

# Fizyka zderzeń relatywistycznych jonów

– kilka pytań i możliwe odpowiedzi

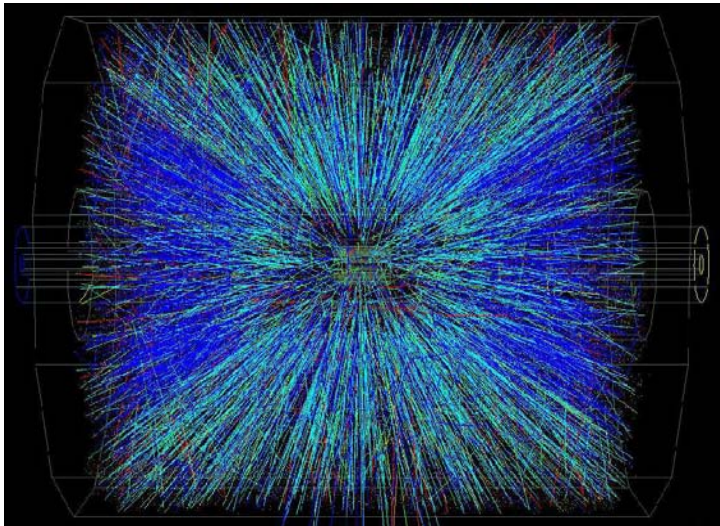
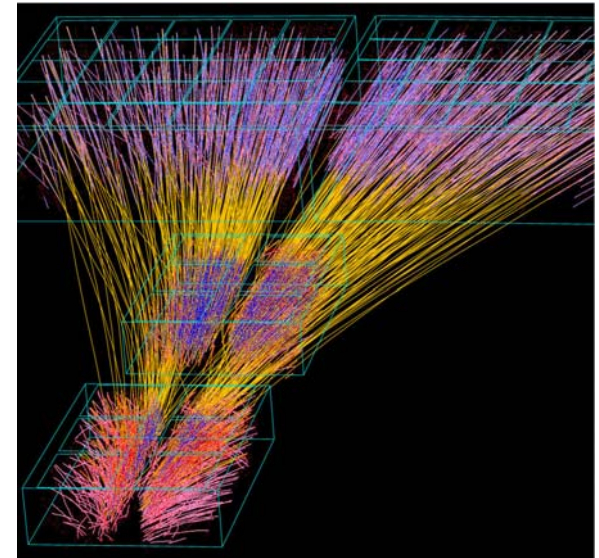
**Stanisław Mrówczyński**

*Uniwersytet Jana Kochanowskiego, Kielce  
& Instytut Problemów Jądrowych, Warszawa*

# Programy eksperymentalne

- **AGS** – Alternating Gradient Synchrotron, BNL  
eksperymenty ze spoczywającą tarczą, energia wiązki 15 AGeV
- **SPS** – Super Proton Synchrotron, CERN  
eksperymenty ze spoczywającą tarczą, energia wiązki 20-160 AGeV
- **RHIC** – Relativistic Heavy-Ion Collider, BNL  
przeciwbieżne wiązki, energia zderzenia 100+100 AGeV

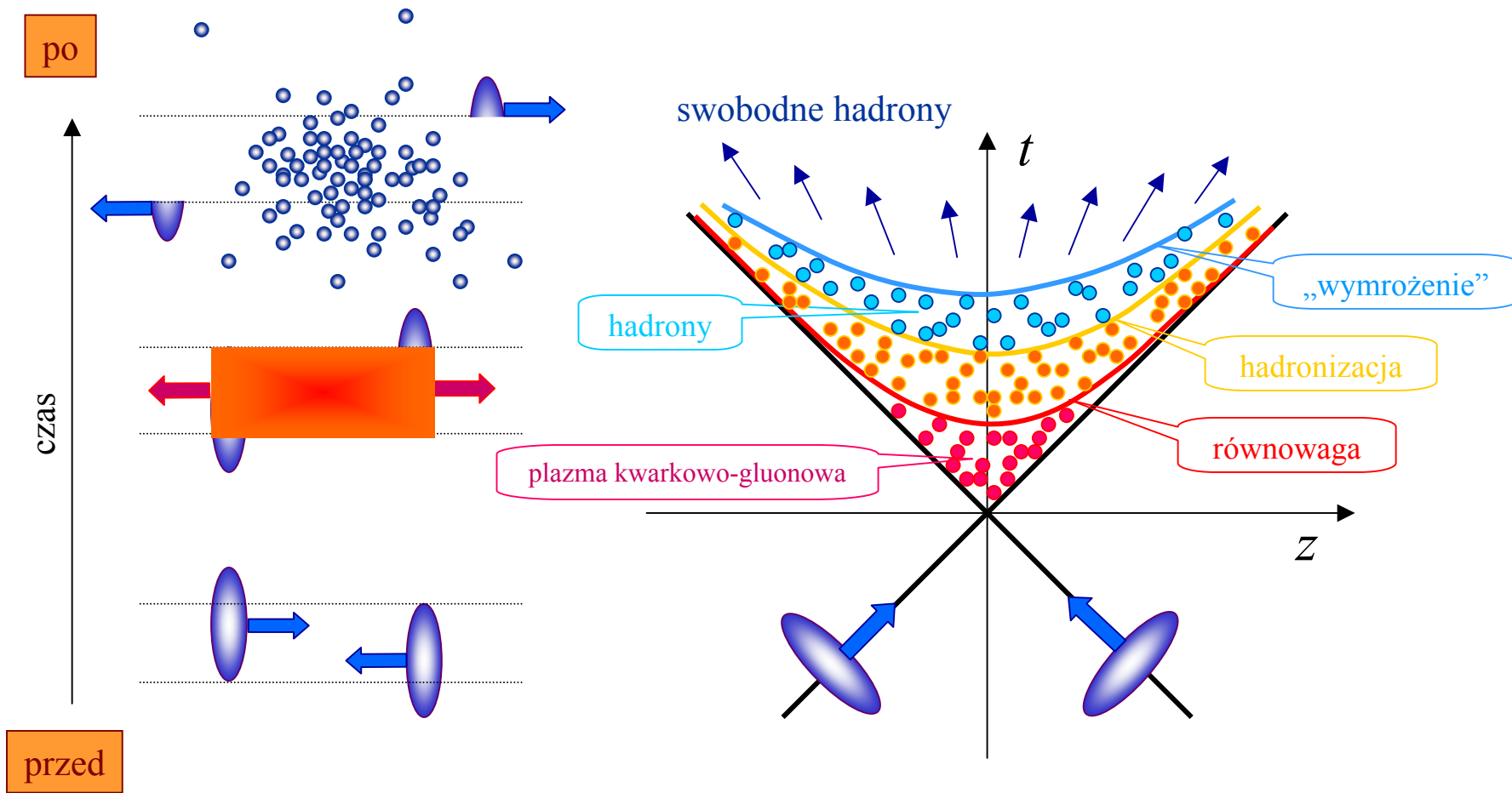
Eksperyment  przy SPS  
Pb–Pb @ 158 AGeV



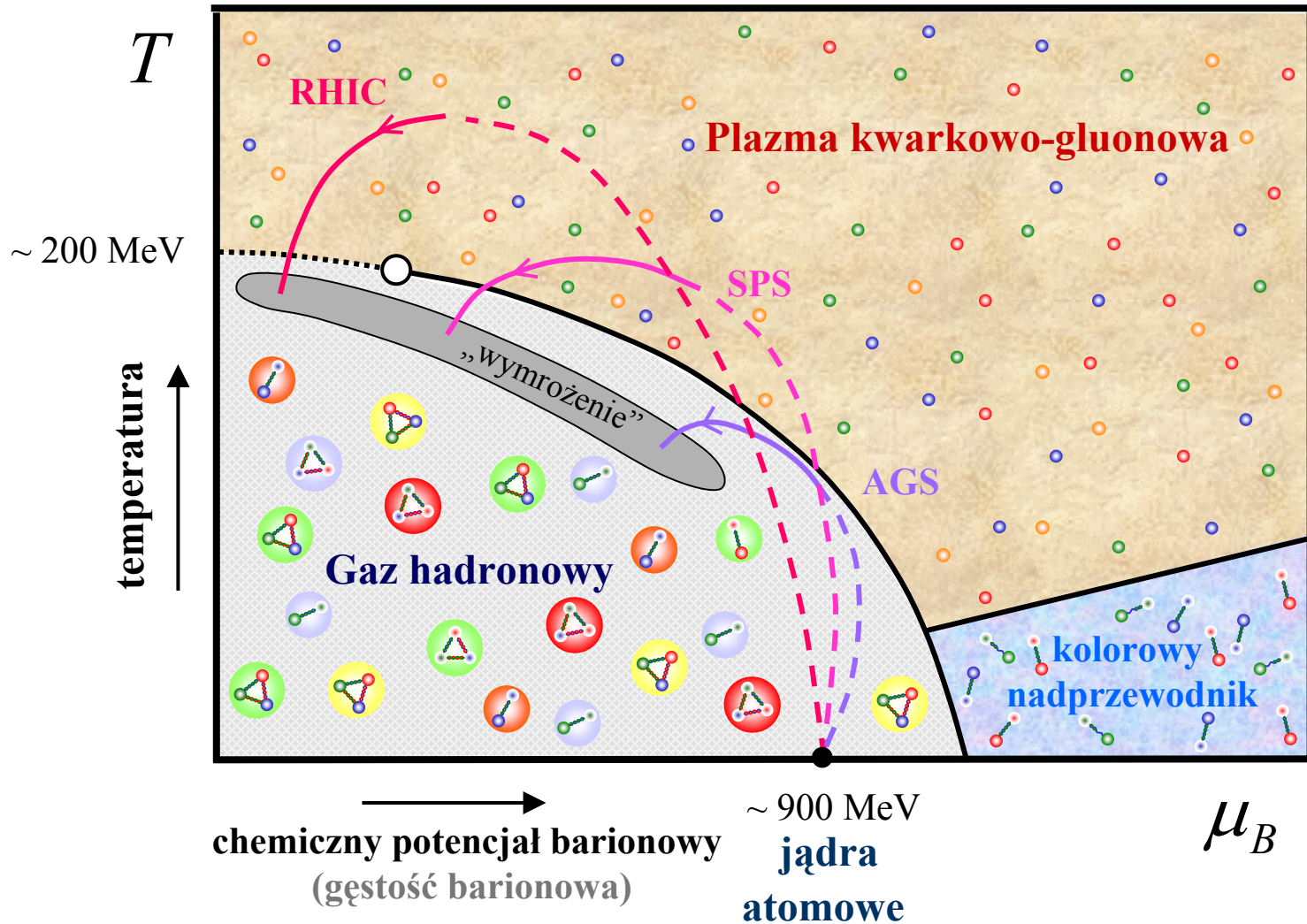
Eksperyment  przy RHIC

Au–Au @  $\sqrt{s_{NN}} = 200$  GeV

# Scenariusz zderzenia relatywistycznych jonów



# Diagram fazowy



# Równowaga termodynamiczna

Eksperyment sugeruje, że

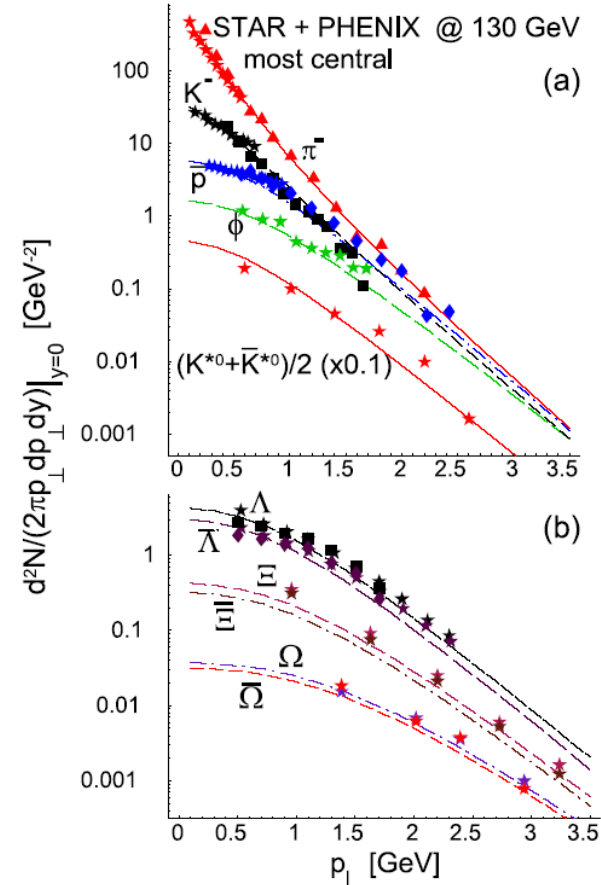
Materia produkowana w zderzeniach relatywistycznych jonów osiąga stan lokalnej równowagi termodynamicznej

# Równowaga późnej fazy

## Au-Au @ 130 GeV w Termalnym Modelu Krakowskim

skład chemiczny

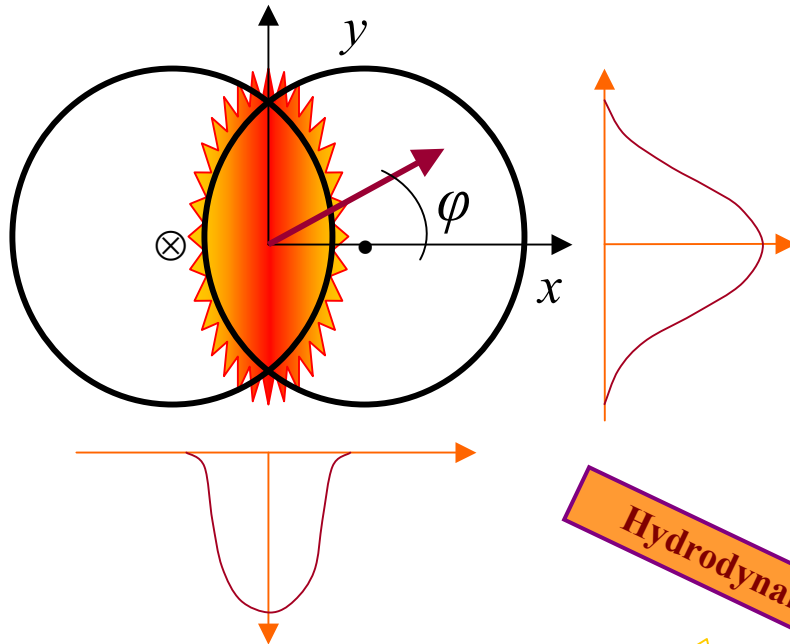
	Model	Experiment
Fitted thermal parameters		
$T$ [MeV]	$165 \pm 7$	
$\mu_B$ [MeV]	$41 \pm 5$	
$\mu_S$ [MeV]	9	
$\mu_I$ [MeV]	-1	
$\chi^2/n$	0.97	
Ratios used for the fit		
$\pi^-/\pi^+$	1.02	$1.00 \pm 0.02$ [47], $0.99 \pm 0.02$ [48]
$\bar{p}/\pi^-$	0.09	$0.08 \pm 0.01$ [49]
$K^-/K^+$	0.92	$0.88 \pm 0.05$ [50], $0.78 \pm 0.12$ [51] $0.91 \pm 0.09$ [47], $0.92 \pm 0.06$ [48]
$K^-/\pi^-$	0.16	$0.15 \pm 0.02$ [50]
$K_0^*/h^-$	0.046	$0.060 \pm 0.012$ [50, 52] later: $0.042 \pm 0.011$ [41]
$K_0^{*0}/h^-$	0.041	$0.058 \pm 0.012$ [50, 52] later: $0.039 \pm 0.011$ [41]
$\bar{p}/p$	0.65	$0.61 \pm 0.07$ [49], $0.54 \pm 0.08$ [51] $0.60 \pm 0.07$ [47], $0.61 \pm 0.06$ [48]
$\Lambda/\Lambda$	0.69	$0.73 \pm 0.03$ [50]
$\Xi/\Xi$	0.76	$0.82 \pm 0.08$ [50]
Ratios predicted		
$\phi/h^-$	0.019	$0.021 \pm 0.001$ [53]
$\phi/K^-$	0.15	$0.1 - 0.16$ [53]
$\Lambda/p$	0.47	$0.49 \pm 0.03$ [54, 55]
$\Omega^-/h^-$	0.0010	$0.0012 \pm 0.0005$ [56]
$\Xi^-/\pi^-$	0.0072	$0.0085 \pm 0.0020$ [57]
$\Omega^+/\Omega^-$	0.85	$0.95 \pm 0.15$ [56]



rozkłady pędowe

# Strumień eliptyczny i równowaga wczesnej fazy

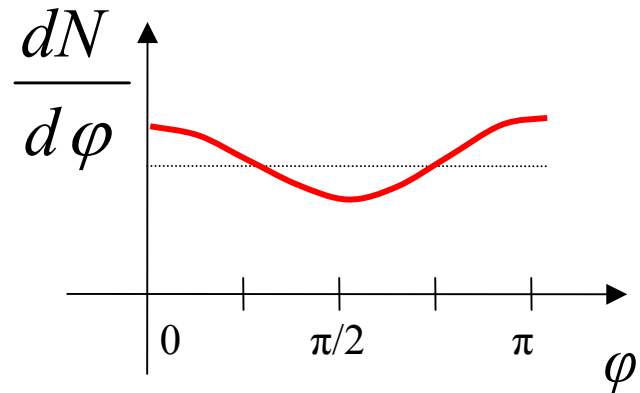
przestrzeń położeń



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

Hydrodynamika

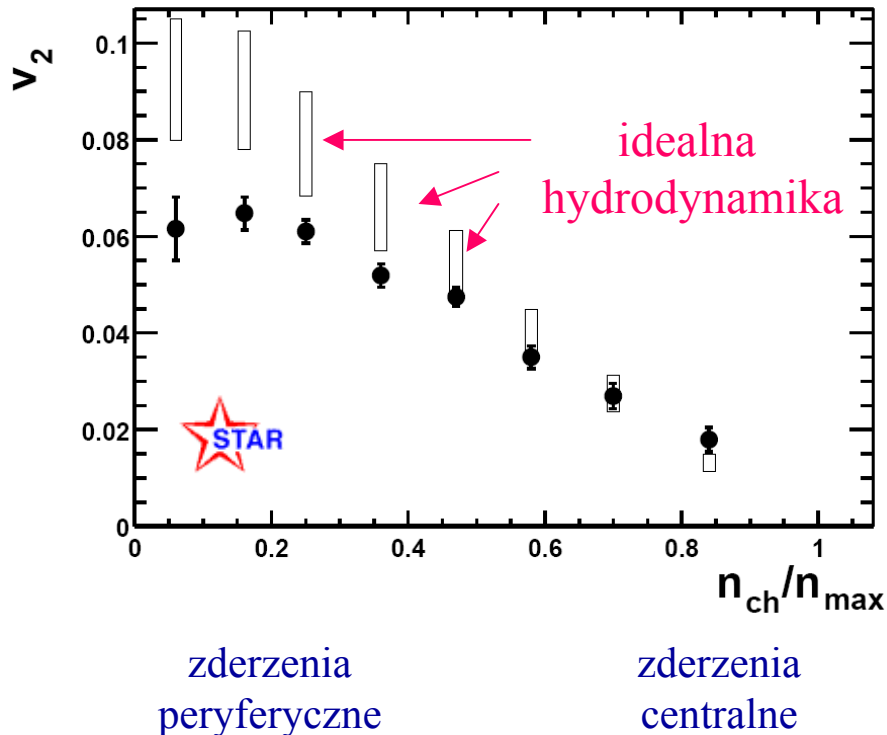
Opis hydrodynamiczny wymaga lokalnej równowagi termodynamicznej!



przestrzeń pędu

# Strumień eliptyczny i równowaga wczesnej fazy

Au-Au @ 130 GeV



$$\frac{dN}{d\varphi} = \frac{1}{2\pi} \left[ 1 + \sum_{n=0}^{\infty} v_n \cos(n(\varphi - \varphi_R)) \right]$$

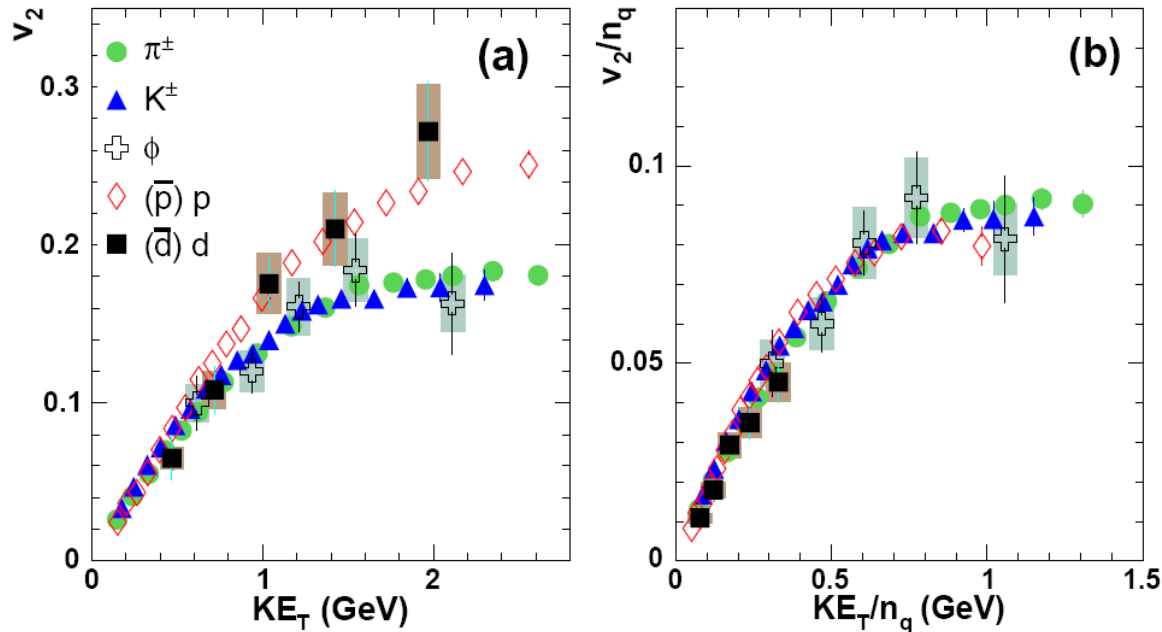
Hydrodynamika cieczy  
idealne dobrze działa  
dla zderzeń centralnych



# Strumień eliptyczny i równowaga wczesnej fazy

Au-Au @ 200 GeV

$$\frac{dN}{d\varphi} = \frac{1}{2\pi} \left[ 1 + \sum_{n=0}^{\infty} v_n \cos(n(\varphi - \varphi_R)) \right]$$



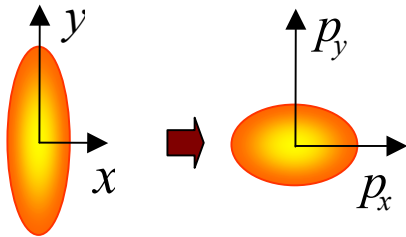
$$KE_T \equiv \sqrt{p_T^2 + m^2} - m$$

$n_q$  – liczba kwarków składnikowych

Strumień eliptyczny generowany  
jest w fazie kwarkowej

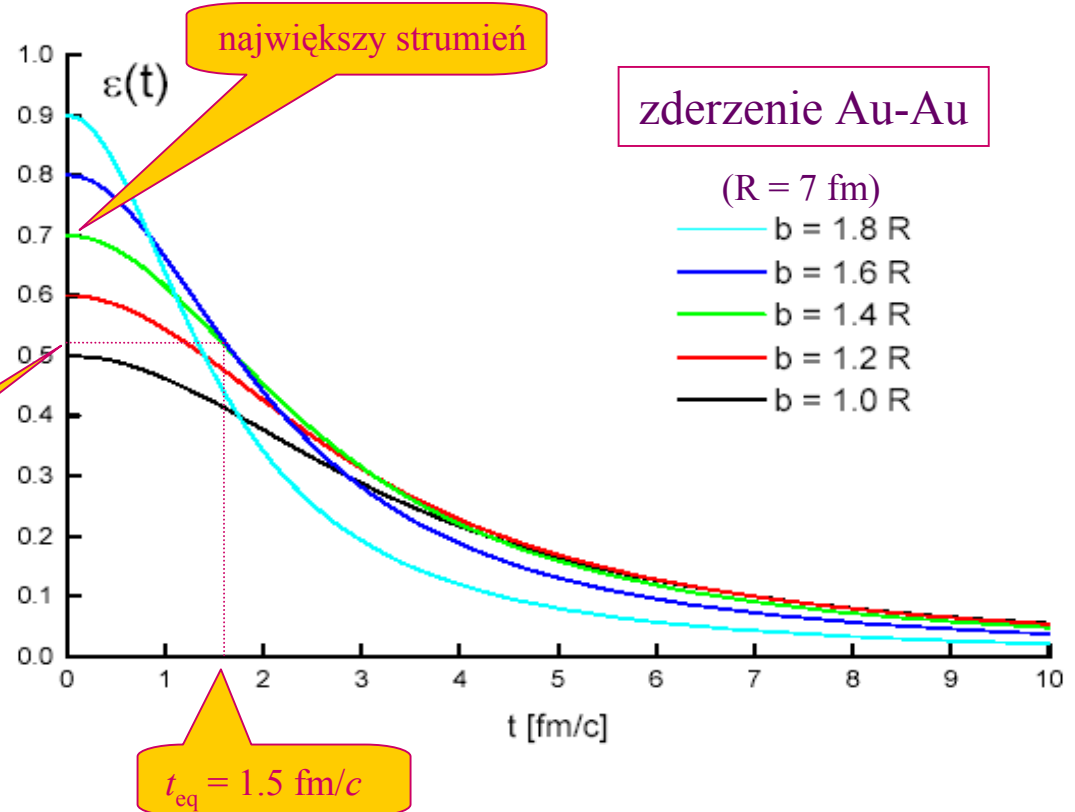
# Szybkość procesu termalizacji

$$v_2 \sim \varepsilon = \frac{\langle y^2 \rangle - \langle x^2 \rangle}{\langle y^2 \rangle + \langle x^2 \rangle}$$



Ekscentryczność zanika na skutek rozlotu cząstek

0.75  $v_2$



## Pierwszy wniosek i pierwsze pytanie

- Plazma kwarkowo-gluonowa powstała w zderzeniu relatywistycznych jonów osiąga lokalną równowagi termodynamicznej już po czasie  $\sim 1 \text{ fm}/c$ .
- Jaki jest mechanizm tak szybkiej termalizacji?

## Drugi wniosek i drugie pytanie

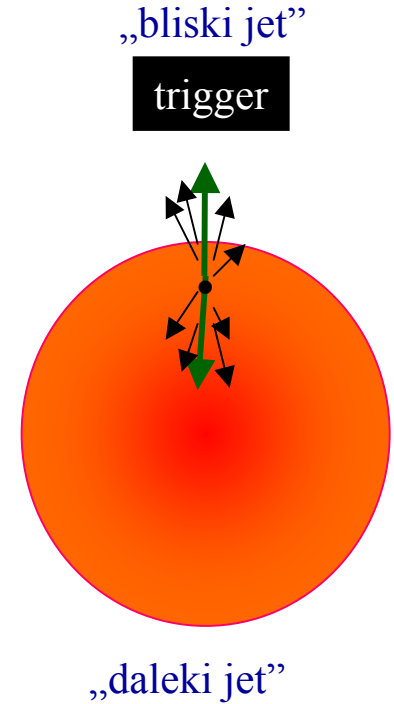
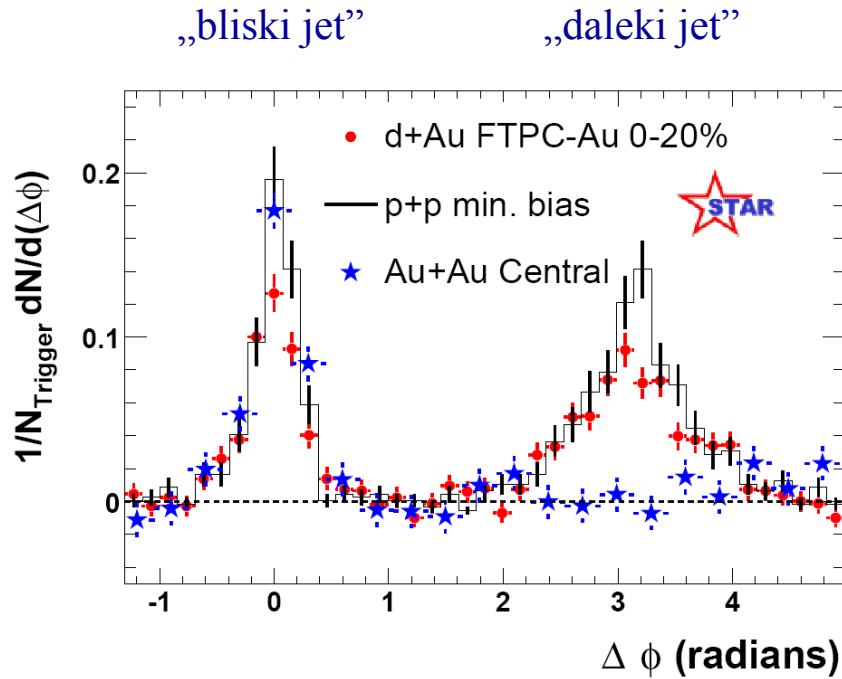
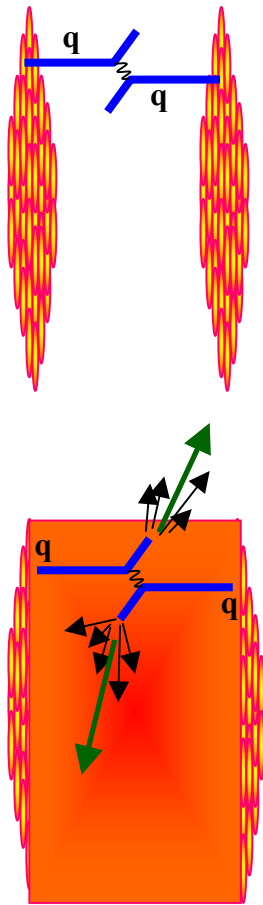
- Materia produkowana w zderzeniach relatywistycznych jonów zachowuje się jak ciecz idealna (nielepka)
- Co czyni czyni lepkość tak małą?

# Nieprzezroczystość

Eksperyment sugeruje, że

Materia produkowana w zderzeniach relatywistycznych jonów jest ośrodkiem nieprzezroczystym

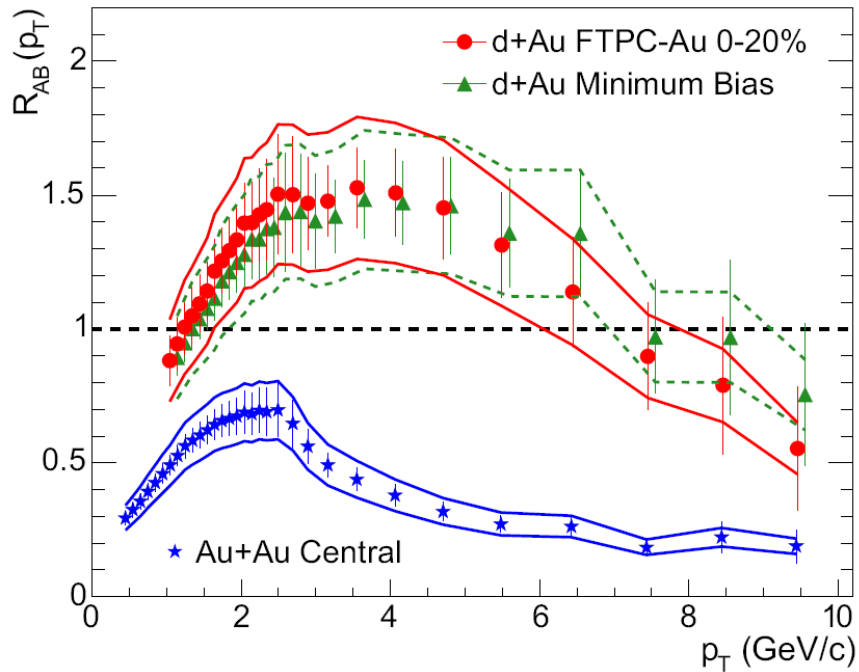
# Twarde „jety”



„Dalekie jety” są silnie tłumione w zderzeniach centralnych Au-Au

# Twarde „jety”

Inkluzywna produkcja  $\pi^0$



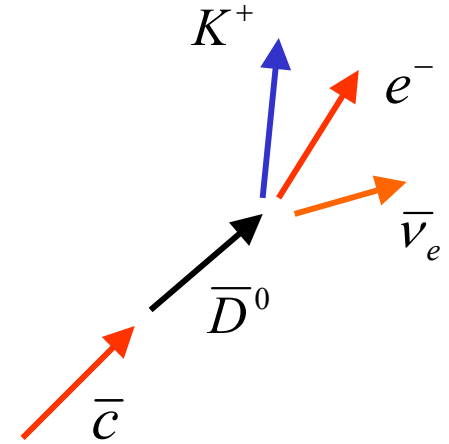
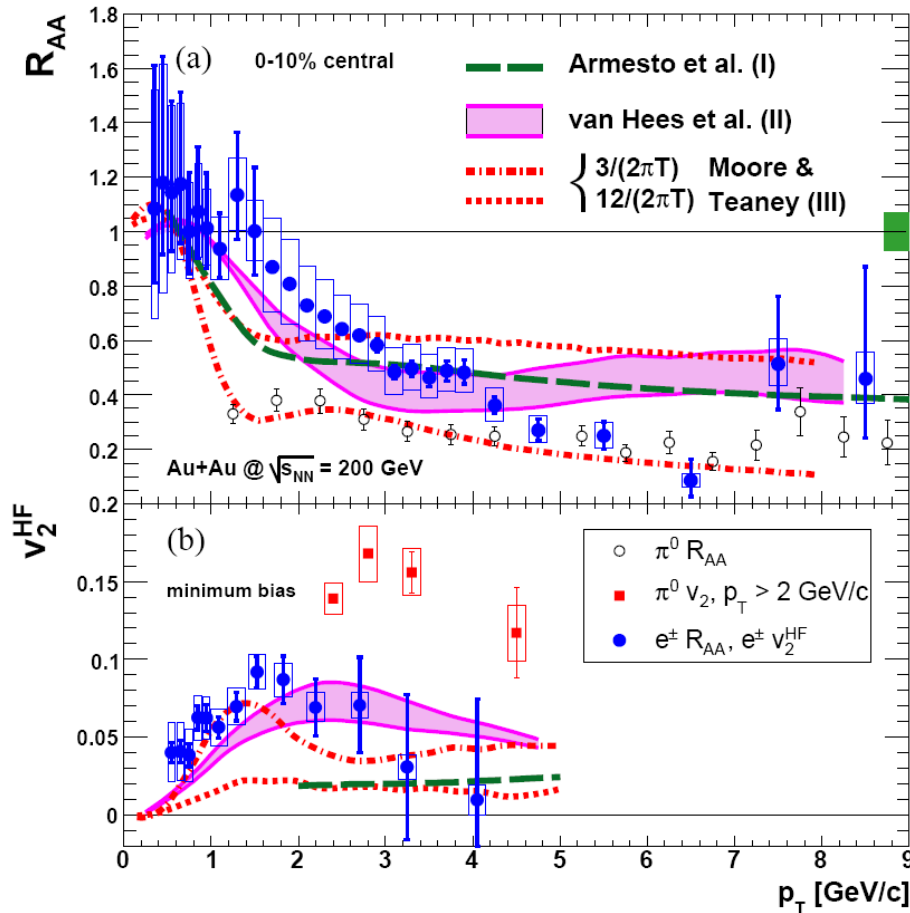
$$R_{AB}(p_T) = \frac{\frac{dN_{AB}}{d\eta d^2 p_T}}{\langle N_{bin} \rangle \frac{d\sigma_{NN}}{\sigma_{NN}^{inel} d\eta d^2 p_T}}$$

tłumienie

Produkcja pionów od dużym  $p_T$  jest silnie tłumiona

# Ciężkie kwarki

$e^\pm$  pochodzące z rozpadów ciężkich (anty)kwarków  $c$  i  $b$



Ciężkie szybkie kwarki zachowują się w plazmie podobnie lekkim



## Trzeci wniosek i trzecie pytanie

- Materia produkowana w zderzeniach relatywistycznych jonów jest nieprzezroczysta dla szybkich kwarków, ciężkich i lekkich
- Co czyni plazmę kwarkowo-gluonową nieprzezroczystą?

# Jaka plazma?

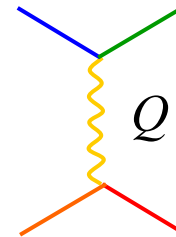
- **prawie idealny gaz kwarków i gluonów**
- **prawie idealna ciecz**
- **???**

# Słabo-sprężona plazma

Asymptotyczna swoboda

$$\alpha_s = \frac{12\pi}{(33 - 2N_f) \ln\left(\frac{Q^2}{\Lambda_{\text{QCD}}^2}\right)}$$

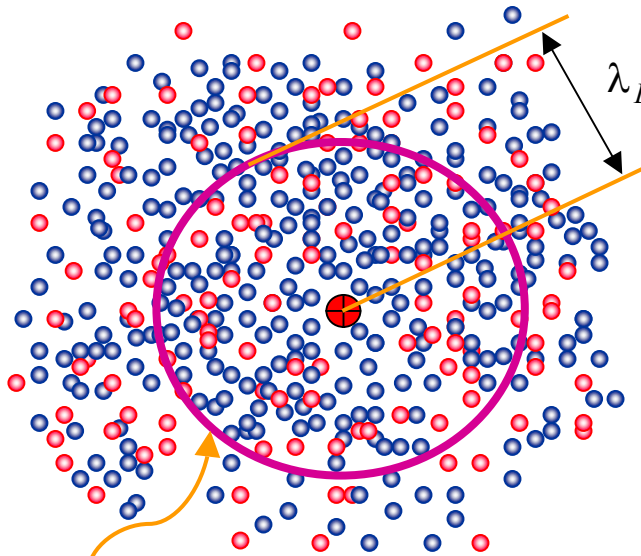
Przy dostatecznie wysokiej  
gęstości energii plazma jest  
słabo sprężona



$$Q^2 \rightarrow \#T^2$$

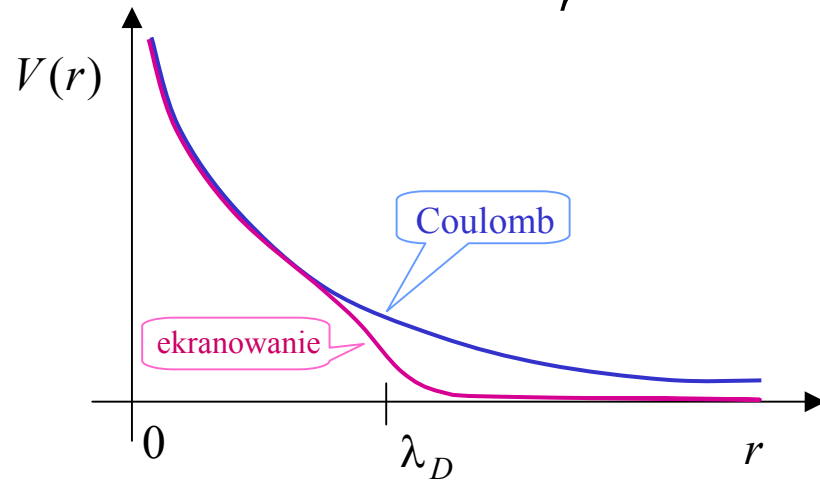
$$\Lambda_{\text{QCD}} \approx 200 \text{ MeV}$$

# Ekranowanie sił kolorowych



$$\lambda_D = \frac{1}{m_D} \sim \frac{1}{gT} \quad \text{długość ekranowania} \quad \alpha_s \equiv \frac{g^2}{4\pi}$$

$$V(r) \sim \frac{e^{-\frac{r}{\lambda_D}}}{r}$$



Sfera Debye'a

# Słabo-sprężona plazma

▶ charakterystyczny czas zderzeniowej termalizacji:  $t_{\text{eq}} \sim \frac{1}{T\alpha_s^2 \ln(1/\alpha_s)}$

▶ współczynnik lepkości:  $\eta \sim \frac{T^3}{\alpha_s^2 \ln(1/\alpha_s)}$

▶ zderzeniowe straty energii:  $\frac{dE}{dx} \sim \alpha_s^2 T^2 \ln(1/\alpha_s)$

▶ radiacyjne straty energii  $\left\{ \begin{array}{l} \text{lekkiego kwarku: } \frac{dE}{dx} \sim \alpha_s^2 ET \ln(1/\alpha_s) \\ \text{ciężkiego kwarku: } \frac{dE}{dx} \sim \frac{\alpha_s^3 ET^3}{M^2} \ln(1/\alpha_s) \end{array} \right. \quad (M \gg T)$

$\alpha_s$  – stała sprzężenia,  $T$  – temperatura,  $E$  – energia,  $M$  – masa ciężkiego kwarku

## Zdawałoby się oczywista konkluzja

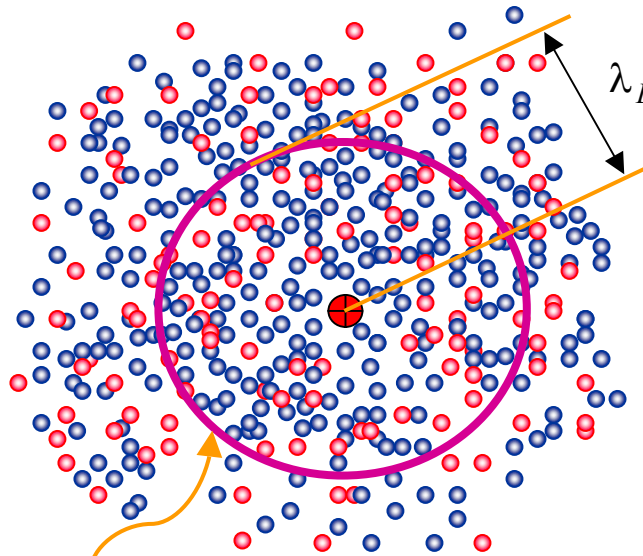
Plazma kwarkowo-gluonowa produkowana w zderzeniach relatywistycznych jonów jest silnie sprzężona

Ale

- asymptotyczna swoboda przy dużej gęstości energii
- „eksperyment”:  $\alpha_s \leq 0.3$
- plazma słabo-sprzężona może się zachowywać jak plazma silnie sprzężona



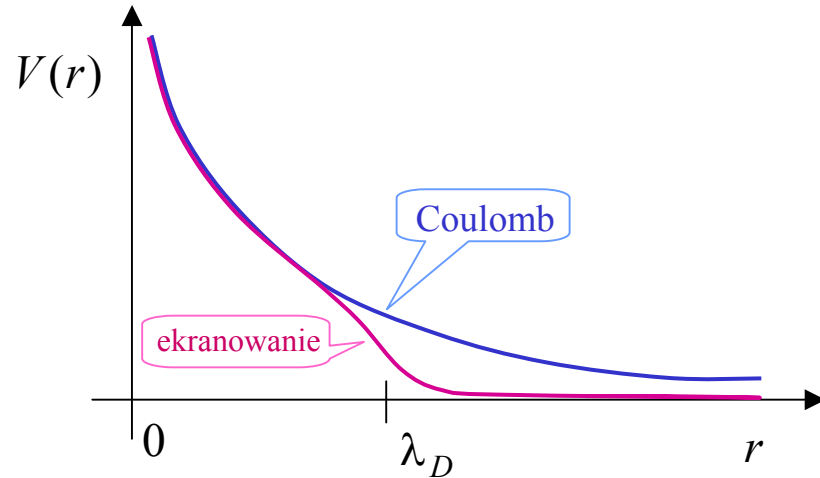
# Plazma zachowuje się kolektywnie



$$\lambda_D = \frac{1}{m_D} \sim \frac{1}{gT}$$

długość ekranowania

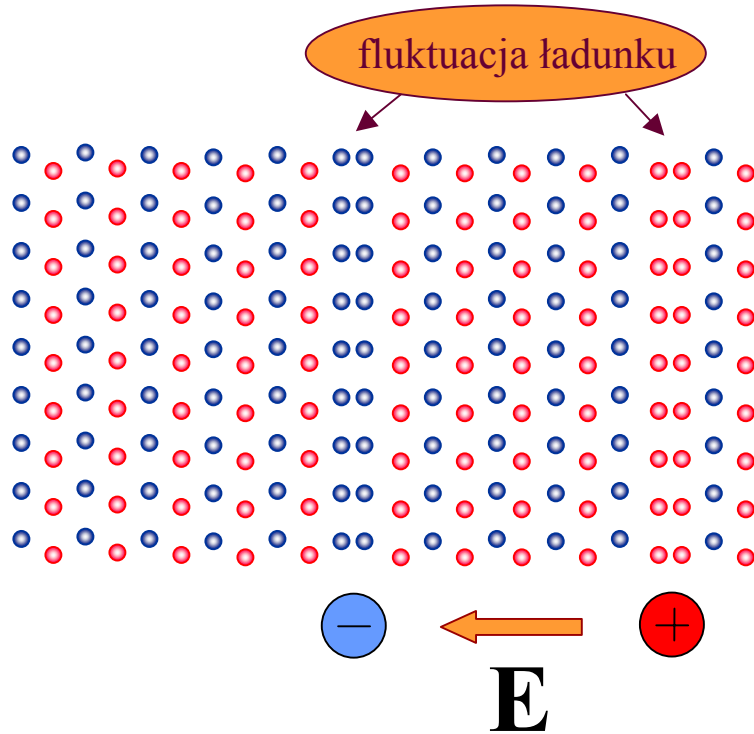
sfera Debye'a



$$V_D = \frac{4}{3} \pi \lambda_D^3 \sim \frac{1}{g^3 T^3}, \quad n \sim T^3, \quad n V_D \sim \frac{1}{g^3} \gg 1 \quad \text{if } g \ll 1$$

W słabo-sprężonej plazmie jest dużo cząstek w sferze Debye'a!

# Oscylacje plazmowe



$$\mathbf{E}(t, \mathbf{r}) = \mathbf{E}_0 \cos(\omega(\mathbf{k})t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \varphi)$$

$$\omega(\mathbf{k}) \underset{\mathbf{k} \rightarrow 0}{\approx} \omega_0 \sim gT$$

częstość plazmowa



# Niestabilności

stan stacjonarny

$$A(t) = A_0 + \delta A(t)$$

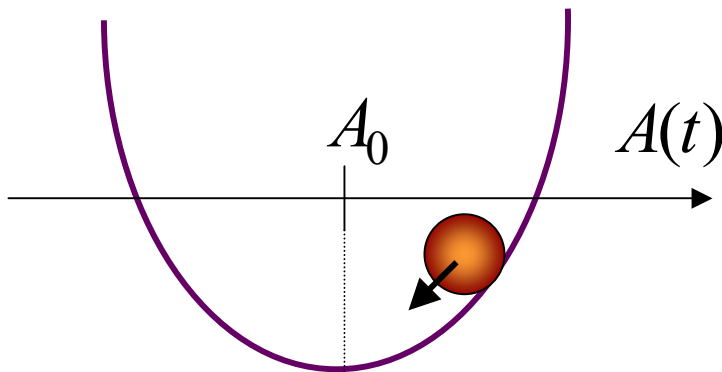
fluktuacja

**Niestabilność**

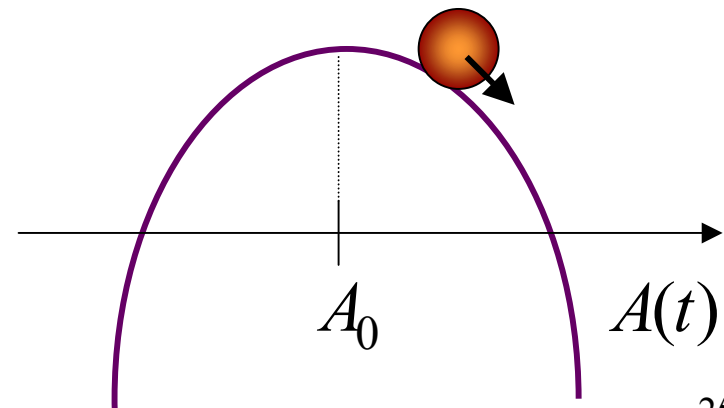
$$\delta A(t) \propto e^{\gamma t}$$

$$\gamma > 0$$

**konfiguracja stabilna**



**konfiguracja niestabilna**



# Niestabilności plazmy

▶ niestabilności w przestrzeni położeń – niestabilności hydrodynamiczne

▶ niestabilności w przestrzeni pędu – niestabilności kinetyczne

niestabilności spowodowane  
nierównowagowym rozkładem pędu

# Niestabilności kinetyczne

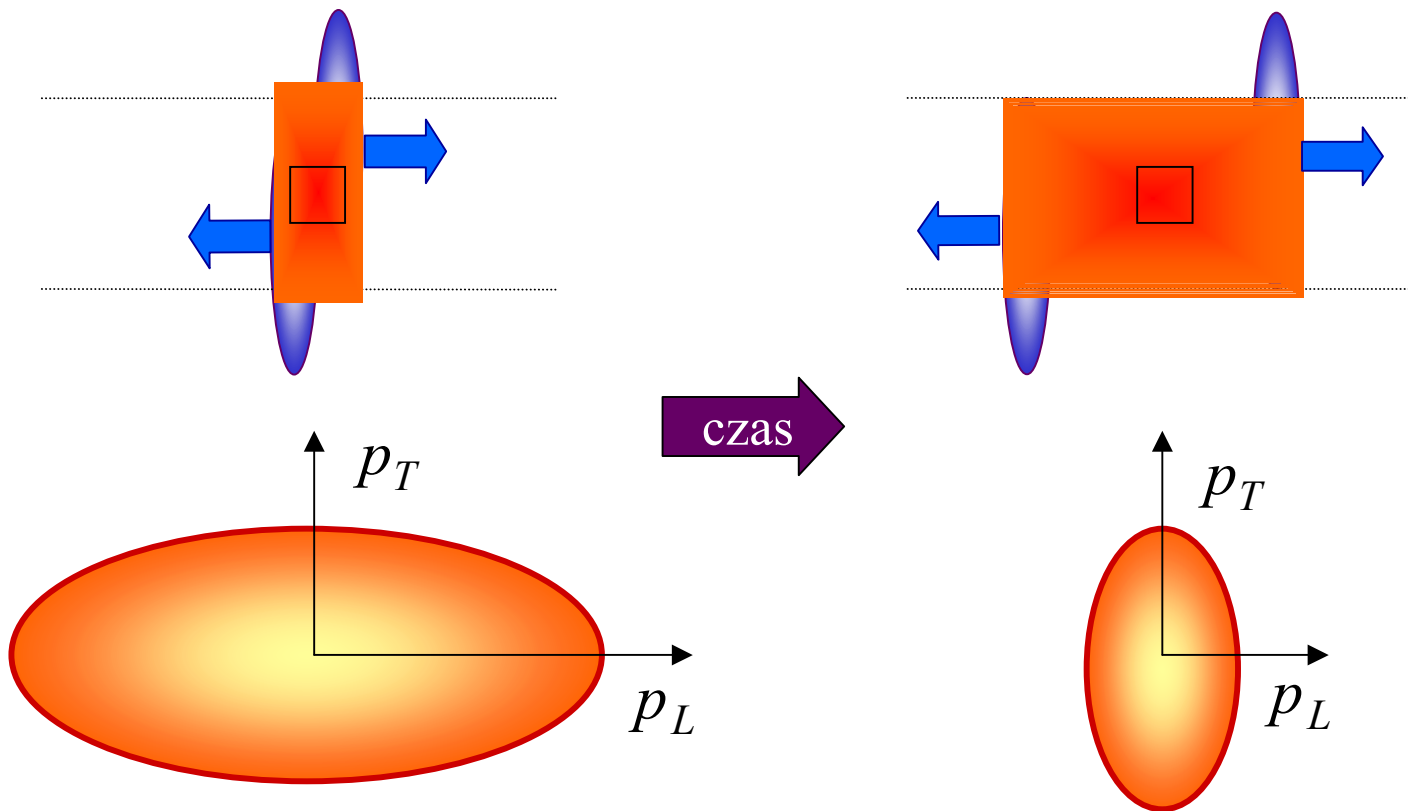
► **mody podłużne** -  $\mathbf{k} \parallel \mathbf{E}$ ,  $\delta\rho \sim e^{-i(\omega t - \mathbf{k}\mathbf{r})}$

► **mody poprzeczne** -  $\mathbf{k} \perp \mathbf{E}$ ,  $\delta\mathbf{j} \sim e^{-i(\omega t - \mathbf{k}\mathbf{r})}$

$\mathbf{E}$  – pole elektryczne,  $\mathbf{k}$  – wektor falowy,  $\rho$  – gęstość ładunku,  $\mathbf{j}$  - prąd

# Rozkład pędu partonów

Początkowo silna anizotropia

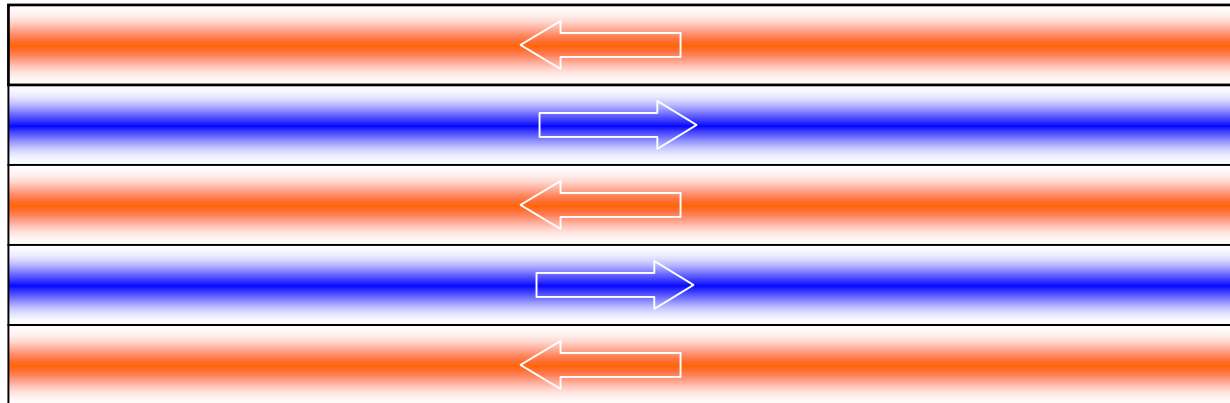


# Zarodki chromomagnetycznej niestabilności

$$\langle j_a^\mu(x) \rangle = 0 \quad \text{średnio plazma jest neutralna}$$

$$\langle j_a^\mu(x_1) j_b^\nu(x_2) \rangle = \frac{1}{2} \delta^{ab} \int \frac{d^3 p}{(2\pi)^3} \frac{p^\mu p^\nu}{E_p^2} f(\mathbf{p}) \delta^{(3)}(\mathbf{x} - \mathbf{v}t) \neq 0$$

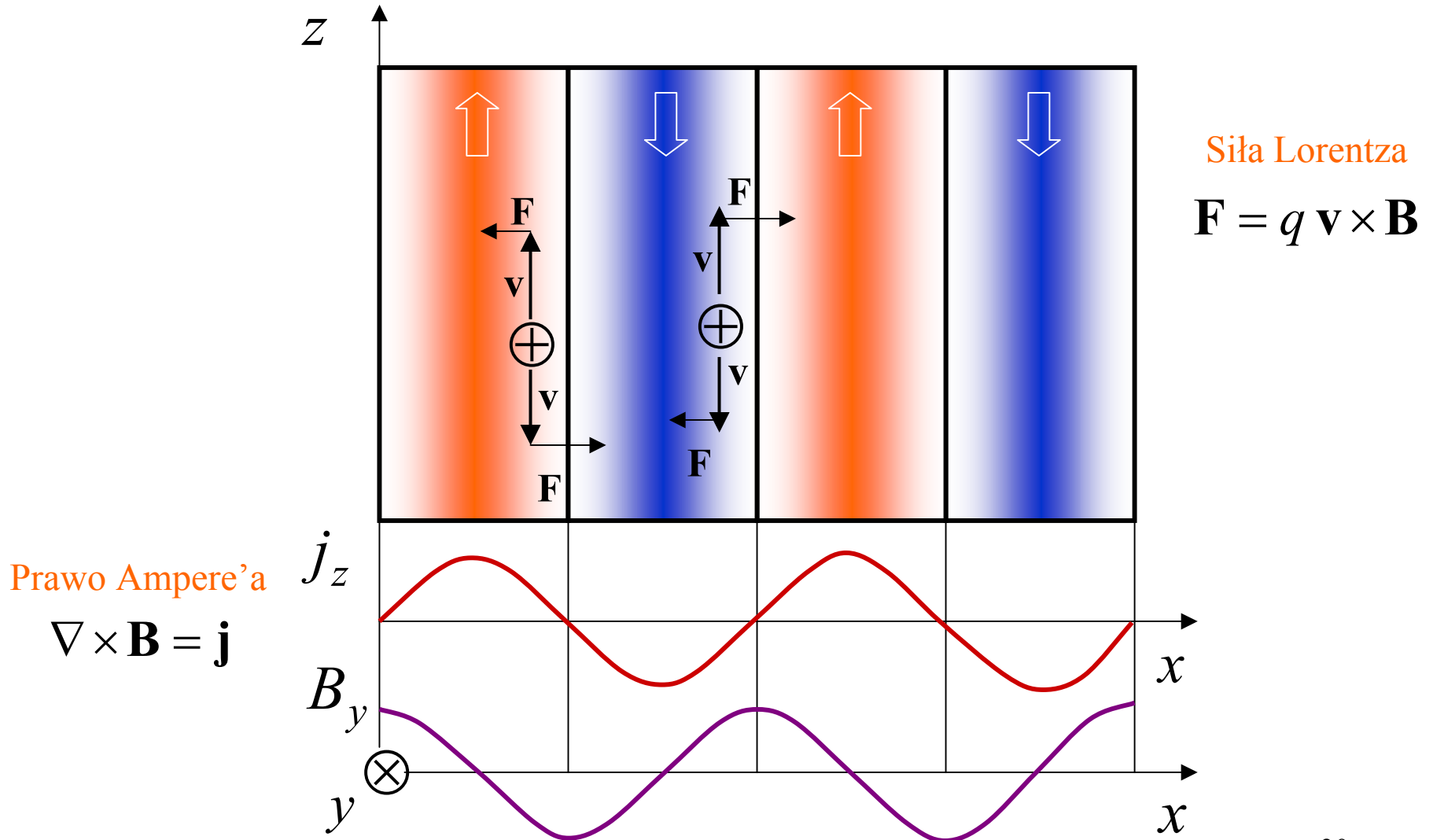
$$x_1 = (t_1, \mathbf{x}_1), \quad x_2 = (t_2, \mathbf{x}_2), \quad x = (t_1 - t_2, \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2)$$



„kierunek nadwyżki pędu”



# Mechanizm filamentacji

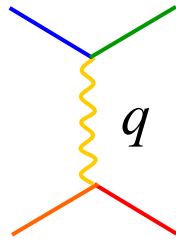


# Niestabilności są szybkie

Skala czasowe procesów spowodowanych zderzeniami

$$t_{\text{hard}} \sim \frac{1}{g^4 \ln(1/g) T}$$

$$t_{\text{soft}} \sim \frac{1}{g^2 \ln(1/g) T}$$



twarde zderzenie:  $q \sim T$

miękkie zderzenie:  $q \sim gT$

Skala czasowa procesów kolektywnych

$$t_{\text{collec}} \sim \frac{1}{g T}$$

$$g^2 \ll 1 \Rightarrow t_{\text{hard}} \gg t_{\text{soft}} \gg t_{\text{collec}}$$

Niestabilności są szybkie!

# Niestabilności w symulacjach

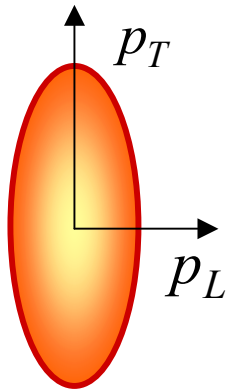
## Dynamika Twardych Pętli SU(2)

1+1 wymiarów

$$A_a^\mu = A_a^\mu(t, z)$$

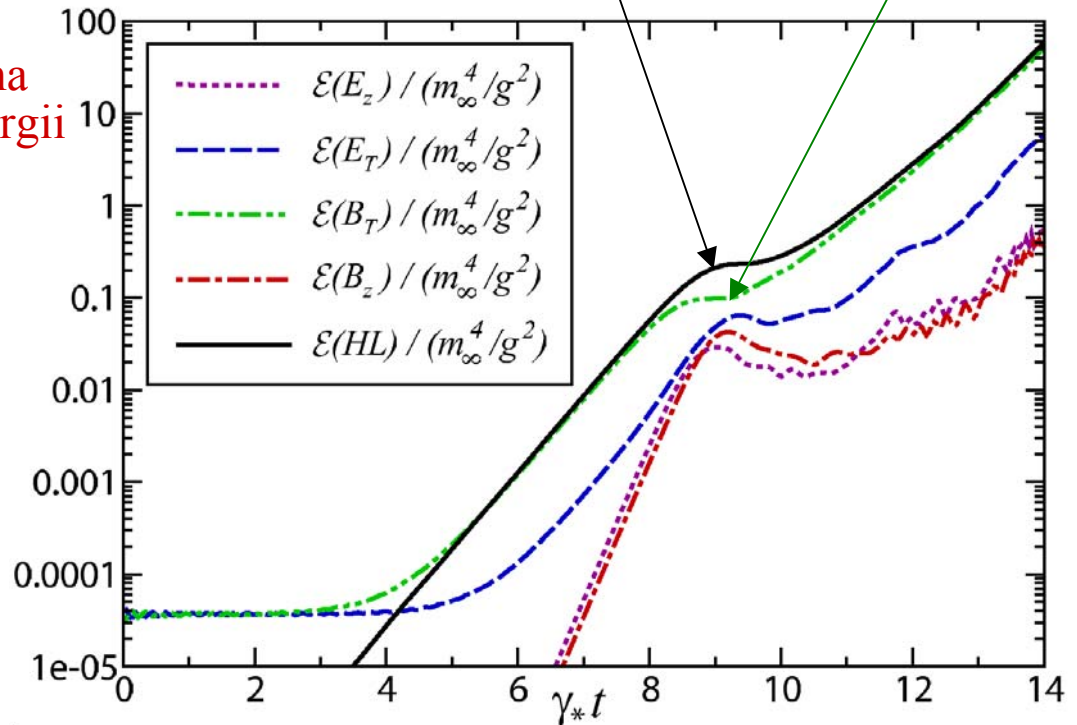
Skalowana  
gęstość energii  
pól

Anizotropia  
rozkładu  
pędowego



całość

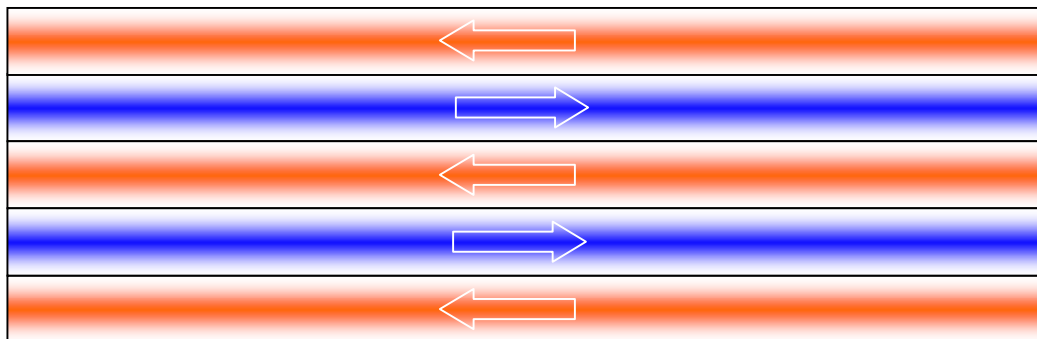
magnetyczne  
poprzeczne



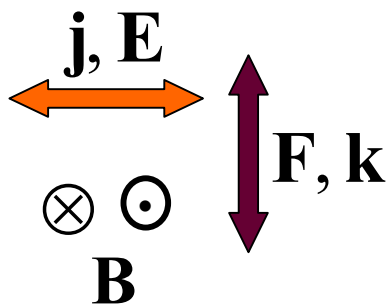
$\gamma_*$  - maksymalny indeks wzrostu



# Mechanizm izotropizacji



„kierunek nadwyżki pędu”



zmiana pędu  
cząstek

$$\Delta \mathbf{p} = \int dt \mathbf{F}$$

pęd pól

$$\mathbf{P}_{\text{fields}} \sim \mathbf{B}^a \times \mathbf{E}^a \sim \mathbf{k}$$

# Izotropizacja – symulacja numeryczna

## Klasyczny układ kolorowych cząstek i pól

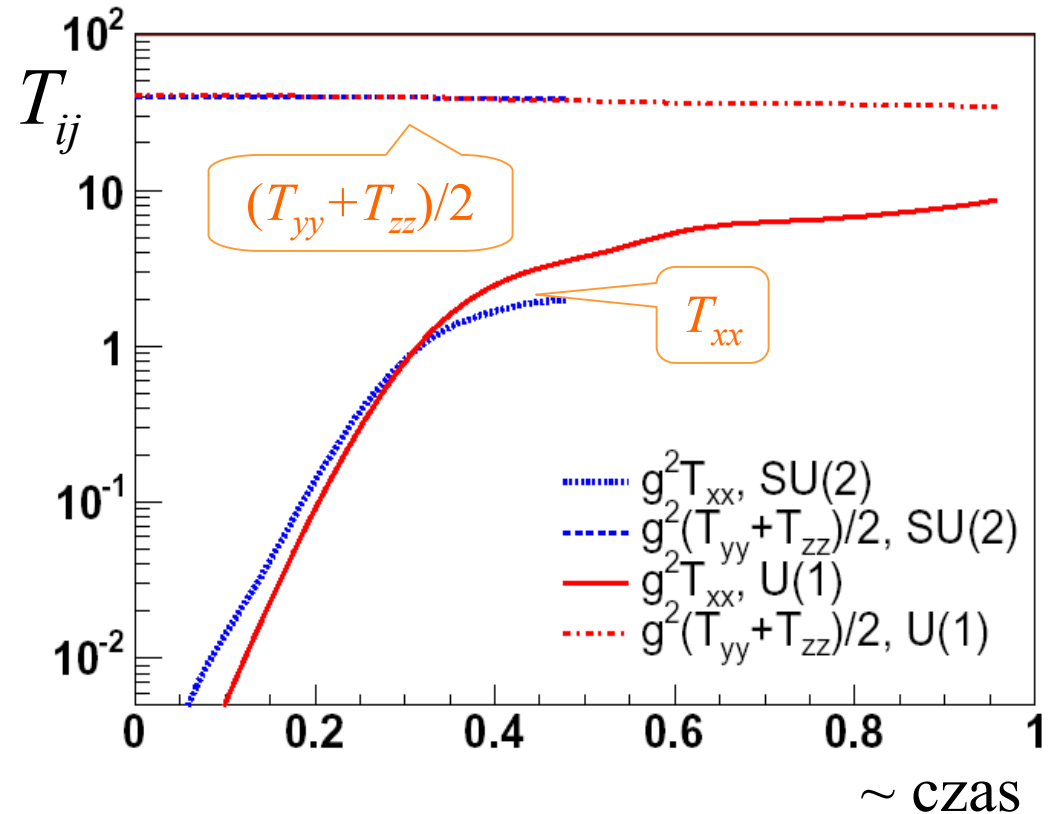
$$T_{ij} = \int \frac{d^3 p}{(2\pi)^3} \frac{p_i p_j}{E} f(\mathbf{p})$$

Początkowa anizotropia:

$$T_{xx} = 0$$

Izotropia:

$$T_{xx} = (T_{yy} + T_{zz}) / 2$$

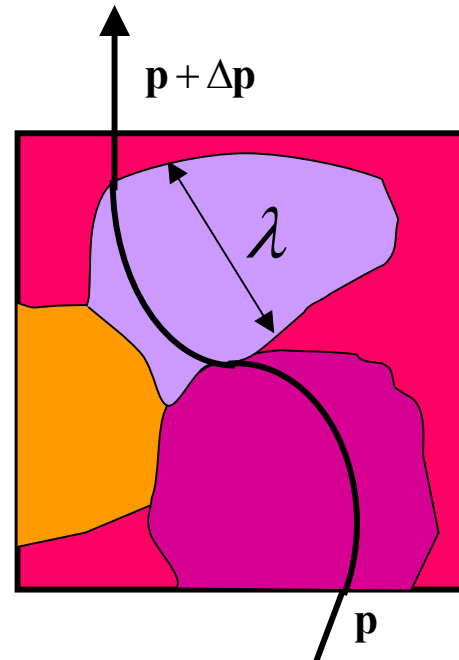


# Lepkość turbulენტnej plazmy

lepkość zderzeniowa:  $\eta_C \sim \frac{T^3}{\alpha_s^2 \ln(1/\alpha_s)}$

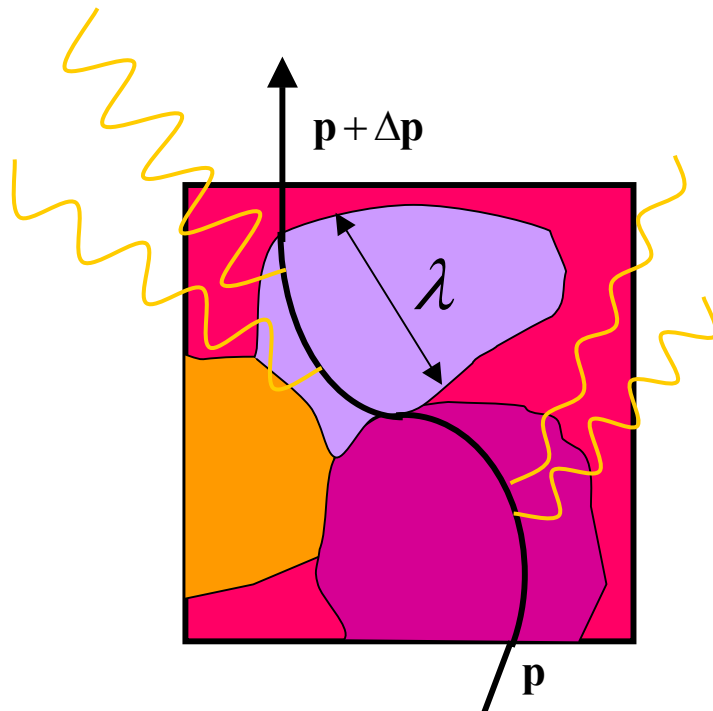
lepkość anomalna:  $\eta_A \sim \frac{1}{\alpha_s \langle \mathbf{B}^2 \rangle \lambda}$

$\lambda$  - wielkość magnetycznej domeny



Lepkość zamagnesowanej turbulენტnej plazmy jest mała

# Przezroczystość turbulენტnej plazmy



Radiacyjne straty energii

Zamagnesowana turbulენტna plazma jest nieprzezroczysta dla szybkich cząstek

# Wnioski

Nierównowagowa plazma słabo-sprężona zachowuje się jak plazma silnie sprężona

- niestabilności przyspieszają proces termalizacji
- silne pola zmniejszają lepkość
- silne pola zmniejszają przezroczystość