

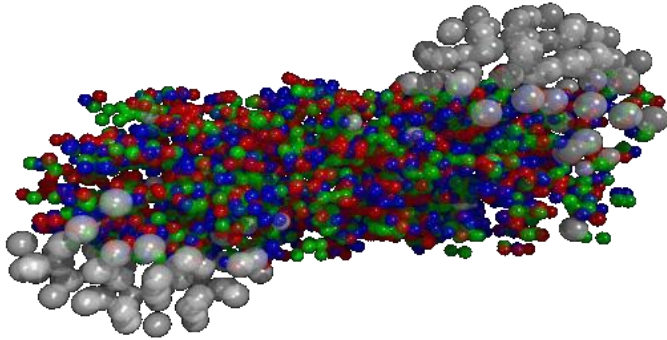
Płyn prawie doskonały

Piotr Bożek

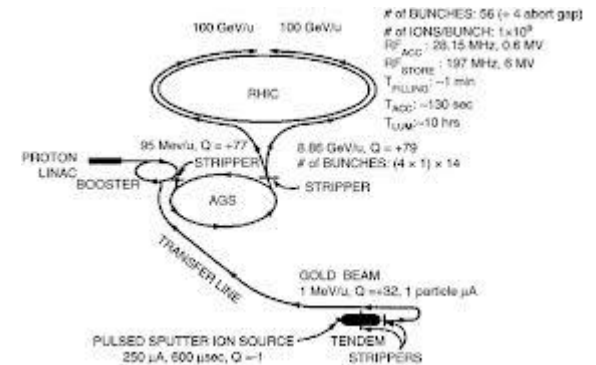


Plazma kwarkowo-gluonowa

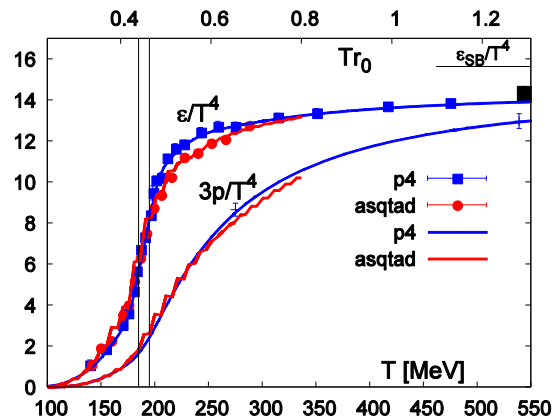
URQMD



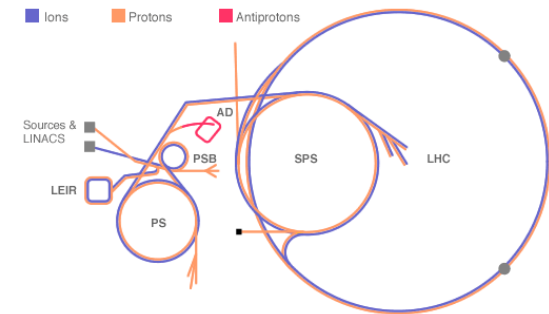
RHIC - 7-200GeV PHENIX, STAR



QCD na sieci

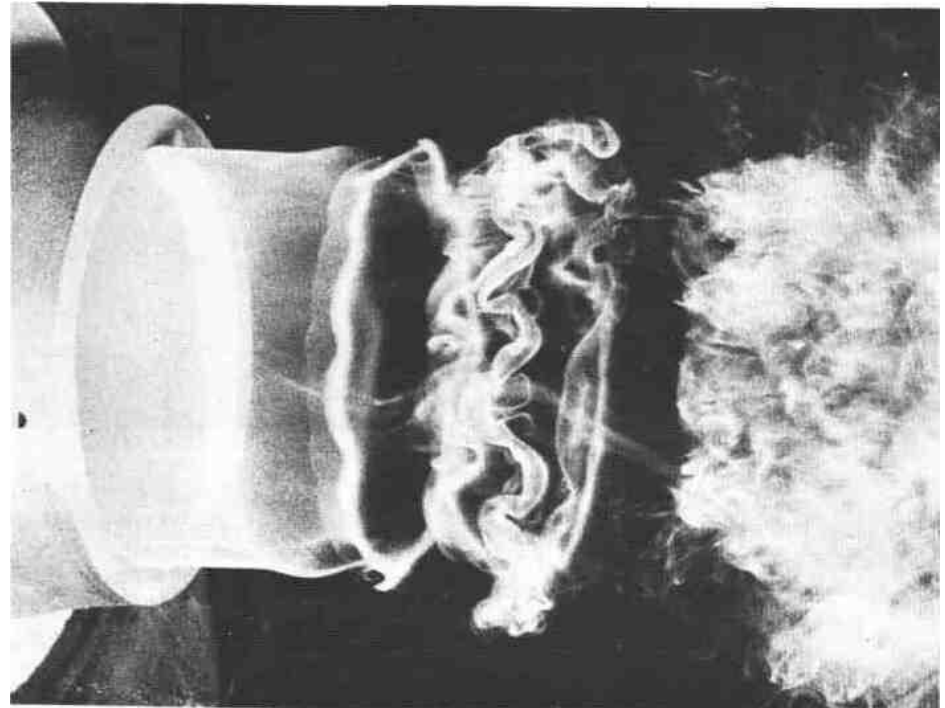


LHC - 2760GeV ALICE, ATLAS, CMS



Płyny

- ośrodek ciągły
- własności:
gęstość, temperatura,
ciśnienie $\rho(t, x, y, z)$
- przepływ: pole
prędkości
 $\vec{v}(t, x, y, z)$

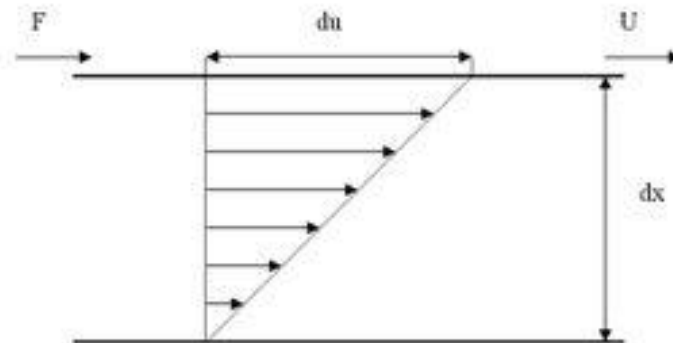


mechanika płynów

- Równanie Naviera-Stokesa

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{v}$$

- Lepkość η



lepkość

płyn	η [Pa s]
woda	$2.9 \cdot 10^{-4}$
miód	10000
^4He	10^{-6}
^6Li	$<10^{-15}$
plazma kw.-gl.	$<2 \cdot 10^{11}$

Płyn idealny (płyn doskonały) – płyn bez lepkości

Skalowana lepkość

$$\frac{\eta}{s}$$

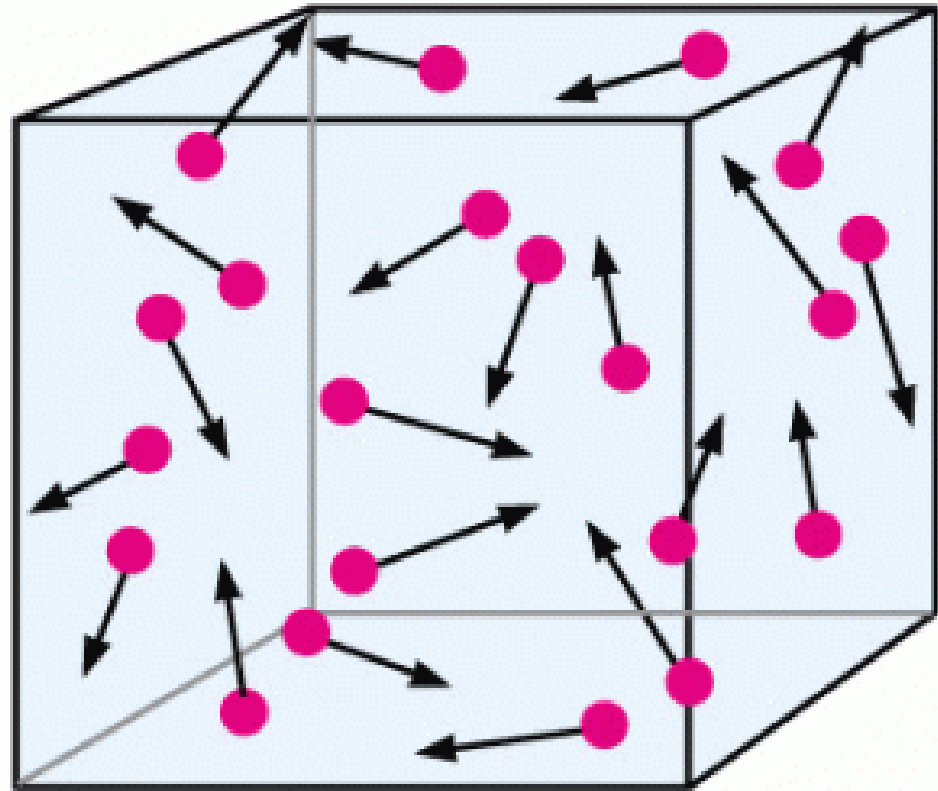
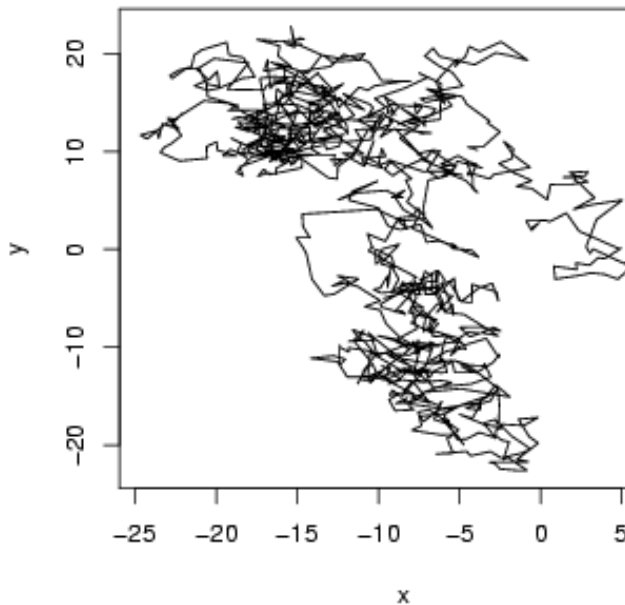
płyn	η / s [\hbar]
woda	8.2
miód	$5 \cdot 10^7$
^4He	1.9
^6Li	<0.5
plazma kw.-gl.	<0.3

lepkość kinetyczna

$$\frac{\eta}{\rho}$$

Teoria kinetyczna

- Ruchy Browna



Lepkość w teorii kinetycznej

$$\eta = \frac{1}{3} n p l_{mf}$$

$$L_{mf} = 0$$

załamanie teorii kinetycznej

sznyczoński przekrój
czynnny

Najmniejsza lepkość

- Zasada Heisenberga

$$\eta / s \geq 0.09$$

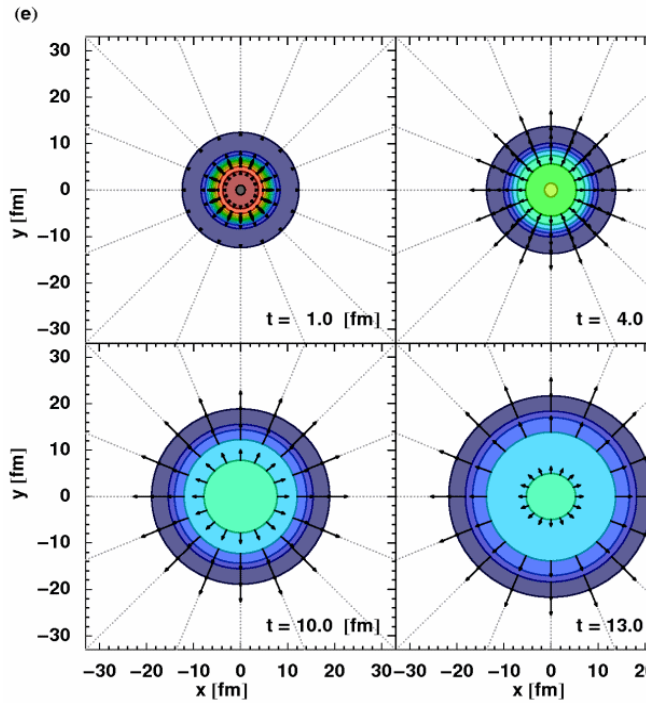
- $l_{mf} > n^{1/3}$

$$\eta / s \geq 0.16$$

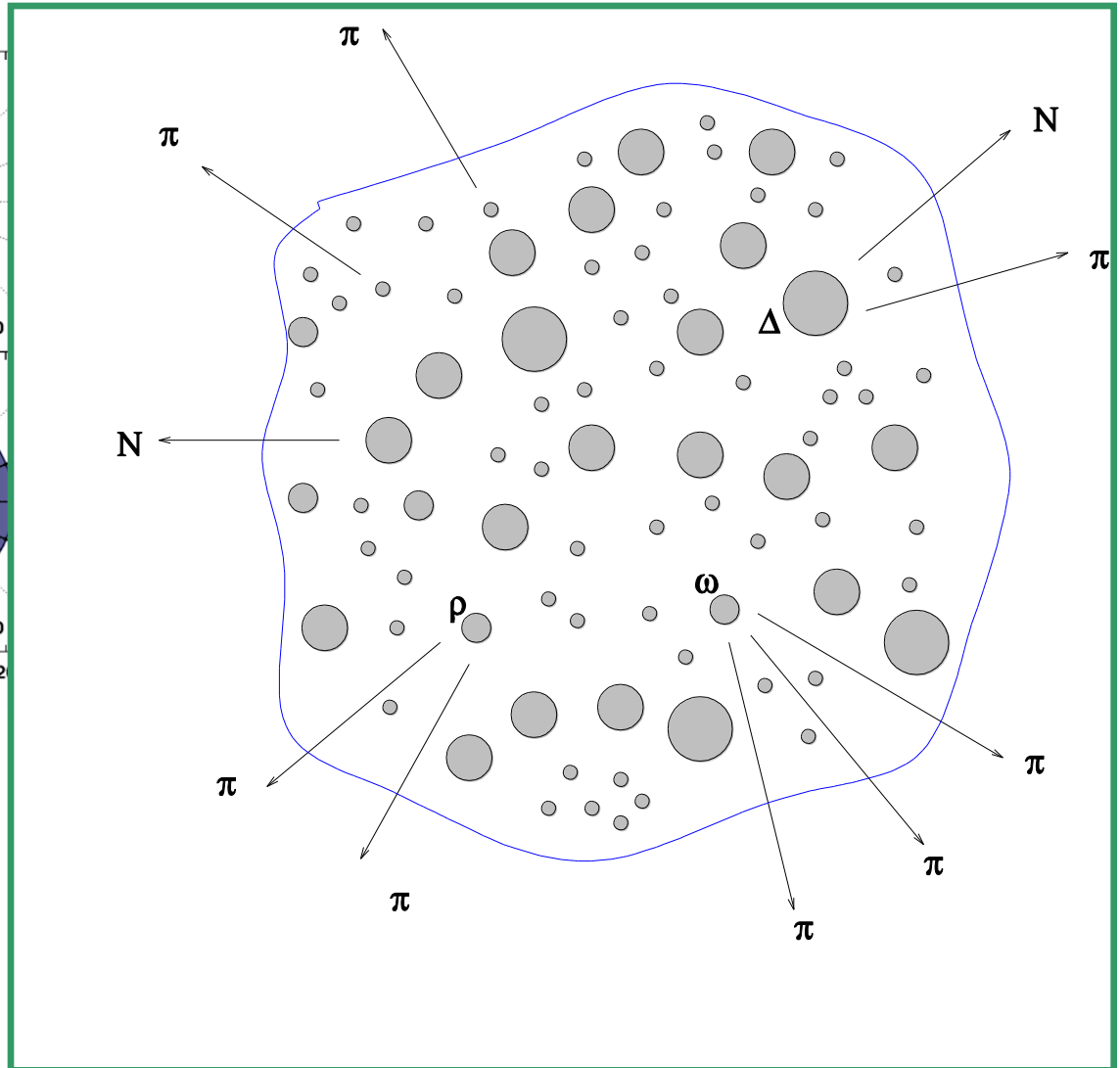
- Modele teorii pola

$$\eta / s \geq \frac{1}{4\pi} = 0.08$$

model hydrodynamiczny



M. Chojnacki



hydrodynamika płynu doskonałego

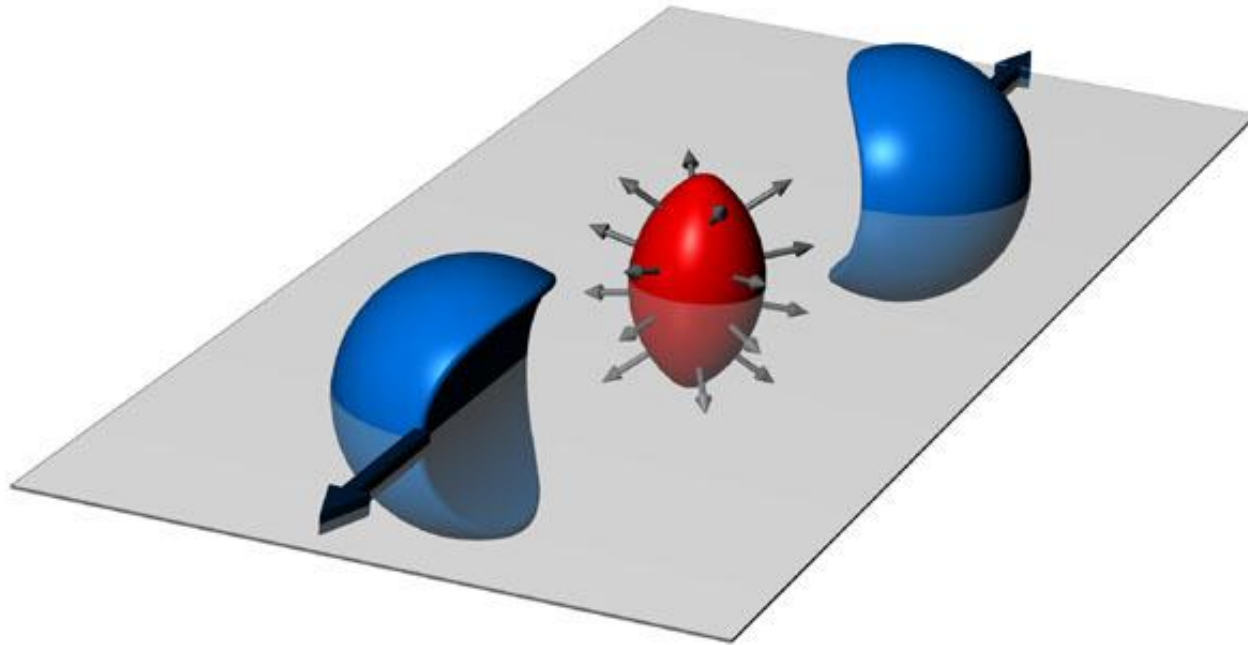
- 4 równania hydrodynamiki relatywistycznej

$$\dot{\varepsilon} = -(\varepsilon + p)\partial_{\mu}u^{\mu}$$

$$(\varepsilon + p)\dot{u}^{\mu} = \nabla^{\mu} p$$

- równanie stanu
- warunki początkowe

Przepływ kolektywny

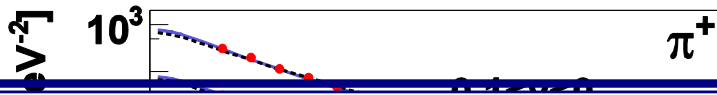


$$\frac{dN}{d^2 p dy} = \frac{dN}{2\pi p dp} (1 + 2v_1 \cos(\varphi - \Psi_1) + 2v_2 \cos(2\varphi) + 2v_3 \cos(3(\varphi - \Psi_3)) \dots)$$

ukierunkowany eliptyczny trójkątny

Zderzenia Au-Au na RHIC-u

silny przepływ kolektywny - płyn



The Nation

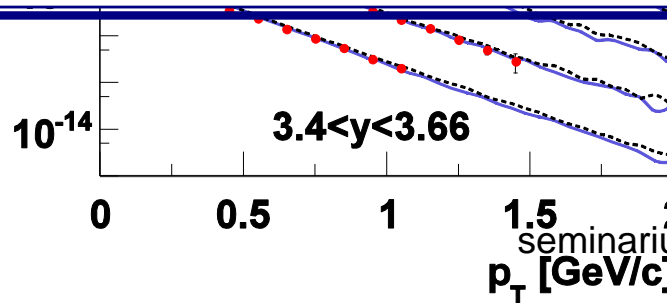
Atom Smasher Yields 'Perfect Fluid'

The unexpected finding could provide insight into the creation of the universe, scientists say.

April 19, 2005 | Thomas H. Maugh II, Times Staff Writer

Researchers smashing gold atoms together to mimic conditions in the first microseconds after the creation of the universe have observed an unexpected new state of matter.

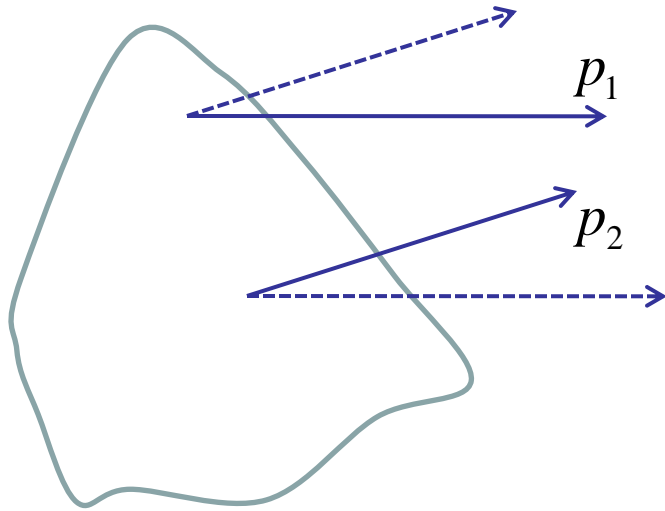
Instead of the thin, fiery gas of quarks and gluons that they expected, they found instead a dense drop of the elementary particles that behaves like a hitherto unseen "perfect fluid."



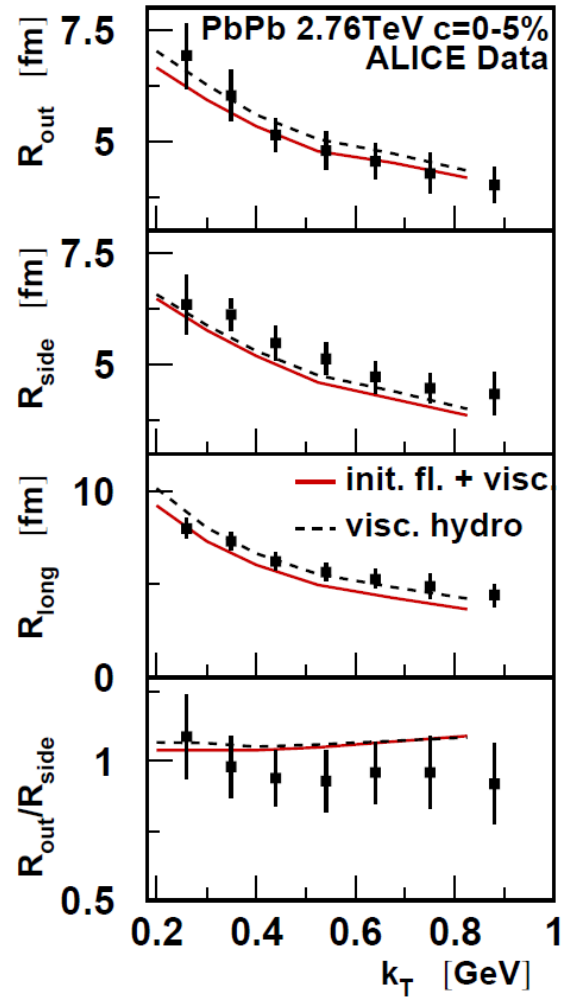
Transverse momentum p_T (GeV/c)

femtoscopia

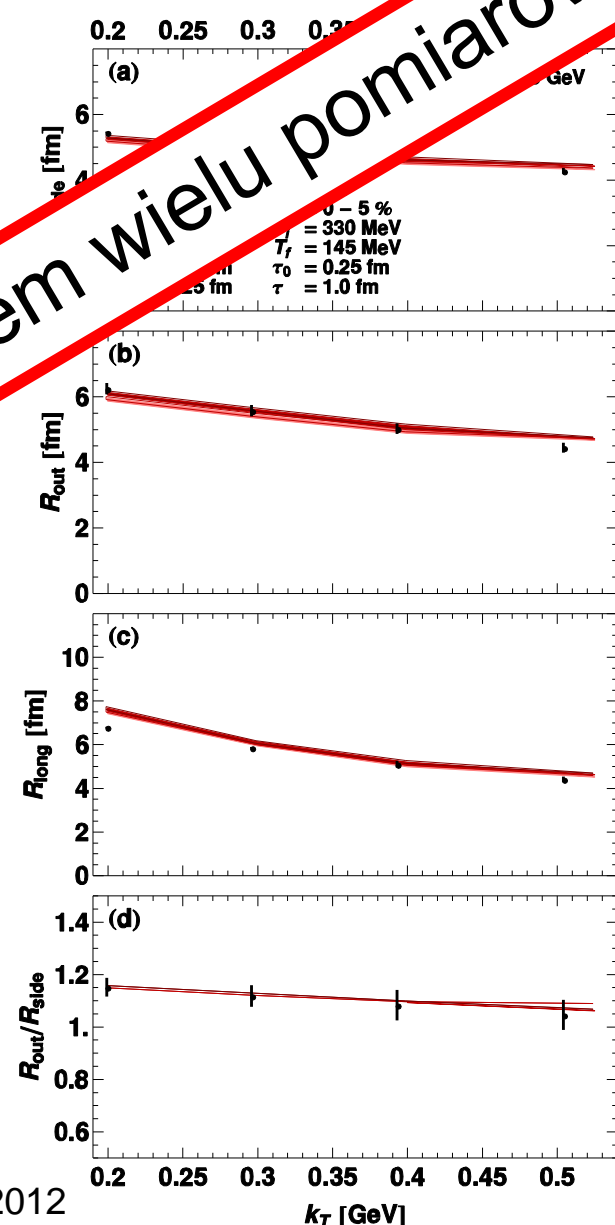
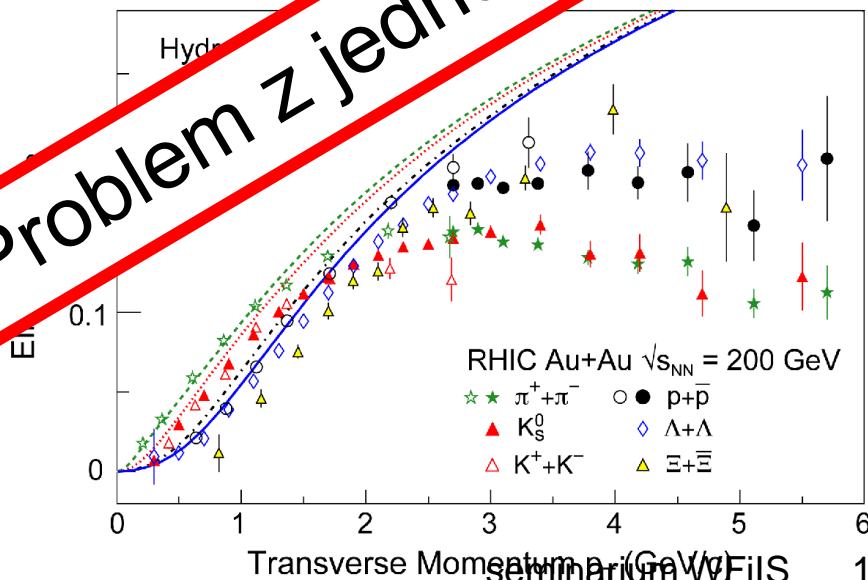
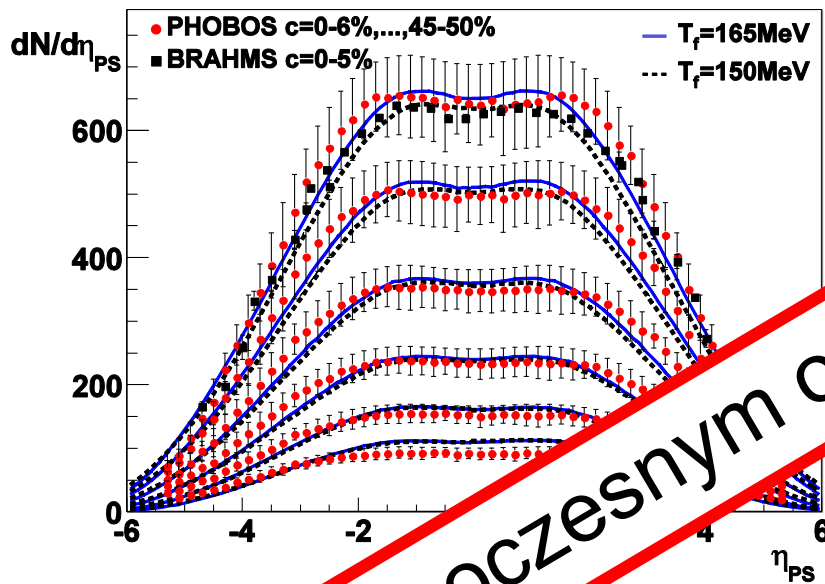
korelacje identycznych cząstek - $\pi^+ \pi^+$



$$C(p_1 - p_2) \rightarrow R_L, R_O, R_S$$



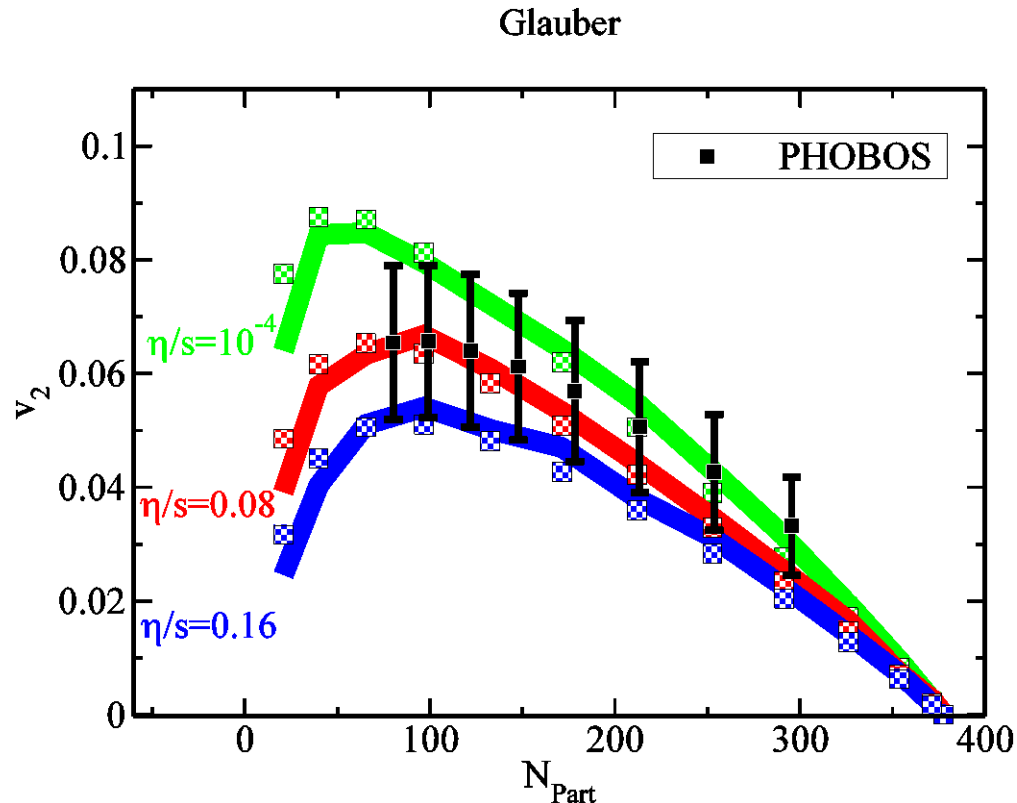
Wyniki hydrodynamiki płynu doskonałego



Problem z jednoczesnym opisem wielu pomiarów

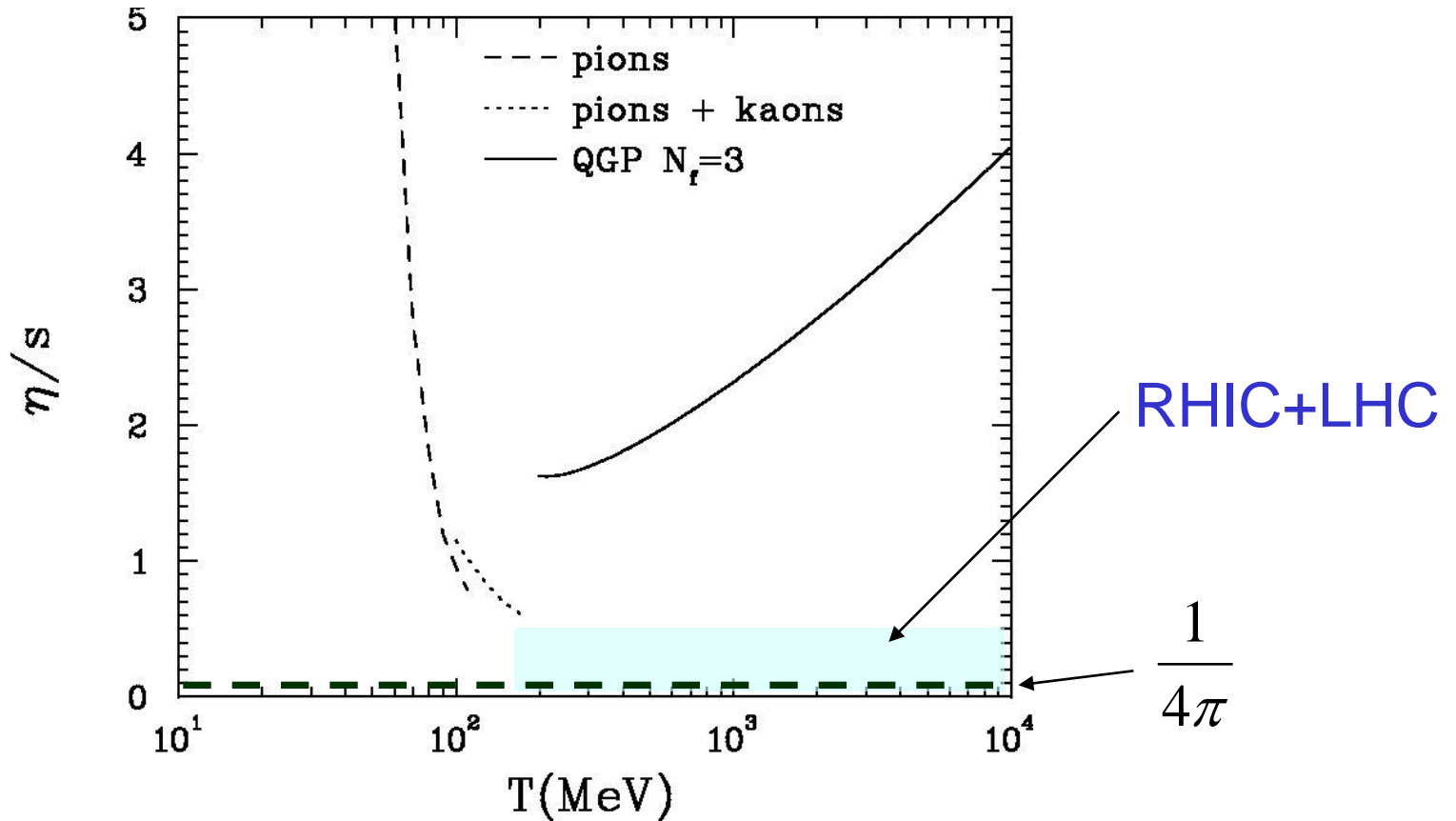
Oszacowanie lepkości plazmy

- wymaga policzenia modelu hydrodynamicznego z lepkością
- najsilniejszy efekt na przepływ eliptyczny



Lepkość plazmy kwarkowo-gluonowej

- zbyt duża lepkość z rachunków perturbacyjnych



Równania lepkiej hydrodynamiki

$$\dot{\varepsilon} = -(\varepsilon + p + \Pi)\partial_{\mu}u^{\mu} + \pi_{\mu\nu}\nabla^{\langle\mu}u^{\nu\rangle}$$

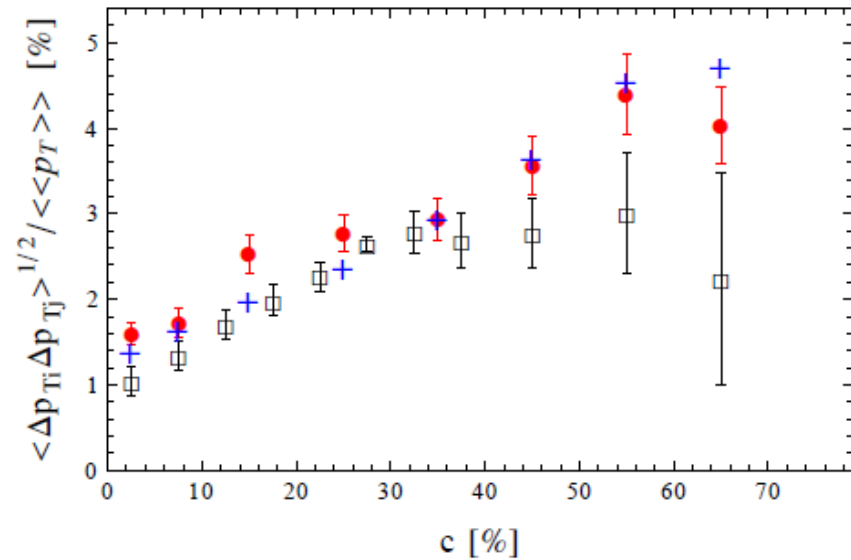
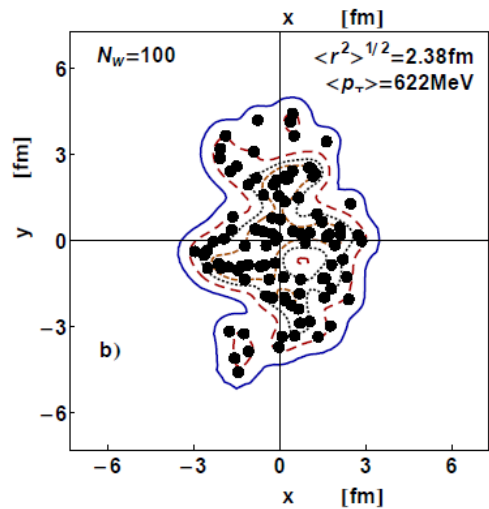
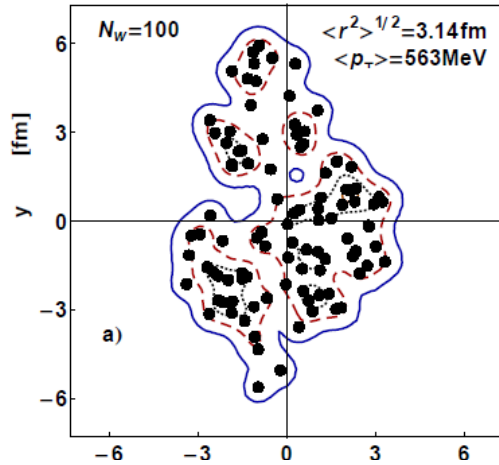
$$(\varepsilon + p + \Pi)\dot{u}^{\mu} = \nabla^{\mu}(p + \Pi) - \Delta^{\mu\nu}\nabla^{\alpha}\pi_{\nu\alpha} + \pi^{\mu\nu}\dot{u}_{\nu}$$

$$\dot{\Pi} = \frac{1}{\tau_{\Pi}} \left[-\Pi - \zeta\partial_{\mu}u^{\mu} - \Pi\zeta T\partial_{\mu}\left(\frac{\tau_{\Pi}u^{\mu}}{2\zeta T}\right) \right]$$

$$\Delta_{\alpha\mu}\Delta_{\beta\nu}\dot{\pi}^{\mu\nu} = \frac{1}{\tau_{\pi}} \left[2\eta\nabla_{\langle\alpha}u_{\beta\rangle} - \pi_{\alpha\beta} + \pi_{\alpha\beta}\eta T\partial_{\mu}\left(\frac{\tau_{\pi}u^{\mu}}{2\eta T}\right) \right]$$

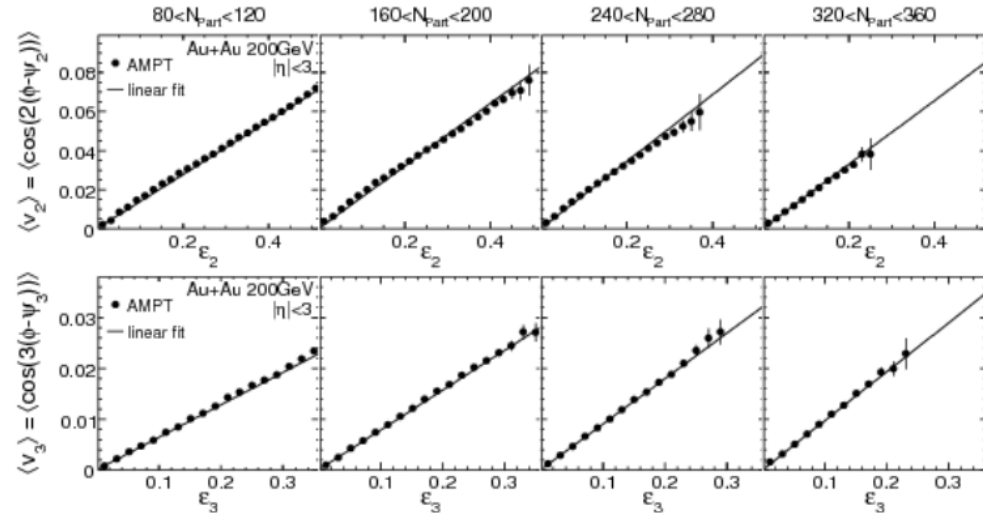
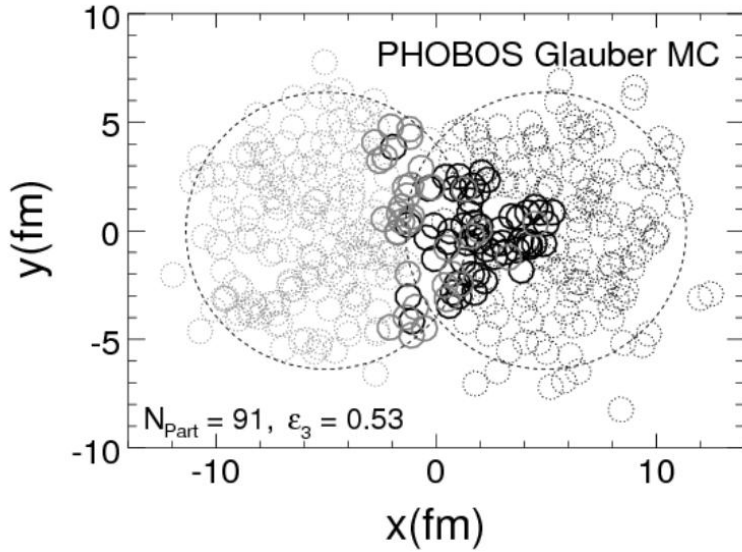
14 równań (lepkość η i lepkość objętościowa ζ)

Fluktuacje kształtu i rozmiaru

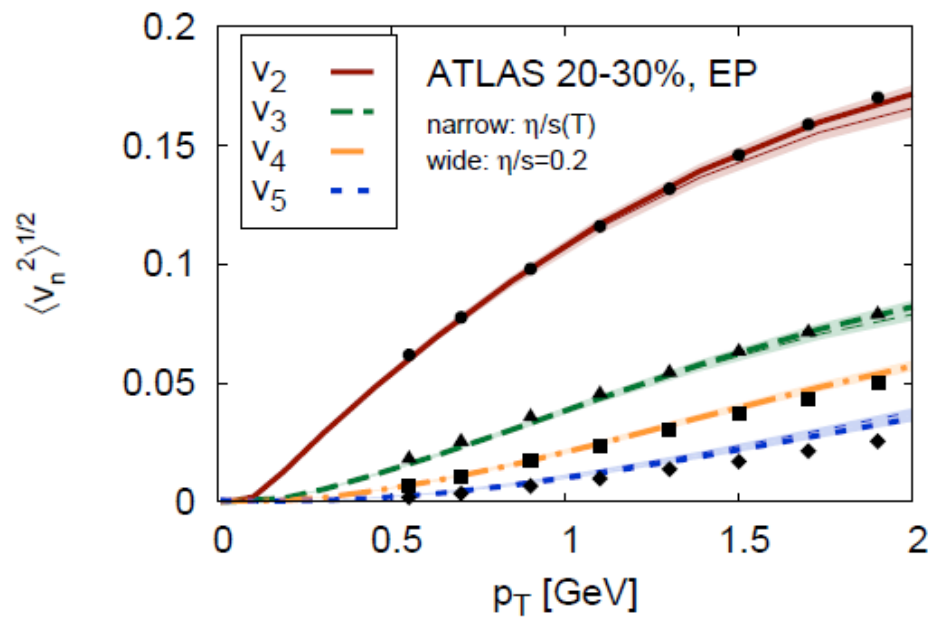
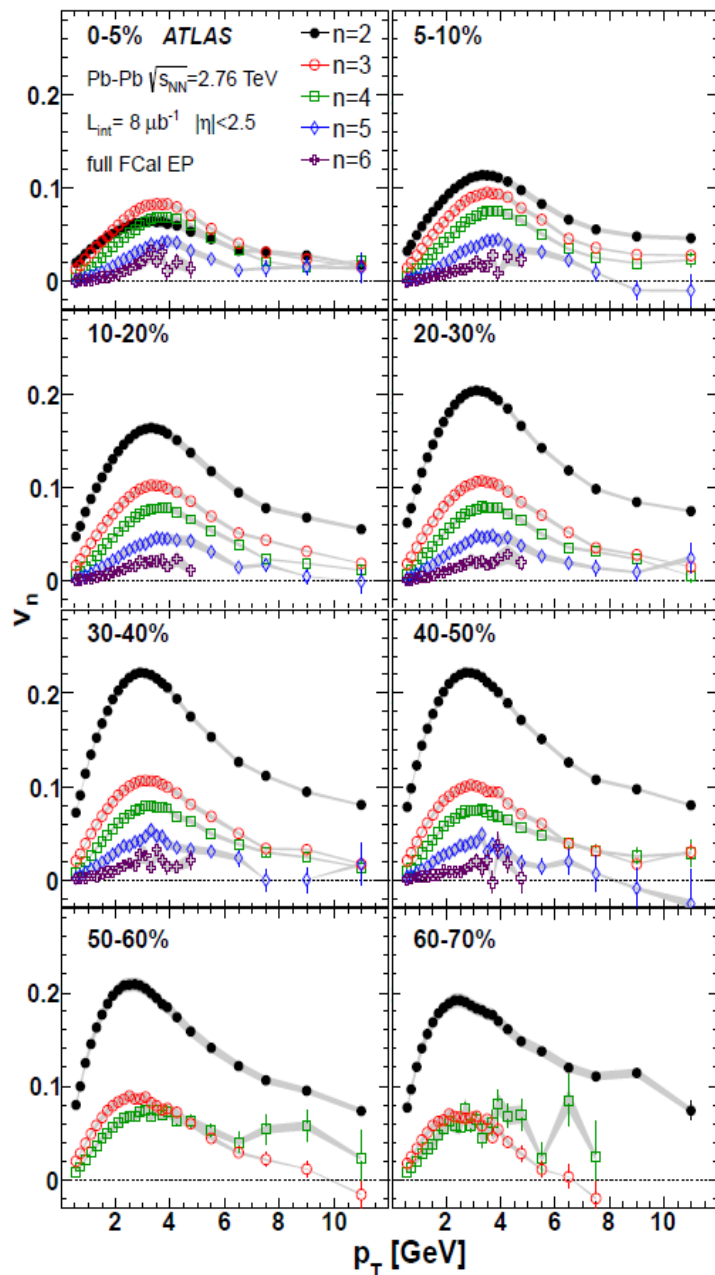


fl. rozmiaru \longrightarrow fl. pędu

Nieparzyste składowe z fluktuacji – triangular flow



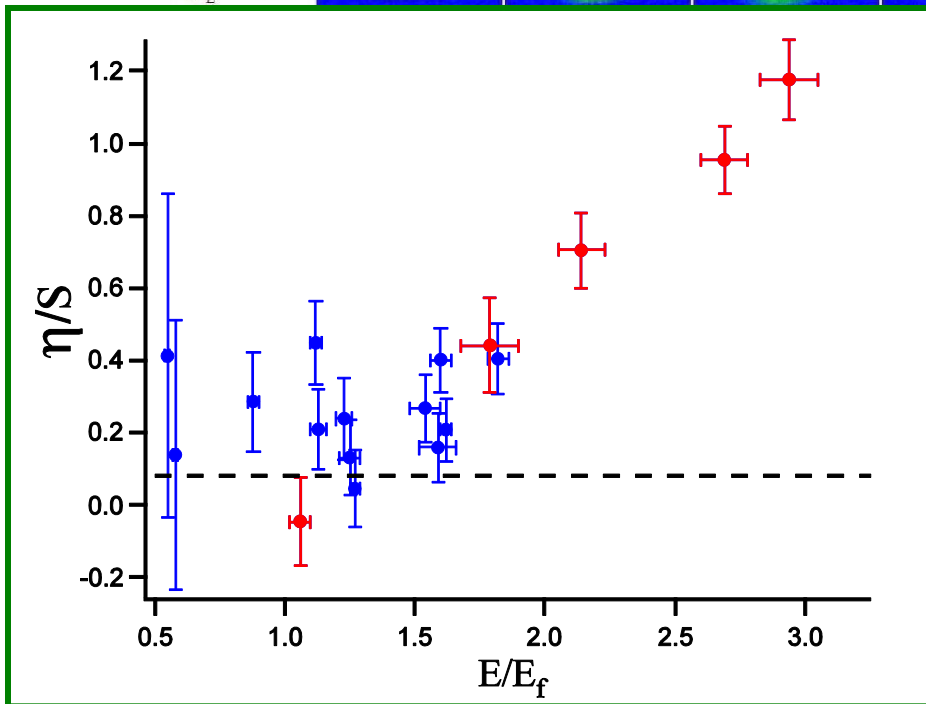
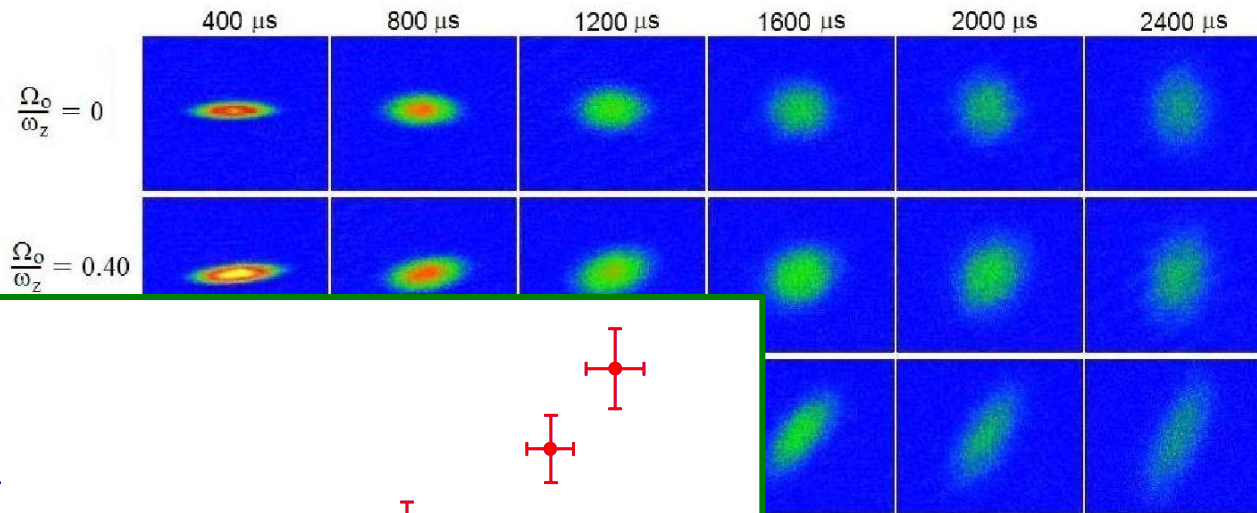
B. Alver, G. Roland



C. Gale et al.

${}^6\text{Li}$ w pułapce optycznej

$T=2 \cdot 10^{-5}\text{K}$

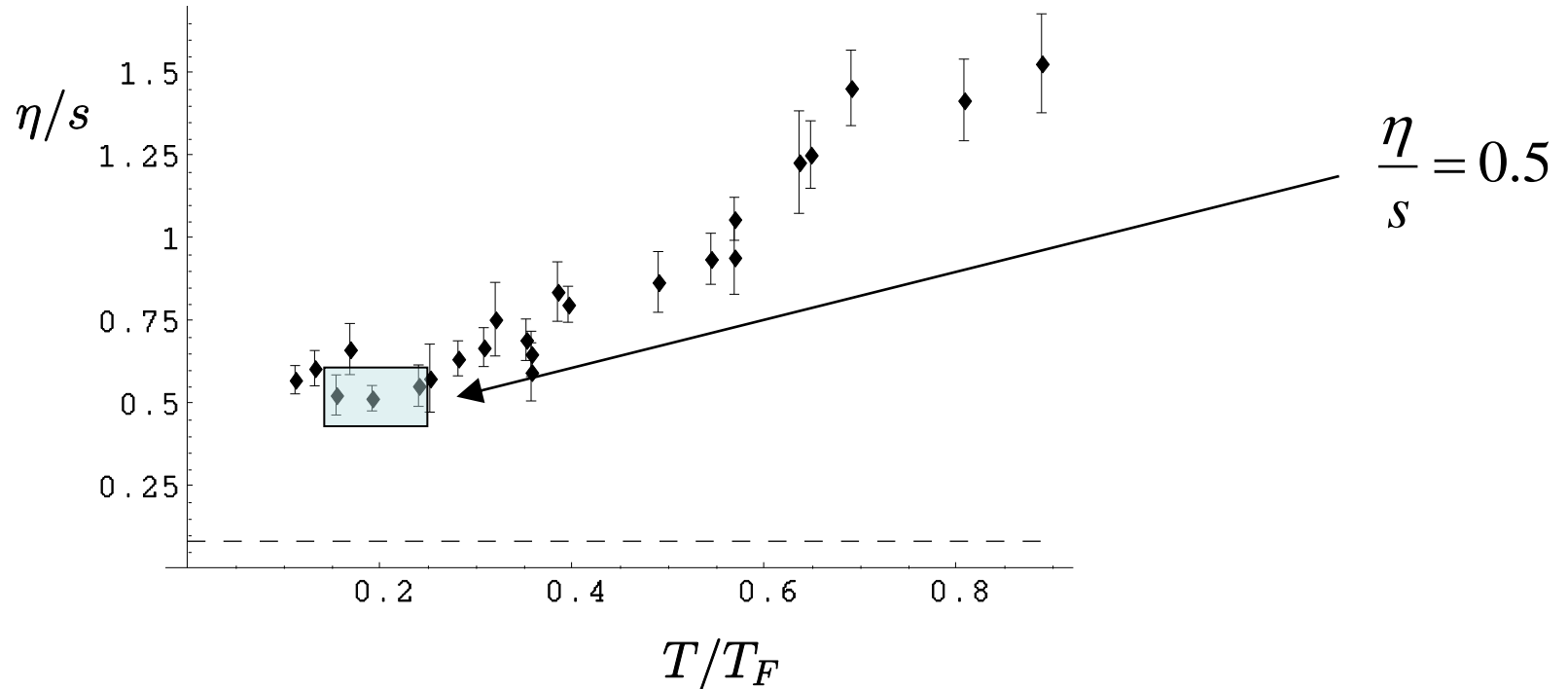
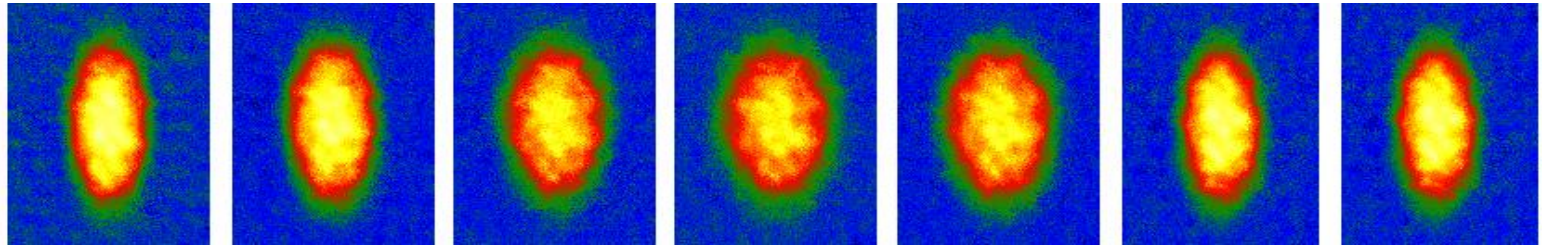


$$0.1 \leq \eta/s \leq 0.5$$

QMC (Włazowski, Magierski, Drut)

$$\eta/s = 0.2$$

Tłumienie wzbudzeń radialnych kropli ${}^6\text{Li}$



Płyny doskonałe

- ${}^6\text{Li}$ w temperaturze zimny, rzadki
silne oddziaływania

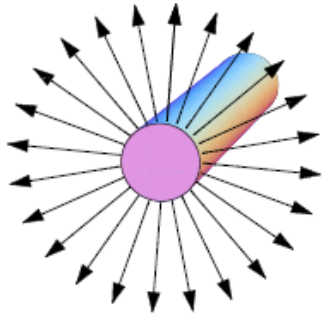
$$T = 2 \cdot 10^{-5} \text{K}$$

- Plazma kwarkowo-gluonowa
silnie oddziałująca, gęsta, gorąca

$$T = 2 \cdot 10^{12} \text{K}$$

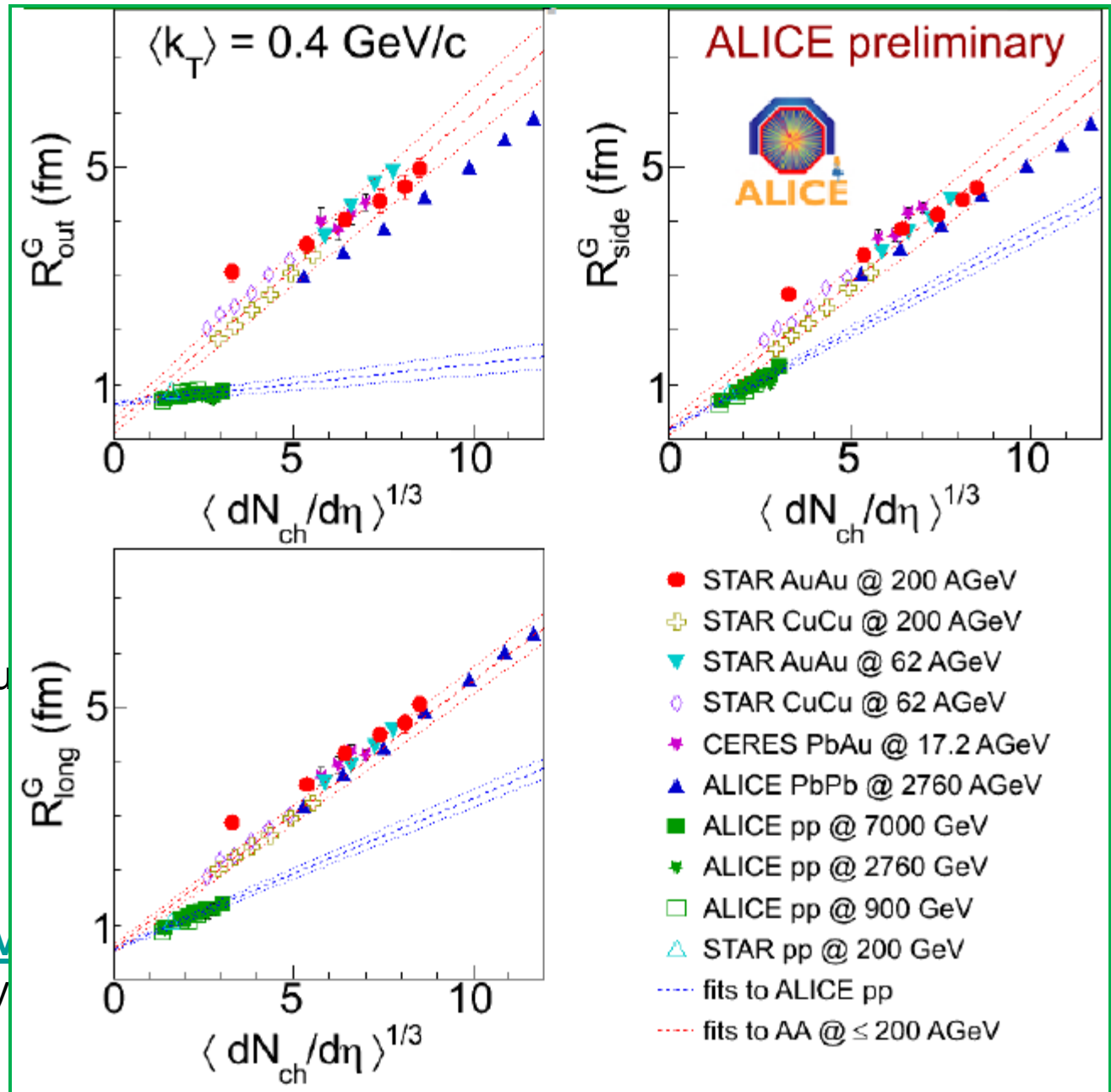
Mechanika falowa, silne sprzężenie - płyn doskonały





duża gęstość + flu

P.Bozek, [arXiv](#)
J. Casalderrey



$\frac{\sqrt{\pi}}{2}$

Rachunki hydrodynamiczne

- **2+1 wym. płyn doskonały** (wiele rachunków) (Chojnacki, Florkowski 2006-10)

P. Bożek, M. Chojnacki, W. Florkowski, B. Tomasik, Phys. Lett. B694 (2010) 238

- **3+1 wym. płyn doskonały** (kilka grup na świecie)

P. Bożek, I. Wyskiel, Phys. Rev. C79 (2009) 044916

P. Bożek, I. Wyskiel, Phys. Rev. C81 (2010) 054902

P. Bożek, I. Wyskiel, Phys. Rev. C83 (2011) 024910

P. Bożek, W. Broniowski, J. Moreira, Phys.Rev. C83 (2011) 034911

- **2+1 wym. płyn z lepkością** (kilka grup na świecie)

P. Bożek, Phys. Rev. C81 (2010) 034909

P. Bożek, Phys. Rev. C83 (2011) 044910

P. Bożek, Phys. Lett. B699 (2011) 283

- **3+1 wym. płyn z lepkością** (grupa BNL-McGill, B. Schenke...)

P. Bożek, Phys.Rev. C85 (2012) 034901

P. Bożek, Phys.Rev. C85 (2012) 014911

P. Bożek, W. Broniowski, Phys.Rev. C85 (2012) 044910

P. Bożek, I. Wyskiel, Phys.Rev. C85 (2012) 064915

P. Bożek, W. Broniowski, Phys.Rev. Lett. 109 (2012) 062301

P. Bożek, Phys. Lett. B717 (2012) 287

event by event