. 111, 212301 (2013)], d+Au at 200 GeV

Być może w p+p i p+A również powstają kropelki plazmy, które zachowują się jak płyn



P.Bozek, PRC 85 (2012) 014911

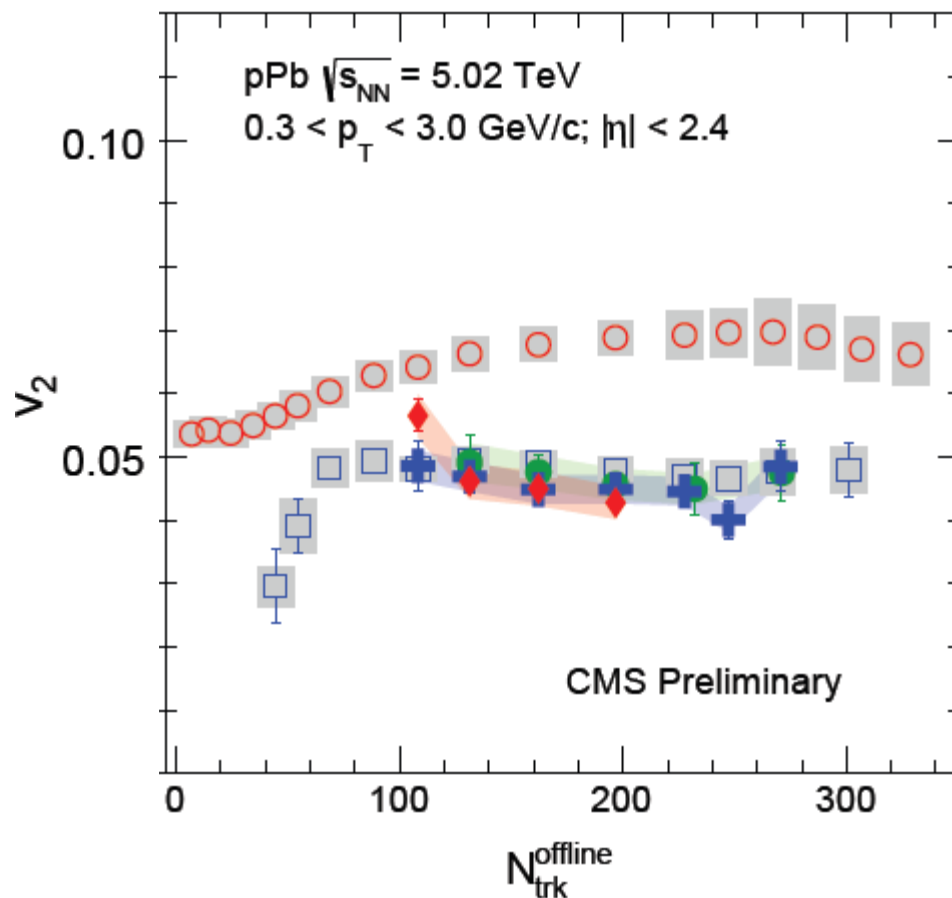
P.Bozek, W.Broniowski, G.Torrieri, PRL. 111, 172303 (2013)

A.B., B.Schenke, P.Tribedy, R.Venugopalan, PRC 87 (2013) 064906

G.Qin, B.Müller, PRC 89, 044902 (2014)

W tej chwili mamy wiele danych sugerujących powstanie gorącego płynu w zderzeniach p+Pb

Najmocniejszy argument to korelacje 4-, 6-, 8-cząstkowe, które są naturalne w opisie hydrodynamicznym (kolektywnym)

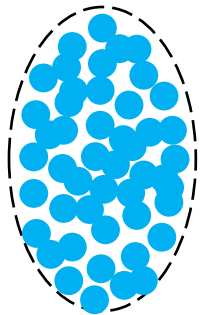


- $v_2\{2, |\Delta\eta| > 2\}$
- $v_2\{4\}$
- $v_2\{6\}$
- $v_2\{8\}$

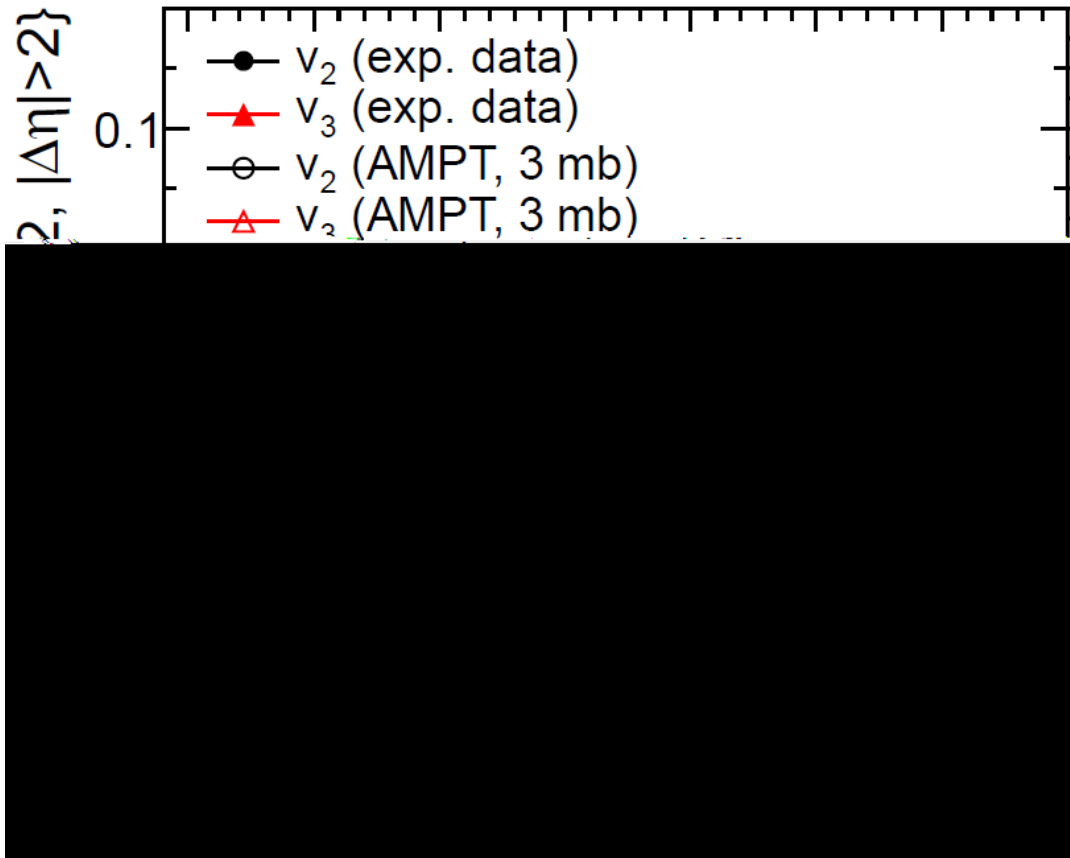
Przewidziane w:
A.B., P.Bożek, L.McLerran,
Nucl. Phys. A927 (2014) 15

Sukces modelu **kaskadowego**.

Elastyczne zderzenia kwarków



$$\frac{\lambda}{L} < 1$$

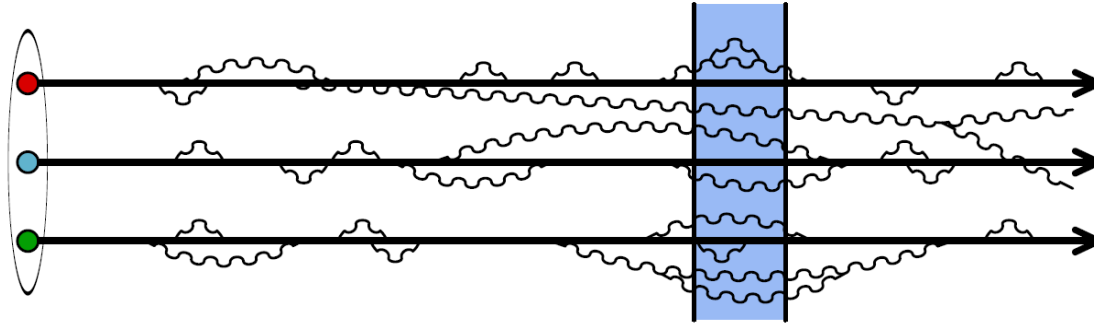


liczba wyprodukowanych cząstek

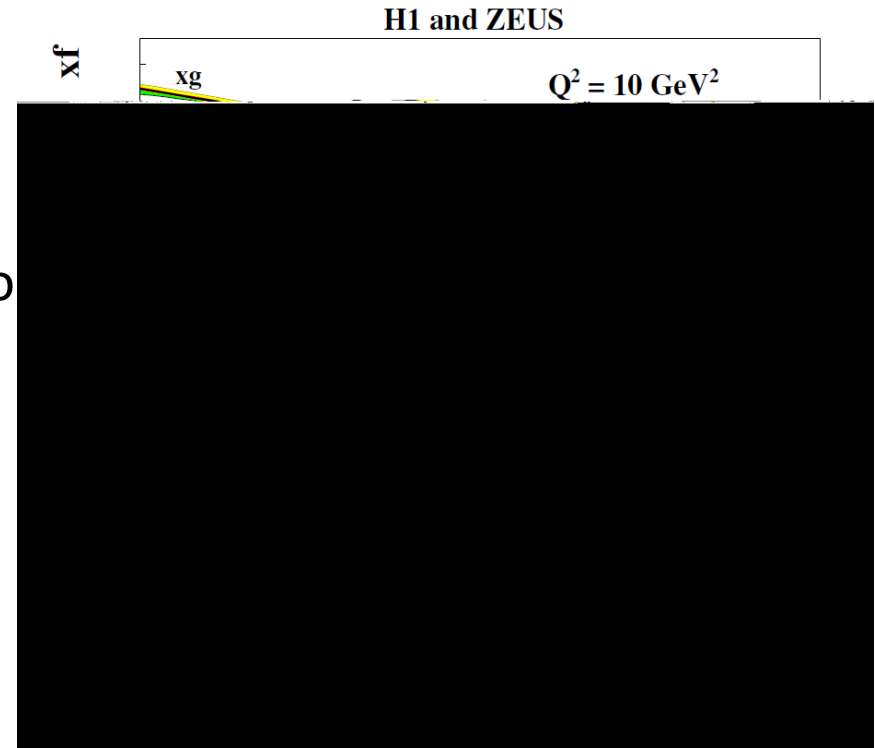
A.B., G.L. Ma, accepted to Phys. Rev. Lett.

G.L. Ma, A.B., Phys. Lett. B739 (2014) 209

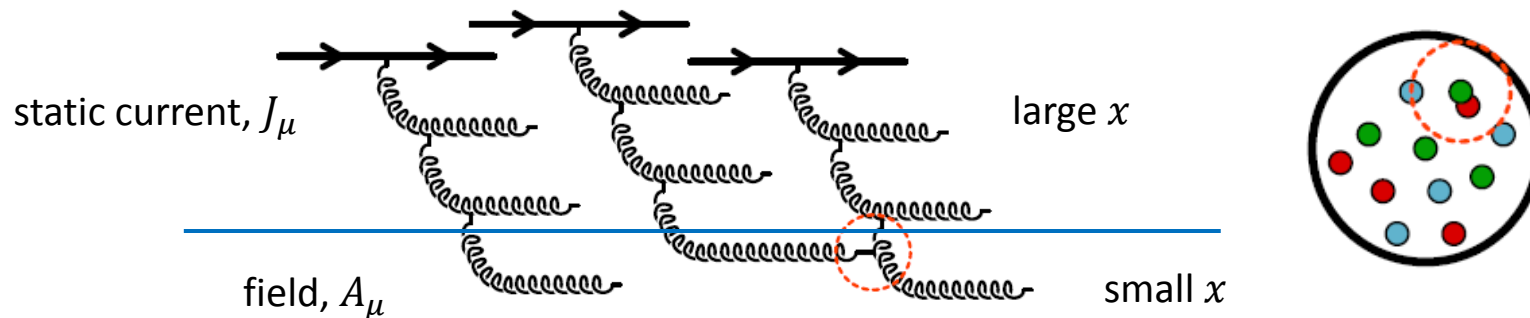
Color Glass Condensate (CGC) – efektywny opis gluonów z małym x



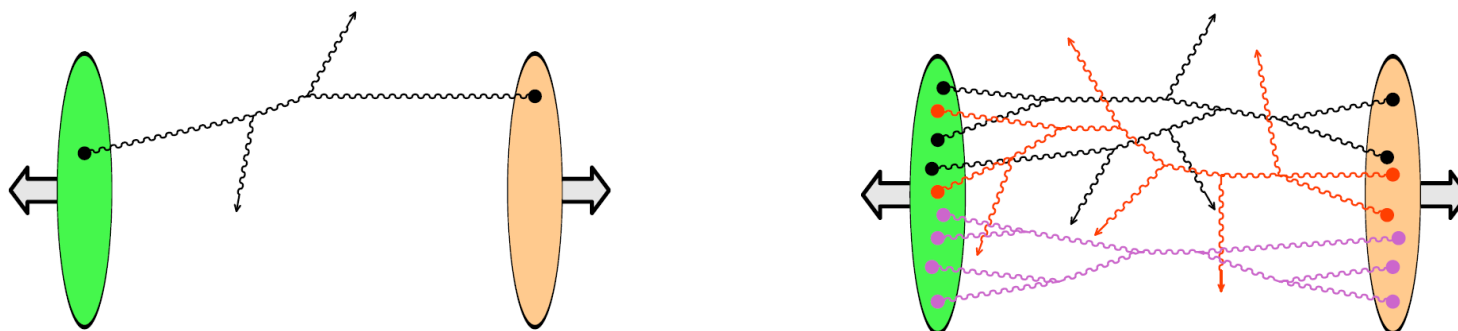
- dylatacja czasu, partony żyją dłużej
- x to jest ułamek pędu protonu niesio przez kwark lub gluon
- dla małych x , mamy dużo gluonów



Partony zaczynają się przekrywać, **saturacja**



Ewolucja gluonów staje się nieliniowa



Konkluzje

Zderzenia jąder przez relatywistycznych energiach umożliwia badanie nowego stanu materii – **plazmy kwarkowo-gluonowej**.

Plazma z $T \approx 10^{12}$ K i $B \approx 10^{14}$ Tesli

Dobry opis za pomocą **hydrodynamiki** relatywistycznej.

Dobry opis za pomocą modeli **kaskadowych**

Wyniki w zderzeniach proton-proton i proton-jądro wyglądają bardzo podobnie do zderzeń jądro-jądro. Być może produkujemy najmniejsze kropelki gorącej plazmy?

Badania dają nadzieję na zrozumienie **chromodynamiki kwantowej** w obszarze nieperturbacyjnym.