

氏 名 太田 昌宏

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1587 号

学位授与の日付 平成25年3月22日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 素粒子原子核専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Gravity and Hydrodynamics

論文審査委員 主 査 教授 磯 暁
講師 夏梅 誠
教授 北澤 良久
教授 小玉 英雄
助教 濱田 賢二
助教 佐藤 勇二 筑波大学

論文内容の要旨

In the thesis Ohta studied various relationships between gravitational theories and hydrodynamic systems with several approaches. There are at least three approaches which realize this idea: (i) the membrane paradigm, (ii) the AdS/CFT duality, (iii) the BKLS approach. In this thesis, he focused on the AdS/CFT duality and the BKLS approach individually. He also considered the membrane paradigm.

The oldest realization is (i) the membrane paradigm (Price et al.), which has been studied in the context of the black hole physics. The authors (Price et.al.) tried to map the dynamics of the black hole to hydrodynamics and focused on the black hole's event horizon. An observer outside the black hole cannot see the inside of the black hole but can see only the surface of the black hole. Therefore, the black hole dynamics should be effectively described by a dynamical membrane on the stretched horizon, a timelike surface located slightly outside the true horizon. The membrane dynamics is described by the Einstein equation on the stretched horizon and the equation is mathematically same as the Navier-Stokes equations. However, the membrane paradigm has unpleasant features as a fluid like a negative bulk viscosity. In addition, the microscopic realization of the membrane paradigm is not clear. The membrane paradigm doesn't tell us the microscopic theory which the fluid is based on since just the transformation of the Einstein equation on the stretched horizon leads the hydrodynamic stress tensor. On the other hand, (ii) the AdS/CFT duality, based on string theory, provides several explicit realizations of microscopic understanding of the corresponding hydrodynamics since the D-branes provides both the gravitational theory and the corresponding field theory. For example, D3-branes provide the AdS₅ × S⁵ geometry and the strongly coupled N=4 Super Yang-Mills theory in the large-N_c limit. In addition, AdS/CFT duality is widely applied to real-world physics e.g., the quark-gluon plasma, the condensed matter physics and etc.

From the point of view of the holographic renormalization group, asymptotic AdS geometries correspond to field theories which approach conformal field theories in the UV limit. However, most of real world materials are not conformally invariant in the UV limit. Therefore, the formalism, which doesn't depend on asymptotics is needed. Recently, (iii) the BKLS approach is proposed by Bredberg, Keeler, Lysov, and Strominger. They introduced a timelike surface at arbitrary position for the "boundary"

where the fluid lives. This approach doesn't provide microscopic understanding of the fluid but should describe robust features of the correspondence between the gravity and hydrodynamics, instead.

First, he examined the AdS/CFT duality and the universality of the shear viscosity to the entropy density ratio η/s for various holographic superfluids. In the study of the AdS/CFT duality, fluids corresponding to a large class of geometries ensure the universality $\eta/s=1/(4\pi)$. The universality has been extensively studied, and this holds for all known examples which have been studied. He studies three types of the holographic superfluids as yet another example of the universality: s -wave, p -wave and $(p+ip)$ -wave holographic superfluids. They are characterized by the order parameter of the phase transition, i.e., in the bulk gravitational theories, the order parameter of the s -wave holographic superfluids is a scalar field, and the one of both p -wave and $(p+ip)$ -wave holographic superfluids is a $SU(2)$ gauge field. (The difference between the p -wave and $(p+ip)$ -wave is condensing components of the gauge field.) For the s -wave case, the ratio has the universal value $1/(4\pi)$ as in various holographic models. For the p -wave case, there are two shear viscosity coefficients because of the anisotropic boundary spacetime, and one coefficient has the universal value. For the other viscosity coefficient, the existing technique is not applicable since there is no tensor mode of metric perturbations which decouples from Yang-Mills perturbations. For the $(p+ip)$ -wave case, the situation is the same as the case of the latter component in the p -wave. These results implies that p -wave and $(p+ip)$ -wave holographic superfluids may not have the universality, and in fact, they are the first examples of the non-universal shear viscosity to the entropy density ratio. Our work triggered detailed studies of the non-universal shear viscosities.

Second, he studied another realization, the BKLS approach, where the fluid is defined by the Brown-York tensor on a timelike surface at $r=r_c$ in black hole backgrounds. He considers both Rindler space and the Schwarzschild-AdS (SAdS) black hole. The former describes an incompressible fluid, whereas the latter describes the vanishing bulk viscosity at arbitrary r_c . These two results, however, do not contradict with each other since the hydrodynamic regime used for the SAdS black hole "differs" from the hydrodynamic regime used for Rindler space (when expressed in terms of the SAdS variables). He also find an interesting "coincidence" with the black hole membrane paradigm which gives a negative bulk viscosity. In hydrodynamics, the velocity field is determined from the metric perturbations. Then, one can eliminate the velocity field completely in the hydrodynamic stress tensor. The resulting expression contains metric perturbations only, which is suitable to compare with the Brown-York tensor. In our

approach, the velocity field is a consequence of metric perturbations. In addition, he obtained one of the second-order hydrodynamic transport coefficient τ_{π} for the SAdS₅ black hole in the BKLS approach.

博士論文の審査結果の要旨

本論文は超弦理論のAdS/CFT (anti-deSitter/conformal field theory) 双対性を用いた流体力学の解析について、2つのテーマを論じている。AdS/CFT双対性によると、強結合の場の理論は重力系と等価だとされる。このため、この数年AdS/CFTはQCDや物性物理へと応用されている。特にAdS/CFTによると、強結合ヤン・ミルズ・プラズマのずり粘性率には普遍性がある。すなわち、ずり粘性率とエントロピー密度の比は (η/s) 、幅広いクラスの理論に対して一定値であることが示されている。この予言は、RHIC, LHCなどの重イオン実験の結果とあいまって注目されている。

しかし、この普遍性がどれほど一般的に成り立つのかについてははっきりした答えは得られていない。前半部分は、この点を問題にしている。出願者は「ホログラフィック超伝導/超流動」と呼ばれる一連のモデルを解析した。これらのモデルの解析を通して、太田さんは系が非等方性を持つ場合には、既存の η/s 普遍性の証明が適用できないことを指摘した。この部分の基となった論文が出て以降、実際にこれらの系が η/s の普遍性を破ることが示され、非等方性を持つ系での粘性は盛んに議論されるようになった。普遍性を破る既知の系は、このクラスに限られており、太田さんの研究が出発点となり、この分野は大きく発展した。

ブラックホールと流体力学の関係については、AdS/CFT以前から様々な手法が存在している。後半部分は、そのうちの一つBKLS (Bredberg-Keeler-Lysov-Strominger) 法を取りあげている。この手法によって、様々な手法を統一的に理解できると期待されている。重力理論の基本変数はメトリック (重力摂動) であるが、一方流体力学の基本変数は流体変数 (速度場) である。したがって、重力理論と流体力学を比べるうえで、流体変数と重力摂動の関係を同定する必要がある。ところが、AdS/CFT以外の多くの手法では、これを恣意的に定めているだけである。出願者は、流体変数を重力摂動の応答として定める、という手法をとった。このようにして流体変数を消去し、重力理論・流体力学どちらも重力摂動で記述され、直接比較が可能になる。(この手法はAdS/CFTから見ても自然な手法である。)そして、この方法でBKLS法を再構成し、これまで文献で得られた結果を再導出した。

さらに、体積粘性率 ζ についての問題を指摘し解決した。具体的には、AdS/CFTでは流体の場所として「AdS境界」を想定するが、BKLS法では任意の動径座標を想定する。シュワルツシルドAdSブラックホールの場合、BKLS法では動径座標に関わらず $\zeta=0$ を予言する。一方、ホライズン近傍の幾何をあらわすリンドラー時空の場合、非圧縮性流体を予言する。一見すると2つの結果が矛盾しているように思えるが、実はそうではないことを示した。シュワルツシルドAdSブラックホールでホライズン近傍の極限をとると、リンドラー時空が出てくるが、その過程で前者での流体極限 (低エネルギー長波長近似) と後者の流体極限は一致しない。後者での流体極限は、前者ではむしろ高エネルギー極限に相当することを明らかにした。

前半部分の研究成果は Progress of Theoretical Physics で出版済みであり、また後半部分の研究成果も近く Progress of Theoretical and Experimental Physics に出版予定である。また、出願者によるセミナーなどでの口頭発表もある。博士論文は非専門家に向けた導入から始まり、太田さんの研究の詳細が丁寧に記述されており、

学位論文としてふさわしいと認め、合格と評価した。