

# اثر پلاسمینوها بر روی ضریب چسبندگی و شکسانی گاز یوکاوا-فرمی در دمای متناهی

فرید تقی نواز، ندا صدوقی

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف

## چکیده

در این مقاله، ضریب چسبندگی و شکسانی<sup>۱</sup> یک تئوری فرمیونی بوزونی با برهمکنش یوکاوا با استفاده از رهیافت گرین-کوبو و روشهای موجود در نظریه میدان دمای متناهی محاسبه شده است. در این رابطه به طور خاص اثر پلاسمینوها بر روی ضریب چسبندگی و شکسانی فرمیونی بررسی شده و نشان داده شده است که برای این ضریب اثر این برانگیختگیهای اضافه، که در نتیجه وجود دما بصورت مؤثر در ماده کوآرکی موجود می باشند، فقط در دمای بالا قابل صرف نظر کردن است.

در مراحل اولیه پس از برخورد یونهای سنگین در آزمایشگاههای  $RHIC$ <sup>۲</sup> و  $LHC$ <sup>۳</sup> شواهد بسیار محکمی دال بر ایجاد فاز جدیدی از ماده کوآرکی به نام پلاسمای کوآرک-گلوئون مشاهده شده است. به دلیل وجود شرایط دور از تعادل ماده به وجود آمده و هم چنین وجود درجات آزادی بسیار زیاد و پیچیدگی های نظریه کوانتوم کرومودینامیک ( $QCD$ )<sup>۴</sup> امکان استفاده از این رهیافت عملاً امکان ناپذیر است. روش پذیرفته شده برای برخورد با چنین سیستم پیچیده ای استفاده از رهیافت هیدرودینامیک است. آزمایشات مختلف بر روی این فاز جدید از ماده کوآرکی نشان می دهد که کمیت  $\frac{\eta}{s}$  که نسبت ضریب چسبندگی و شکسانی به آنروپی است، کوچک می باشد و این مبین این واقعیت است که این سیستم یک سیستم همبسته بسیار قوی است. از این رو می توان با مطالعه مراتب بالاتر هیدرودینامیک، محدوده ضرایب ترابردی را در بسط مشتقی کمیات ترمودینامیکی در تانسور انرژی-تکانه هیدرودینامیک با دقت خوبی مطالعه نمود. بررسی هایی که تا کنون بر روی ضریب چسبندگی و شکسانی صورت گرفته است غالباً با فرض غیر وابسته بودن آن به دما، پتانسیل شیمیایی و دیگر پارامترهای ترمودینامیکی است. همچنین وجود درجات آزادی کوآرکی بر روی ضریب چسبندگی ماده کوآرکی موضوع بسیار مهمی است که آن چنان که باید و شاید به آن پرداخته نشده است.

در [۱] ما به کمک رهیافت گرین-کوبو<sup>۵</sup> ضریب چسبندگی و شکسانی را برای هر دو نوع درجه آزادی فرمیونی و بوزونی برای یک مدل ساده با بر هم کنش یوکاوايي مورد مطالعه قرار داده ایم

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - m_f)\psi + \frac{1}{2}(\partial_\mu \phi \partial^\mu \phi - m_b^2 \phi^2) + g\bar{\psi}\psi\phi. \quad (1)$$

به این صورت که اگر نظریه میدان های کوانتومی در دمای متناهی با بر هم کنش دلخواه دارای دوگان هیدرودینامیکی باشد، آنگاه می توان با تعریف تانسور انرژی-تکانه در چارچوب نظریه میدان های کوانتومی و معادل سازی آن با تانسور انرژی-تکانه هیدرودینامیک به محاسبه ضرایب ترابردی<sup>۶</sup> هیدرودینامیک پرداخت. در این رهیافت ضریب چسبندگی و شکسانی با محاسبه تابع همبستگی تاخیری بخش بدون رد تانسور انرژی-تکانه بدست می آید.

<sup>۱</sup>shear viscosity coefficient

<sup>۲</sup>Relativistic Heavy Ion Collision

<sup>۳</sup>Large Hadron Collider

<sup>۴</sup>Quantum Chromodynamics

<sup>۵</sup>Green-Kubo

<sup>۶</sup>Transport Coefficient

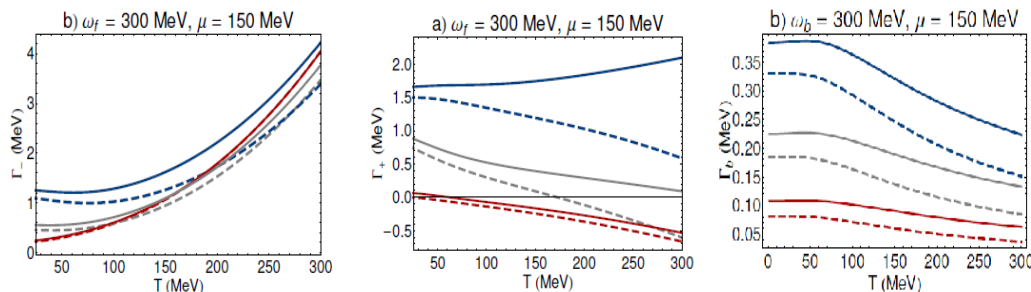
وجه اصلی و قابل تمایز این کار با کارهای مشابه در آن است که ما نمایش دقیق کالن-لمن<sup>۷</sup> را برای تابع انتشارگر فرمیونی در دمای متناهی در نظر گرفتیم

$$G(\omega, \vec{k}) = -\frac{\gamma_0 \omega_f - \gamma \cdot \vec{k} + m_f}{2\omega_f(\omega - \mathcal{E}_+(\omega, \vec{k}) - i\Gamma_+(\omega, \vec{k}))} - \frac{\gamma_0 \omega_f + \gamma \cdot \vec{k} - m_f}{2\omega_f(\omega + \mathcal{E}_-(\omega, \vec{k}) + i\Gamma_-(\omega, \vec{k}))}. \quad (2)$$

در این رابطه انرژی تصحیح شده  $\mathcal{E}_\pm(\omega, \vec{k})$  و پهنای طیفی  $\Gamma_\pm(\omega_f, \vec{k})$  از روی قسمت حقیقی و مجازی تابع خود-انرژی تاخیری فرمیونها  $\Sigma_R(\omega_f, \vec{k})$  بدست می آیند و  $\omega_f^2 = \vec{k}^2 + m_f^2$  است. این وجه از کار ما با تقریب بسیار در کارهای دیگران استفاده شده است [۲]. در اثر در نظر گرفتن این نمایش دقیق درجات آزادی جدیدی به نام پلاسمینو<sup>۸</sup> در تابع انتشارگر فرمیونی پدید می آیند که به واسطه ی وجود دما ظاهر می شوند و خاصیت اصلی شان آن است که برای فرمیون های بی جرم، ویژه مقادیر دستیدگی<sup>۹</sup> و هلیسیتته<sup>۱۰</sup> شان مختلف العلامه است. این در حالی است که برای فرمیون های بدون جرم متعارف (ذره و پادذره) این ویژه مقادیر هم علامت هستند. این درجات آزادی جدید بسیار شبیه به ذرات حفره در مدل *BCS* می باشند [۳]. بررسی این درجات آزادی جدید در دماهای بالا از اهمیت قابل ملاحظه ای برخوردار است.

## نتایج و بحث

ما با محاسبه پهنای واپاشی بوزون ها و فرمیون ها در این نظریه به این نتیجه رسیدیم که پهنای واپاشی بوزون ها و فرمیون ها با افزایش دما و پتانسیل شیمیایی کاهش می یابد. این در حالی است که پهنای واپاشی مد پلاسمینو فرمیونی با افزایش دما و پتانسیل شیمیایی افزایش می یابد. این رفتار در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱: پهنای واپاشی بوزونی و فرمیونی برای نسبت‌های جرمی متفاوت به همراه تصحیحات دمایی

با افزودن تصحیحات دمایی به جرم فرمیون ها و بوزون ها پهنای واپاشی تغییر می کرد، اما همچنان تفاوت میان پهنای واپاشی برانگیختگی های نرمال و پلاسمینو با افزایش دما و پتانسیل شیمیایی افزایش می یافت (خطوط نقطه چین در شکل (۱) سهم اضافه شده جرمهای وابسته به دما را شامل می شود). علاوه بر این ما به بررسی رفتار این پهنای واپاشی بر حسب نسبت جرم بوزون به فرمیون پرداختیم و مشاهده نمودیم که پهنای واپاشی بوزونی با افزایش نسبت جرم بوزون به فرمیون تقریباً ثابت می شد و رفتاری اشباع گونه از خود نشان می داد. پهنای واپاشی فرمیونی با افزایش نسبت جرم بوزون به

<sup>۷</sup>Källén-Lehmann

<sup>۸</sup>Plasmino

<sup>۹</sup>chirality

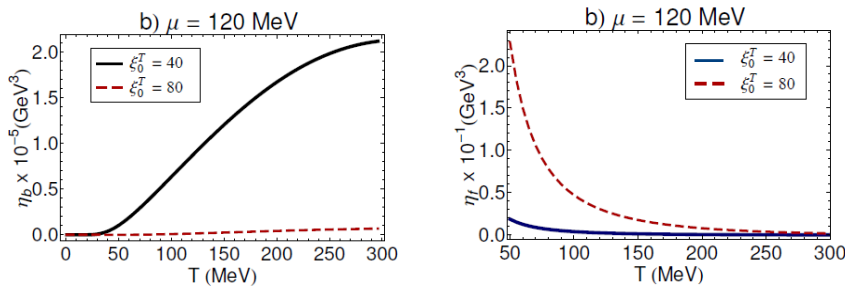
<sup>۱۰</sup>Helicity

فرمیون نیز افزایش می یافت. در نهایت ما به بررسی ضریب چسبندگی وشکسانی بوزونی و فرمیونی در این نظریه پرداختیم. نتیجه نهایی پس از محاسبات تا مرتبه اول بسط اسکلتی<sup>۱۱</sup> به صورت زیر در آمد

$$\eta_b = \frac{\beta}{30\pi^2} \int_0^\infty dp \frac{p^6}{E_b^2} \frac{e^{\beta E_b}}{(e^{\beta E_b} - 1)^2} \frac{1}{\Gamma_b},$$

$$\eta_f = \frac{2\beta}{15\pi^2} \int_0^\infty dp \frac{p^4}{\omega_f^2} \sum_{s=\pm} \left( \frac{e^{\beta E_s}}{(e^{\beta E_s} + 1)^2} \left[ \frac{p^2}{\Gamma_s} - \frac{4m_f^2(\Gamma_f^+ - \Gamma_s)}{(E_f + is\Gamma_f^+)(E_f + i\Gamma_f^-)} \right] \right). \quad (3)$$

مشاهدات ما نشان می دهند که ضریب چسبندگی وشکسانی بوزونی با افزایش دما افزایش می یابد در حالی که برای فرمیونها ضریب چسبندگی با کاهش همراه است. این مسئله را می توان در نمودار های شکل (۲) مشاهده نمود.



شکل ۲: ضریب چسبندگی وشکسانی بوزونی و فرمیونی به همراه تصحیحات دمایی جرمی

هم چنین ما مشاهده نمودیم که اثر این برانگیختگی های جدید بر روی ضریب چسبندگی وشکسانی با افزایش دما و پتانسیل شیمیایی قابل اغماض خواهد بود. این اثر در تطابق با نتایج [۳] است چرا که در این مقاله نشان داده شده است که با افزایش دما سهم پلاسمینوها در خلق ذرات جدید کمتر خواهد شد.

## سپاسگزاری

در این جا لازم می دانم از زحمات بی دریغ استاد ارجمندم خانم دکتر ندا صدوقی کمال تشکر و سپاس را داشته باشم که با کمک و راهنمایی های ایشان این کار صورت پذیرفت.

## مراجع

- [1] N. Sadooghi and F. Taghinavaz, "On the contribution of plasminos to the shear viscosity of a hot and dense Yukawa-Fermi gas," [arXiv:1404.1552 [hep-ph]]. 1
- [2] R. Lang and W. Weise, "Shear viscosity from Kubo formalism: NJL model study," Eur. Phys. J. A **50**, 63 (2014) [arXiv:1311.4628 [hep-ph]]. 2
- [3] H. A. Weldon, "Dynamical holes in the Quark-Gluon Plasma," Phys. Rev. D **40**, 2410 (1989). 2, 3

<sup>۱۱</sup>Skeleton expansion