The Journal of the Convergence on Culture Technology (JCCT)
Vol. 5, No. 1, pp.385-388, February 28, 2019. pISSN 2384-0358, eISSN 2384-0366

http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2019.5.1.385
JCCT 2019-2-48

전자기파와 고차원 중력파 전달 고찰

Propagation of electromagnetic and gravitational waves in braneworld

이태훈*

Tae Hoon Lee*

요 약 5 차원 정적 다양체에 내재된 구형 대칭적인 시공간을 고려하여, 변형된 중력 이론의 하나인 DGP (Dvali, Gabadadze, and Porrati) 모형의 원거리 근사에서 측지선 방정식을 연구 하였다. 널(null) 측지선 방정식을 분석하여, 4차원 시공간에서 입자들의 유효 질량과 전달 속력을 구했다. 아인슈타인 일반상대론적 중력 이론을 규명하게 되는 중요한 업적 중에 하나인, 최근에 관측된 중력파 발견의 결과들과 측지선을 따르는 입자들의 관계성을 논의하였다. 4차원 시공간에서 전파되는 전자기파의 전달과 비교 검토 하였다.

주요어 : 전자기파와 중력파, 고차원 블랙홀, 변형 중력 이론

Abstract Considering spherically symmetric spacetimes embedded in a 5-dimensional static Lorentzian manifold, within the large distance limit of DGP model, we study null geodesic equations. We discuss possible relations of particles following the geodesics with the gravitational waves detected recently, in comparison with the electromagnetic waves propagaing in these brane spacetimes.

Key words : Electromagnetic and gravitational waves, Higher dimensional black holes, Modified gravity theories

Ⅰ. 서 론

2015년 가을, LIGO(Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory)라는 레이저 간섭계 중력파 관측소에서 중력파가 처음으로 관측되었다고 발표했고, 2017년 노벨 물리학상은 중력파 관측 관련 업적으로 Rainer Weiss, Barry C. Barish, Kip S. Thorne에게 부여되었다.

중력파는 중력 이론인 일반상대성 이론(theory of general relativity)의 제창자인 아인슈타인(Einstein)이 '시공간의 뒤틀림이 빛 속도로 전파될 것'이라고 100년 전에 예측했던 것인데, 그 후 많은 학자들의 각고의 노력 끝에 결실을 봐서, 지구에서 13억 광년 떨어진, 태양 질량의 수십 배인 두 블랙홀(black hole)의 합병(merger)으로 시공간이 뒤틀려 방출된 중력파를 2015년에 드디어 관측한 것이다. 그 이후 중력파들은 계속 관측되고, 중성자 별(neutron star)들의 합병에 의한 중력파와 강력한 전자기파의 발견도 이루어져, 두 파의 전파 속력 같은 성질 차이 연구도 가능해졌다.

한편, 우주처럼 큰 규모의 스케일(scale)에서는 아인슈타인 이론의 변형(modification) 필요성이 대두되었는데, 우주의 최근 가속을 설명하려는 노력의 일환으로 5차원 등 고차원 중력 이론이 연구되었다. 란달-선드럼

*정회원, 숭실대학교 물리학과(제1저자)
(~현재 숭실대학교 교수, 2007년 전국 기초과학연구소 연합회 부회장)
접수일: 2018년 10월 13일, 수정완료일: 2018년 12월 4일
게재확정일: 2019년 1월 6일

Received: October 13, 2018 / Revised: December 04, 2018
Accepted: January 06, 2019
*Corresponding Author: thlee@ssu.ac.kr
Dept. of Physics, Soongsil Univ, Korea

모형(Randall-Sundrum model)과 DGP 모형이 좋은 예이다.

본 논문에서 DGP 모형을 연구한다. 다음 II 절에서는, 5차원 시공간을 란달-선드럼처럼 휨(warp) 인자를 포함하는 계량(metric)으로 선택하여, DGP 모형의 (1) 식에 주어진 액션(action)으로부터 아인슈타인-류(like) 방정식 등을 구한다. 먼거리(large distance) 근사에서 3+1차원 퍼텐셜 함수가 없을 때, 구대칭성(spherical symmetry)을 갖는 정적 해(static solution)를 얻고, 중심 부근의 z-축에 수직한 운동으로 국한하여 5 차원 널-측지선(null-geodesic) 방정식을 연구한다. 참고문헌 [4]에서처럼, 측지선 방정식의 계수(parameter)들을 잘 조정함으로써 그 측지선 방정식을 4 차원의 질량(mass) 있는 물체의 측지선 방정식처럼 재-표현한다. III 절에서는 중력파와 전자기파의 중심에 대한 휘어짐(deflection)이 4차원에서 관측될 때 효과를 계산하여, 중력자의 유효 질량과 속력을 구한다. IV 절 결론에서 이러한 결과들의 의미를 토의한다.

II. 5 차원 측지선 방정식

5차원 중력은 다음 액션(action)으로 기술된다.

$$S=\int d^4x dy\sqrt{-g}\,[M_5^3R-\Lambda]+S_B+S_D \qquad ...(1)$$

여기서 3+1 차원 막(brane)의 액션과 DPG 액션이 추가되었다.

$$S_B=-\int\sqrt{-g_i}\,d^4x\,V_i$$

$$S_D=M_4^2\int\sqrt{-g_4}\,d^4x R_4.$$

위로부터 유도되는 아인슈타인(류) 방정식의, 4차원 부분과 5번째 차원 부분의 공식은 다음과 같다.

$$G_{\alpha\beta}=\overline{G_{\alpha\beta}}+g_{\alpha\beta}(6(\sigma')^2-3\sigma'') \qquad ...(2)$$

$$=-\frac{1}{2M_5^3}g_{\alpha\beta}[\Lambda+\sum V_i\delta(y-y_i)$$

$$+2M_4^2\overline{G}_{\alpha\beta}\delta(y-y_1)],$$

$$G_{yy}=-\frac{e^{2\sigma}R_4}{2}+6(\sigma')^2=-\frac{\Lambda}{2M_5^3}.$$

여기서 바(bar)가 붙은 물리량은 아래의 바가 붙은 계량(metric)에서 계산된 양(quantity)이다.

$$ds^2=e^{-2\sigma(y)}\overline{g_{\alpha\beta}}dx^\alpha dx^\beta+dy^2.$$

특별히 간단한 경우로 $V_1=V_2=0$일 때, $r\gg r_c$ ($r_c=\frac{M_4^2}{2M_5^3}$)의 먼 거리 근사에서, 위 방정식들은 다음 해들(solutions)은 갖는다.

$$e^{-2\sigma(y)}=(1-y/y_0)^2,\ \ R_4=12/y_0^2,$$

$$ds^2=e^{-2\sigma}(-Bdt^2+Adr^2+r^2d\Omega)+dy^2,$$

$$B(r)=1/A(r)=1-a/r-\lambda r^2/3.$$

여기서 $a=2GM$ (M은 중심에 있는 천체의 질량), λ는 참고문헌 [6]에서 보여주듯이, 고차원에서 유도된(induced) 유효 우주 상수(effective cosmological constant)이다.

위 5차원 시공간에서 중심 부근의 z-축에 수직한 운동의 (중력파 운동에 해당되는) 널(null) 측지선 방정식을 풀면

$\left(\frac{dr}{d\tau}\right)^2+A^{-1}(1+\frac{L^2}{\alpha r^2})=\frac{E}{\alpha}$ 이 되고,

이로부터 z-축을 회전하는 각도와 $u=1/r$의 관계식

$\frac{d\phi}{du}=(au^3-u^2+\gamma+\lambda f(u))^{-\frac{1}{2}}$을 얻는다.

(여기에서 $f=1/3[1+\alpha/(L^2u^2)]$이고, L은 각운동량, E는 에너지, α는 상수이다.)

III. 전자기파와 중력파의 전달 차이

5차원으로는 다른 힘들은 전달되지 않고 중력만이 전달되므로, 질량이 없어서(massless) 5차원 널(null) 측지선을 따르는 중력파는, 4차원에서 널 측지선을 따라 전달되는 전자기파의 무거운 물체 주변의 굴절(deflection)에 비해 다음 Δ 만큼 차이(difference) 나게 휨으로써, 4차원에서 관측될 때 유효 질량을 얻고, 속력도 빛 속력 값 c보다 작을 것이다.

$$\Delta = (3\pi/4-2)a/r_p \quad ...(3)$$

(r_p는 무거운 물체 중심으로부터 근일점 까지 거리이다.)

$\frac{v_{gw}}{c}-1=\sqrt{1-\frac{m_{gw}^2c^4}{E_{gw}^2}}-1$ 이라는 공식과 (3) 식으로부터, (참고문헌 [5] 등에서 보여준) 최근 관측된 중성자들 합병으로 방출된 $L(<100Mpc)$을 이동한 중력파와 전자기파의 속력 차에 대한 다음 결과를 얻는다.

$$L\Delta/L=10^{-15}$$

이는 중력자(graviton)의 유효 질량($<10^{-22}\,eV$)에 대한 실험 결과와 모순이 없다.

한편, $r<<r_c$의 가까운 거리(short distance)에서는 DGP 모형은 5차원 아인슈타인 이론으로 접근된다. 그러한 근사에서, $r=0$ 원점 외에는 물질이 없는 진공 해(vacuum solution)는, (2)식에서 $\overline{G}_{\alpha\beta}=0$을 만족하는 (참고문헌 [3]의) 블랙 끈(black string) 해에, DGP 보정(correction) 항이 더해져, 먼거리 근사 때와는 다르게 4차원 포텐셜을 고려할 때 다음 계량으로 구해진다.

$$ds^2 = e^{-2ky}(-\overline{B}dt^2+\overline{A}dr^2+r^2d\Omega)+dy^2,$$

$$\overline{B}=1/\overline{A}=1-a/r-2a\ln(r/r_c)/(\pi r_c).$$

먼거리 근사 경우에서와 비슷하게, 여기서도 5 차원 중력파는 4차원에서 유효 질량을 갖게 되며, 전자기파 보다 다소 늦은 전파 속도를 가짐을 보인다.

Ⅳ. 결론

본 연구 보고서에서, 최근에 관측된 중력파와 전자기파 전달의 차이를 고려하였다. 5 차원 중력 이론에서 널 측지선을 따르는 중력파를 4 차원에서 관측할 때 유효 질량을 얻고, 전파 속력도 빛 속력과는 다를 수 있음을 보였다. 향후 더 자세한 계산과 관측 데이터와의 비교 연구가 기대된다.

중력파의 관측은 Einstein의 일반상대성 이론이 아직도 틀리지 않다는 증명 외에, 왜 중요할까? 1880년대에 전자기파(electromagnetic wave)를 발견한 Hertz도 그 쓸모를 잘 모르고, Maxwell 이론의 증명으로서 의의만을 주장하였었다. 중력파 관측은 100년을 거쳐 꾸준히 투자한 거대 기초과학의 승리라고 할 수 있다. 특히 재작년 노벨 물리학상 수상과 관련한 LIGO의 논문에는 한국 연구자들도 여러 명이 공저자로 들어가 있다. 기초 과학까지 멀리보고 꾸준히 투자가 된다면 우리에게 요원해 보였던 과학 분야의 노벨상도 이제는 가까워지고 있다고 생각된다. 100여년 후 미래에는 청소년들이 중력파로 (다 차원의 다양한) 외계인들과 소통하느라 지구인들과의 스마트 폰 대화에는 관심이 줄어들지도 모를 일이다.

References

[1] B. P. Abbott et al. [LIGO Scientic Collaboration and Virgo Collaboration], Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016) [arXiv:1602.03837].
[2] L. Randall and R. Sundrum, Phys. Rev. Lett. 83, 3370 (1999) [arXiv:hep-ph/9905221];
L. Randall and R. Sundrum, Phys. Rev. Lett. 83 (1999) 4690;
G. Dvali, G. Gabadadze and M. Porrati "4D gravity on a brane in 5D Minkowski space". Physics Letters. B485 (2000) 208.
[3] A. Chamblin, S.W. Hawking, H.S. Reall, Phys. Rev. D 61, 065007 (2000).
[4] B. F. Schutz, A First Course in General Relativity (Cambridge University Press, New York, 2013), Chap. 11.
[5] B.P. Abbott et al. (LIGO Scientic Collaboration and Virgo Collaboration), Phys. Rev. Lett. 119, 161101 (2017);
I. M. Shoemaker and K. Murase, Phys. Rev. D 97, 083013 (2018) [arXiv:1710.06427 (astro-ph)].
[6] T. H. Lee, Int. J. Mod. Phys. D 25, 1650004 (2015).
[7] T. H. Lee and B. J. Lee, Phys. Rev. D 69, 127502 (2004);
J.-W. Lee, J. Korean Phys. Soc. 54, 2622 (2009) [arXiv:0801.1442 (astro-ph)].
[8] V. C. Rubin, N. Thonnard, and W. K. Ford, Jr., Astrophys. J. 238 (1980) 471.
[9] P. D. Mannheim, Astrophys. J. 479 (1997) 659, astro-ph/9605085.
[10] S. Chatrchyan et al. [CMS Collaboration], Phys. Lett. B 716 (2012) 30, arXiv:1207.7235 [hep-ex].
[11] G. Aad et al. [ATLAS Collaboration], Phys. Lett. B 716 (2012) 1, arXiv:1207.7214 [hep-ex].

[12] N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos, and G. Dvali, Phys. Lett. B429 (1998) 263;
N, Arkani- Hamed, S. Dimopoulos, G. Dvali, and N. Kaloper, Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 586.
[13] W. D. Goldberger and M. B. Wise, Phys. Rev. Lett. 83 (1999) 4922.
[14] A. G. Riess et al., Astron. J. 116 (1998) 1009, astro-ph/9805201;
S. J. Perlmutter et al., Astrophys. J. 517 (1999) 565;
S. Perlmutter, M.S. Turner and M.J. White, Phys. Rev. Lett. 83 (1999) 670, astro-ph/9901052;
A. G. Riess et al., Astrophys. J 659 (2007) 98;
D.N. Spergel et al. (WMAP Collaboration), Astrophys. J. Suppl. 170 (2007) 377, astro-ph/0603449.
[15] G. Hinshaw et al. [WMAP Collaboration], arXiv:1212.5226 [astro-ph];
G. Hinshaw et al. [WMAP Collaboration], Astrophys. J. Suppl. 180 (2009) 225, arXiv:0803.0732 [astro-ph].
[16] P. A. R. Ade et al. [Planck Collaboration], arXiv:1303.5076 [astro-ph.CO].
[17] S.-T. Hong, J. Lee, T. H. Lee, P. Oh Phys. Rev. D78 (2008) 047503, arXiv:0801.3781 [gr-qc].
[18] J. Ponce de Leon, Gen. Rel. Grav. 36 (2004) 1333, gr-qc/0310078;
J. Ponce de Leon, Mod. Phys. Lett. A 17 (2002) 2425, gr-qc/0207001
[19] E. J. Copeland, M. Sami, and S. Tsujikawa, Int. J. Mod. Phys. D15 (2006) 1753,
arXiv:hep-th/0603057;
H. Culetu, E. P. J. Plus (2015) 130, arXiv:1410.2301 [gr-qc].
[20] G. Dvali and G. Gabadadze, Phys. Rev. D63 (2001) 065007, arXiv:hep-th/0008054.
[21] R. Gregory, V. A. Rubakov, and S. M. Sibiryakov, Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 5928,
arXiv:hep-th/0002072.
[22] S. Park and Y. Choi, “Analysis of Standardization Trend and Marketability with Tele-screen Service Platform for Smart City Foundation” JCCT Vol. 1, No. 2
[23] Seokjin Im, “Mathematical Performance Model of Two-Tier Indexing Scheme in Wireless
Data Broadcasting“ IJACT Vol.6 No.4.

※ It was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by Ministry of Education, Science and Technology (NRF-2017 R1D1A1B06032249).