

# ダイアグラムを用いた 輸送係数の新しい計算法

—ボルツマン方程式を超えて—

日高義将(京大理)

共同研究者:国広悌二

# 流体力学

低エネルギーの有効理論

$$L \gg \lambda_{\text{mfp}}$$

流体のスケール

平均自由行程

流体方程式は

ユニバーサルな方程式.

状態方程式  $P = P(E)$   
輸送係数  $\eta, \zeta, \dots$  ミクロからの情報

# Kubo公式

Kubo, Tomita('54), Nakano('56), Kubo('57)

輸送係数  $\longleftrightarrow$  グリーン関数

Shear Viscosity: 
$$\eta = \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{1}{\omega} \int dt e^{i\omega t} \langle [T_{xy}(x), T_{xy}(0)] \rangle$$

Bulk Viscosity: 
$$\zeta + \frac{4}{3}\eta = \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{1}{\omega} \int dt e^{i\omega t} \langle T_{xx}(x) T_{yy}(0) \rangle$$

正確にグリーン関数が計算  
できれば良いが . . . .

難しい。

## 格子QCD

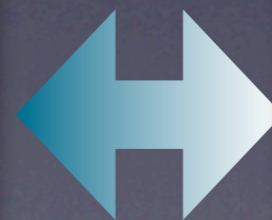
- ☺ 非摂動
- ☹ 符号問題

## ゲージ/重力対応

- ☺ 強結合
- ☹ QCDではない.

## ダイアグラムの方法

- ☺ QCD
- ☹ ダイアグラムの足し上げが必要.



Boltzmann方程式

# なぜダイアグラムアプローチ?

基礎理論から出発.

原理的にはexactな計算.

場の理論のテクニックが使える.

## 我々の狙い

輸送係数の計算を行う系統的方法の開発.

Eliashbergの方法を相対論的場の量子論に応用.

# ダイアグラムの方法

## 先行研究

### 虚時間形式

フェルミ流体: Eliashberg('62)

摂動最低次: Jeon('95), Jeon and Yaffe('96)

2PI 展開: Aarts and Resco('03)

### 実時間形式

摂動の最低次: Wang and Heinz('03)

# なぜ難しいか？

単純なループ展開は破綻している。

真空中





# なぜ難しいか？

単純なループ展開は破綻している。

媒質中



真空中では、



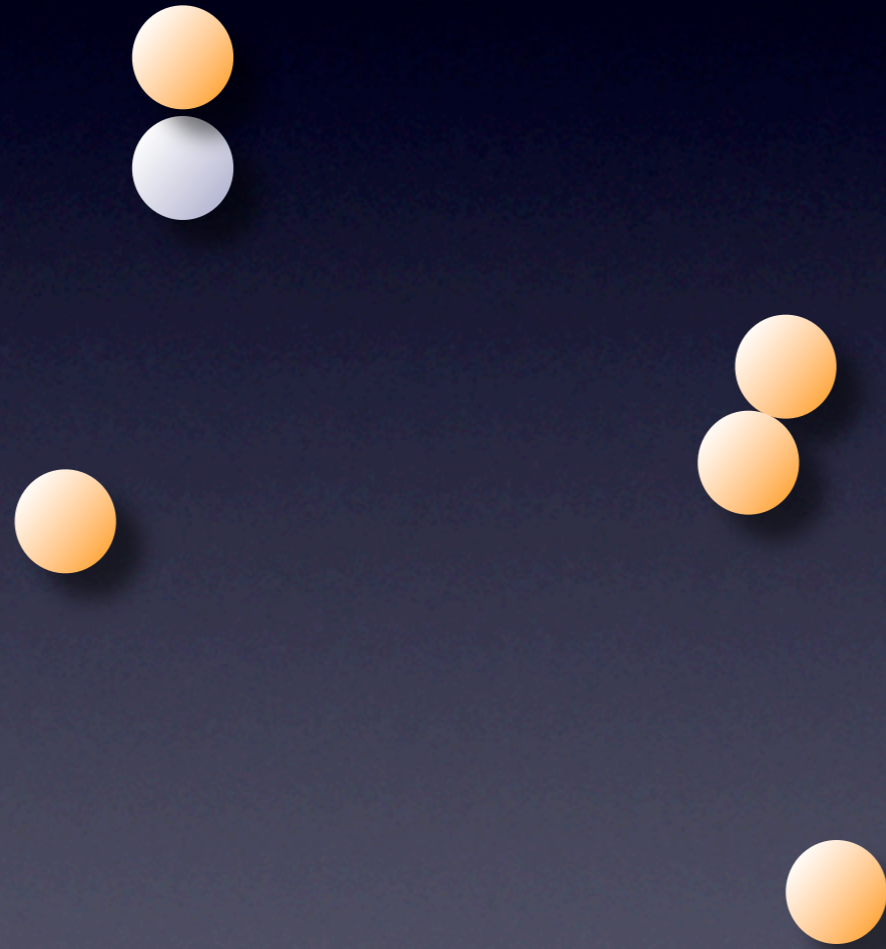
真空中では、



媒質中では、



媒質中では、



媒質中では、



媒質中では,



# 流体モード

時間スケールの長い長波長モード

多重散乱項が主要になる。

ダイアグラムの足し上げが必要。

# 高エネルギーのモード

時間スケール短い。

one-loop近似でも良い。



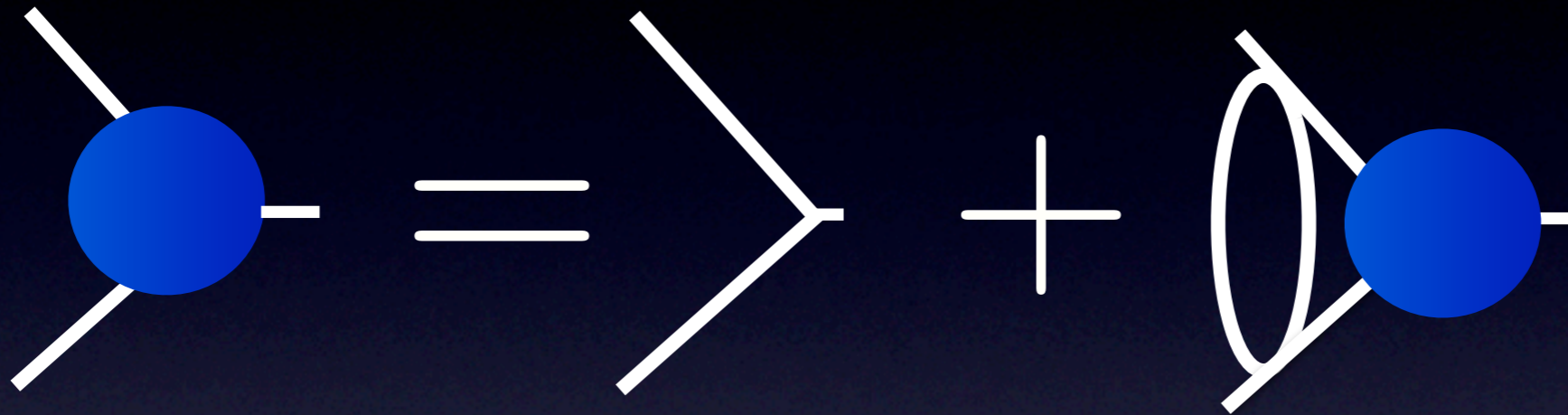
散乱振幅の2乗  $\left| \underline{U} \right|^2$

散乱振幅の2乗





多重散乱の効果は特別に足しあげ



$$\langle [T_{xy}(x), T_{xy}(0)] \rangle = \text{Diagram}$$

The diagram on the right is a white circle with a blue circle inside it, representing a loop correction to the correlator.

= Boltzmann 方程式を解く  $\langle 2p^\mu \partial_\mu f = -C[f]$

Jeon(1995)

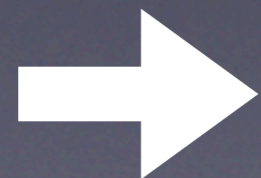
# Boltzmann 方程式を超えて

YH, Kunihiro

Eliashbergの方法を実時間形式の  
相対論的場の量子論に応用.

ダイアグラムの組み替え

足し上げが必要なダイアグラムとそうでない  
ダイアグラムを別々に取り扱う.



Boltzmann方程式からの補正.

# Boltzmann 方程式を超えて

YH, Kunihiro

## 散乱の補正



主要項

振幅の補正

多重散乱



## バーテックス補正



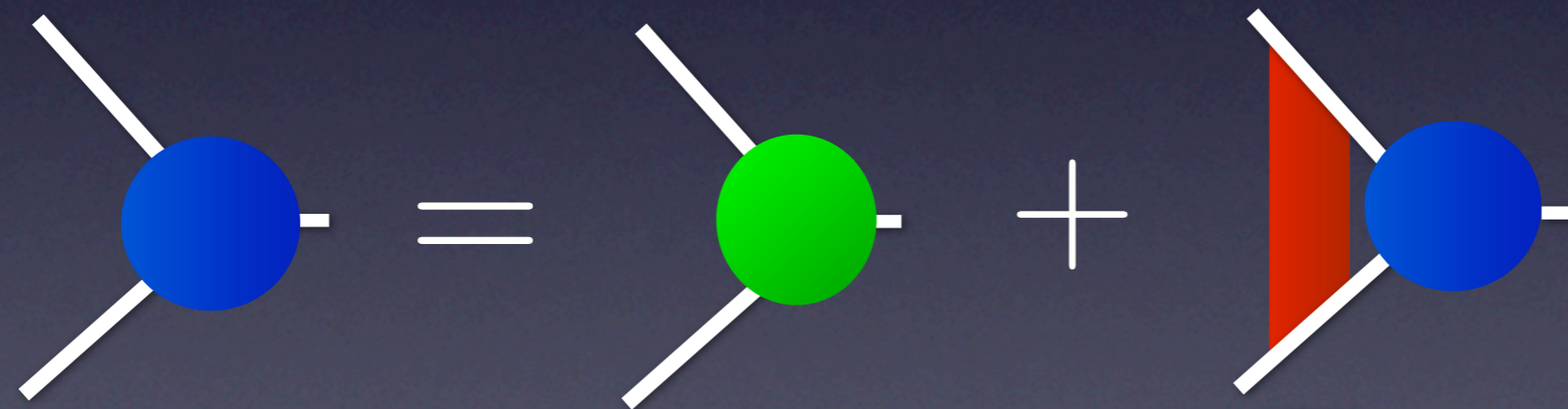
# Boltzmann 方程式を超えて

YH, Kunihiro

スペクトル



ダイアグラムの足し上げ



$$\langle [T_{xy}(x), T_{xy}(0)] \rangle =$$

A diagram showing a green circle and a blue circle connected by a white circle. The green circle is on the left and the blue circle is on the right, both with two white lines crossing them. A white circle is drawn around them, connecting the two circles.

# まとめ

- Eliashbergの方法を相対論的場の量子論へ適用した.
- 最低次： Boltzmann方程式.
- 高次の効果: スペクトルの変化, vertexの繰り込み, 多重散乱に吸収.



# 今後の発展

- QCDへの適用.
- 臨界現象への応用.
  - 流体モードとの結合が無視できない.
  - モード結合理論との関係.