

# Хорндескийн онол дахь харанхуй энерги

Б. Билгүүн, Ц. Энхбат\*  
Шинжлэх ухааны академи,  
Физик технологийн хүрээлэн,  
Онол ба Их энергийн салбар  
Улаанбаатар хот 13330, Монгол Улс

С. Ко<sup>1</sup>, Т. Гансүх<sup>1,2</sup>

Жежүгийн үндэсний их сургууль, Шинжлэх ухааны боловсролын тэнхим, Жежү хот, 63243, БНСУ<sup>1</sup>,  
Суурь судалгааны хүрээлэн, Ертөнцийг судлах онолын физикийн төв, Даежон хот 34051, БНСУ<sup>2</sup>

Энэхүү илтгэлд Хорндескийн онолоос үүдэн гарах харанхуй энергийн загварыг скаляр орон өөртэйгөө экспоненциал болон гравитацийн оронтой уламжал хэлбэрээр харилцан үйлчилдэг тохиолдолд хийсэн хамтын судалгаагаа танилцуулна. Экспоненциалийн зэрэг эерэг үед өөрийн уламжлал бүхий харилцан үйлчлэл нь хожуу эриний ертөнцөд хүчтэй нөлөөтэй болохыг харуулна. Нөгөө талаас, ертөнцийн хувьслын шийд нь зөв байхын тулд гравитацийн оронгийн харилцан үйлчлэл нь цацаргалтын эринд давамгайлах ёстой ба харин одоогийн эринд хэмжээ нь эрс суларч ирнэ. Бидний загвар нь харанхуй энергийн төлөвийн тэгшитгэлтийн хязгаарлалтыг бүрэн хангах бөгөөд хос нейтрон оддын нэгдлээс үүссэн гравитацийн долгион GW170817, цахилгаан соронзон дохио GRB170817A хэмжилтүүдээс гарган авсан гравитацийн долгионы хурдны хурдын хязгаартай зөрчилдөхгүй.

## I. Оршил

Хожуу үеийн ертөнцийн хурдасч буй тэлэлт [1, 2], Сансрын богино долгионы дэвсгэр цацаргалтын анизотроп [3–7] болон Барионы акустик осцилляц (BAO) [8] бүгд ертөнцөд харанхуй энерги оршин буйн баримт болдог. Үүний хамгийн түгээмэл тайлбар нь Космологийн тогтмол боловч хэт өндөр нарийвчлалтай анхны нөхцлийг шаарддаг. Өөр нэг санаа бол инфляцыг удирддаг удаан өнхрөх буюу бараг хавтгай потенциалтай, мөн нэмээд харанхуй энергийн шийд болох скаляр орон юм. Сүүлийн арваад жилд дотоод зөрчилгүй, сөрөг нормтой чөлөөний зэрэг (англи хэлнээ "ghost" буюу "сүнс" гэж нэрлэдэг) агуулаагүй Хорндескийн гравитацийн онолыг [9] харанхуй энергийн скаляр оронгийн шийд болгон эрчимтэй судалж байна. Хорндескийн онолыг хоёрдугаар эрэмбийн хөдөлгөөний тэгшитгэлтэй гравитацийн хамгийн ерөнхий скаляр-тензор онол гэж үздэг.

Хос нейтрон оддын нэгдлээс үүссэн гравитацийн долгион GW170817 [10], харгалзах цахилгаан соронзон дохио GRB170817A [11]-г бүртгэн авсан нь Олон мессенжер бүхий астрономийн эхийг тавьсанаар Космологийн салбарт шиг  
\*E-mail: enkhbatts@mas.ac.mn

нэ эринг авчирдаг байна. Эйнштейний онолыг өргөтгөсөн Хорндескийн төрлийн онолуудад уг хэмжилт урьд хожид байгаагүй шинэ хязгаарлалт тавих болов [12]. Үүнд гравитацийн болон гэрлийн долгионы тархах хурдын харьцаа

$$-3 \times 10^{-15} \leq \frac{c_T}{c} - 1 \leq 7 \times 10^{-16}, \quad (1)$$

мушид байх ёстой болж байна.

Энэхүү илтгэлд бид экспоненциал потенциалтай, гравитацийн оронтой уламжлалаар дамжин харилцан үйлчлэлдэг скаляр оронг агуулсан Хорндескийн онолын хүрээнд хийсэн судалгаа, тухайлбал, уг онолын шийдийн динамик анализ, харгалзах ертөнцийн хувьслын шийд нь хэмжилтүүдтэй таарч буй зэрэг үр дүнг [13] багтаах болно.

## II. Хөдөлгөөний тэгшитгэл ба динамик систем

Бидний авч үзсэн  $\phi$  скаляр оронгоор өргөтгөсөн онолын үйлчлэл нь:

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left[ \frac{M_{pl}^2}{2} R - \frac{1}{2} \left( g^{\mu\nu} \frac{\alpha}{M^3} \xi(\phi) g^{\mu\nu} \partial_\rho \partial^\rho \phi + \frac{\beta}{M^2} G^{\mu\nu} \right) \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi - V(\phi) \right] + S_{m,r}. \quad (2)$$

Энд  $S_{m,r}$  матер ба цацаргалтын стандарт үйлч-

лэл.  $\xi(\phi)$  ба  $\beta (\neq 0)$  гишүүдийг авч үзсэнээрээ

Брахма [14] нарын судалгаанаас ялгаатай, илүү ерөнхий тохиолдол юм. Томгёо болон тооцоог

илүү дэлгэрэнгүйгээр [13]-с харна уу. Скаляр оронд харгалзах нягт ба даралт нь

$$\rho_\phi = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi) + \frac{3\alpha}{M^3}H\xi\dot{\phi}^3 \left(1 - \frac{\dot{\xi}}{6H\xi}\right) - \frac{9\beta}{2M^2}\dot{\phi}^2 H^2, \quad (3)$$

$$p_\phi = \frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - V - \frac{\alpha}{M^3}\xi\dot{\phi}^3 \left(\frac{\ddot{\phi}}{\dot{\phi}} + \frac{\dot{\xi}}{2\xi}\right) + \frac{\beta\dot{\phi}^2}{2M^2} \left(2\dot{H} + 3H^2 + 4H\frac{\ddot{\phi}}{\dot{\phi}}\right). \quad (4)$$

Харгалзах оронгийн тэгшитгэл нь:

$$\dot{\rho}_\phi + 3H(1 + \omega_\phi)\rho_\phi = 0, \quad (5)$$

ба төлөвийн тэгшитгэлийн параметр  $\omega_\phi \equiv p_\phi/\rho_\phi$ , системийн эффектив төлөвийн параметрийг

$$\omega_{eff} \equiv -1 - \frac{2\dot{H}}{3H^2} \quad (6)$$

гэж тодорхойлно. Системийн динамикт анализ хийхийн тулд дараах хэмжээсгүй параметруудийг тодорхойлж:

$$x_1 = \frac{\dot{\phi}}{\sqrt{6}M_{pl}H}, \quad x_2 = \frac{\sqrt{V}}{\sqrt{3}M_{pl}H}, \quad (7)$$

$$x_3 = -\frac{6\alpha}{M^3}\xi(\phi)\dot{\phi}H, \quad x_4 = \frac{9\beta}{M^2}H^2, \quad (8)$$

$$\lambda = -M_{pl}\frac{V_{,\phi}}{V}, \quad \sigma = -\frac{M_{pl}}{\sqrt{6}}\frac{\xi_{,\phi}}{\xi}. \quad (9)$$

динамик тэгшитгэлийг бичвэл:

$$\frac{d \ln x_1}{dN} = \frac{\ddot{\phi}}{H\dot{\phi}} - \frac{\dot{H}}{H^2}, \quad (10)$$

$$\frac{d \ln x_2}{dN} = -\left(\sqrt{\frac{3}{2}}x_1\lambda + \frac{\dot{H}}{H^2}\right), \quad (11)$$

$$\frac{d \ln x_3}{dN} = \frac{\dot{\xi}}{H\xi} + \frac{\ddot{\phi}}{H\dot{\phi}} + \frac{\dot{H}}{H^2}, \quad (12)$$

$$\frac{d \ln x_4}{dN} = 2\frac{\dot{H}}{H^2}, \quad (13)$$

$$\frac{d \ln \Omega_r}{dN} = -\left(4 + 2\frac{\dot{H}}{H^2}\right), \quad (14)$$

$$\frac{d\lambda}{dN} = \sqrt{6}x_1\lambda^2(1 - \Gamma), \quad (15)$$

$$\frac{d\sigma}{dN} = 6x_1\sigma^2(1 - \Delta), \quad (16)$$

байна. Энд  $N = \ln a$ ,  $\Gamma \equiv V_{,\phi\phi}V/V_\phi^2$ ,  $\Delta \equiv \xi_{,\phi\phi}\xi/\xi_\phi^2$ .  $N_i$ ,  $D_i$ ,  $K_i$  функцуудын тодорхойлолтыг [13]-с харна уу.

Тооцоо хийхдээ бид

$$V(\phi) = V_0 e^{-\lambda\phi/M_{pl}}, \quad \xi(\phi) = \xi_0 e^{-\sqrt{6}\sigma\phi/M_p} \quad (17)$$

хэлбэртэй потенциалыг авч үзсэн. Энд  $\lambda$ ,  $\sigma$  тогтмол параметрууд. Тэгшитгэл (2)-д Эйнштейний онолтой харьцуулхад  $\lambda$ ,  $\sigma$  нэмэлт параметрууд авч үзсэн тул критик цэгийн тоо 11 болж ихсэнэ. Эдгээр цэгүүдийг Зураг 1-д динамик системийн фазын огторгуйд дүрсэлсэн байна. Тогтвортой шийд нь  $-\sqrt{3} < \lambda < 0 \cap \sigma < -\lambda/\sqrt{6}$  эсвэл  $0 < \lambda < \sqrt{3} \cap \sigma > -\lambda/\sqrt{6}$  мужид  $x_1 = \lambda/\sqrt{6}$ ,  $x_2 = \pm\sqrt{1 - \lambda^2/6}$ ,  $x_3 = x_4 = 0$  хөх цэгт харгалзаж байна.

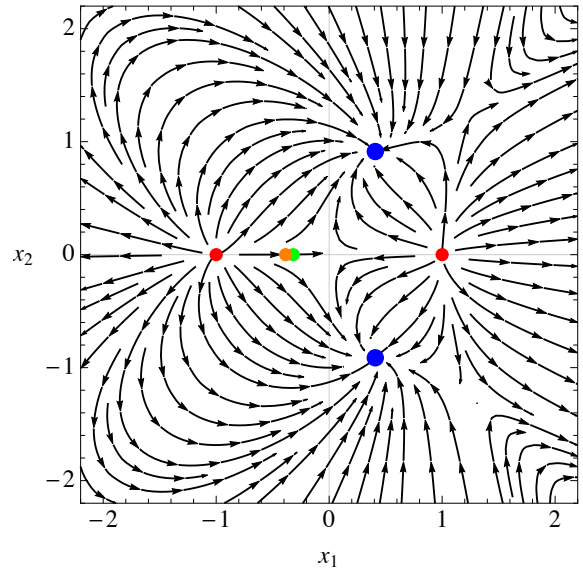


Fig. 1: Тэгшитгэл (10)–(14)-д харгалзах фазын огторгуйг  $\lambda = 1$ ,  $\sigma = \sqrt{3}$  тохиолдолд дүрслэв. Улаан, ногоон болон улбар шар цэгүүд критик цэгийн шийдүүд ба хөх цэг нь тогтвортой шийдэд харгалзана.

Зураг 2-д  $\Omega_i(z)$  ( $i = r, m, \phi$ ),  $x_i(z)$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ),  $\omega_{eff}(z)$  болон  $\omega_\phi(z)$ -н хугацаанаас хэрхэн хамаарч буйг харуулав. Энэ жишээнд  $1 + z = 1.46 \times 10^7$  үед анхны нөхцөлийг  $x_1 = 3 \times 10^{-25}$ ,  $x_2 = 10^{-12}$ ,  $x_3 = 10^{-2}$ ,  $x_4 = 1$ ,  $\Omega_r = 0.999$ , чөлөөт тогтмол

параметруудийг  $\sigma = -40$   $\lambda = 1$  гэж сонгож авсан. Төлөвийн параметруудийн хувьслаас бид ертөнцийн хувьсал нь зөв дараалалтай буюу цацаргалт ( $\omega_{eff} \simeq 1/3$ ), матер ( $\omega_{eff} \simeq 0$ ) тэгээд харанхуй энерги ( $\omega_{eff} \simeq -1$ ) давамгайлсан үеүүдийг дамжиж байгааг харж байна. Шинээр нэмсэн ска-

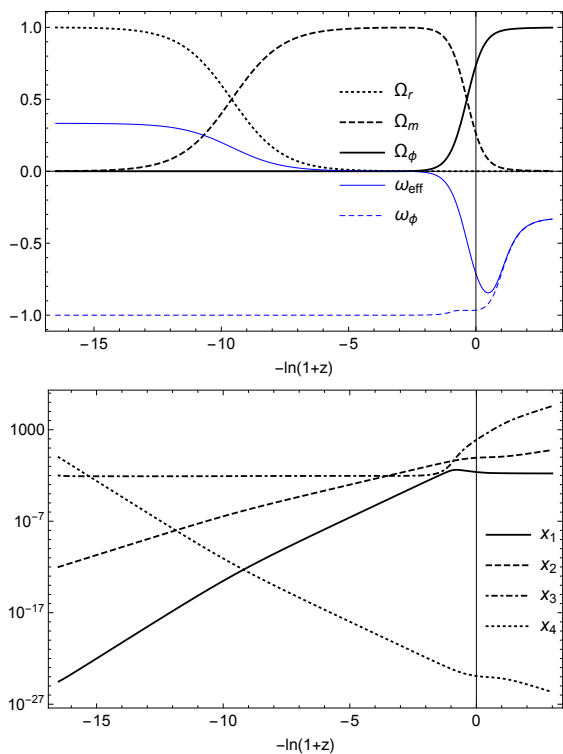


Fig. 2:  $\Omega_i, \omega_i$  (дээд),  $x_i$  (доод) улаан шилжилтийн параметрээс хэрхэн хамаарч буйг  $\sigma = -40, \lambda = 1$  үед харуулав.

ляр орон  $\phi$ -ийн төлөвийн параметрд CMB, BAO, SNIa болон  $H_0$  хэмжилтүүдээс [15] ирэх хязгаарлалтыг Зураг 3-д үзүүлэв. Тасралтгүй, тасархай, цэгэн муруйнууд эдгээр хэмжилтүүдийн 1, 2 ба  $3\sigma$  хязгаарт харгалзана. Бидний онолын тооцоог цэнхэр шугамаар зурсан ба үүнд харанхуй энергийн төлөвд Шивалье-Поларски-Линде (CPL) [16] параметрчлэлийг ашиглав:

$$\omega(z) = \omega_0 + \frac{z}{1+z} \omega_a. \quad (18)$$

Эдгээр жишээ нь бидний авч үзсэн Хорндескийн онолд скаляр-тензор харилцан үйлчлэлтэй скаляр орон нь харанхуй энергийг тайлбарлах боломжтойг харуулж байна.  $\sigma = -40, \lambda = 1$  (дээд) болон  $\sigma = -14, \lambda = 0.8$  үед скаляр орны төлөвийн параметр нь космологийн хэмжилтүүдтэй харгалзан 1,  $2\sigma$ -с хэтрэхгүй түвшинд таарч байна.

Скаляр-тензор харилцан үйлчлэл нь гравитацийн долгионы тархах хурдад нөлөөлөх ба бид энэ

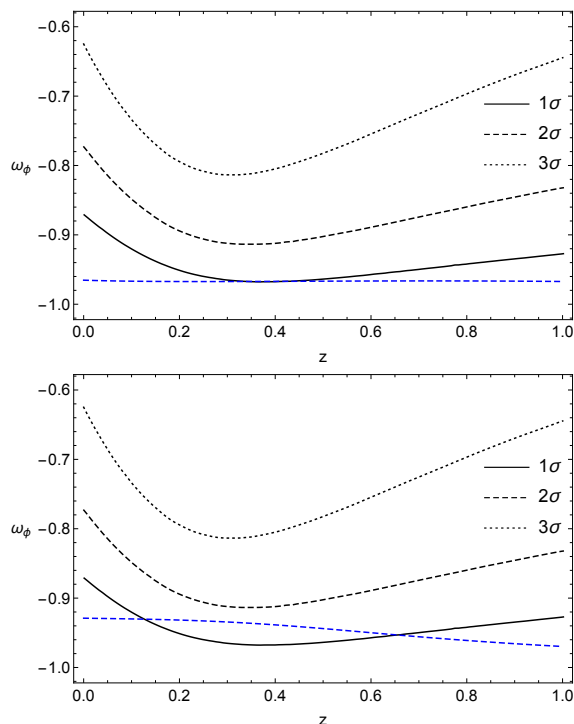


Fig. 3:  $\omega_\phi$  - ийн хувьслыг  $\sigma = -40, \lambda = 1$  (дээд) болон  $\sigma = -14, \lambda = 0.8$  (доод) тохиолдлуудад харуулав.

загварт

$$c_T^2 = \frac{1 - \Sigma}{1 + \Sigma} \quad (19)$$

$$\Sigma \equiv \beta \dot{\phi}^2 / (2M^2 M_{pl}^2) = x_1^2 x_4 / 3 \quad (20)$$

хязгаарлалтыг хангаж байгаа эсхийг шалгах хэрэгтэй. Үүнийг GW170817 [10] гравитацийн долгион, харгалзах цахилгаан соронзон дохио GRB170817A [11] хэмжилтүүдээс гарган авсан Тэгшитгэл (1) хязгаартай тулгавал:

$$-7 \times 10^{-16} \lesssim \Sigma \lesssim 3 \times 10^{-15} \text{ буюу} \quad (21)$$

$$-2.1 \times 10^{-15} \lesssim x_1^2 x_4 \lesssim 0.9 \times 10^{-14}, \quad (22)$$

байх ёстой. Манай загвар энэхүү хэмжилттэй таарч байгааг Зураг 4-с харж болно.

### III. Дүгнэлт

Энэхүү илтгэлд Хорндескийн онолд харанхуй энергийг тайлбарлах шийдийг тооцоолсон судалгааны үр дүнгээ танилцуулсан ба бидний олсон шийд нь тогтвортой, ертөнцийн хувьслыг зөв дүрсэлж байгааг харуулав. Мөн скаляр-тензор харилцан үйлчлэлээс үүдэлтэй гравитацийн долгионы хурдад нөлөөлөх хэмжээ GW170817 [10] гравитацийн долгион, харгалзах цахилгаан соронзон до-

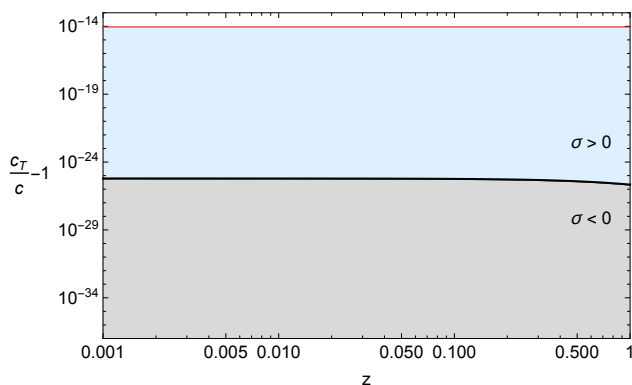


Fig. 4: Зураг 2-тэй ижил анхны нөхцөлтэй  $c_T/c - 1$ -ийг үзүүлэв ( $\lambda = 1$ ). Хэвтээ улаан шугам нь Тэгшитгэл (21)-д байгаа дээд хязгаарыг харуулав. Саарал муж нь  $\sigma < 0$ , цэнхэр муж нь  $\sigma > 0$ , тасралтгүй зураас нь  $\sigma = 0$ -д тус тус харгалзана.

хио GRB170817A [11] хэмжилтийн хязгаараас хэтэрэхгүй байгааг харуулав.

## Талархал

Б. Билгүүн, Ц. Энхбат нарын судалгааг БШУ-СЯ, ШУТ Сантай байгуулсан ШУСС-2019/31 дугаарт суурь судалгааны төслөөс, С. Ко, Т. Гансүх нарын судалгааг Жежүгийн үндэсний ИС-ийн 2019 оны шинжлэх ухааныг дэмжих програмаас, Т.Гансүхийг Даежонг дахь Суурь судалгааны хүрээлэнгийн IBS-R018-D дугаарт төслөөс, мөн С. Ко, Т. Гансүх нарыг БНСУ-ын Үндэсний судалгааны сангаас (NRF2016R1D1A1B04932574) тус тус санхүүжүүлсэнд талархал илэрхийлэв.

- [1] A. G. Riess *et al.* [Supernova Search Team], “Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant,” *Astron. J.* **116**, 1009 (1998) [astro-ph/9805201];
- [2] S. Perlmutter *et al.* [Supernova Cosmology Project Collaboration], “Measurements of  $\Omega$  and  $\Lambda$  from 42 high redshift supernovae,” *Astrophys. J.* **517**, 565 (1999) [astro-ph/9812133];
- [3] D. N. Spergel *et al.* [WMAP Collaboration], “First year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Determination of cosmological parameters,” *Astrophys. J. Suppl.* **148**, 175 (2003) [astro-ph/0302209];
- [4] G. Hinshaw *et al.* [WMAP Collaboration], “Nine-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Parameter Results,” *Astrophys. J. Suppl.* **208**, 19 (2013) [arXiv:1212.5226 [astro-ph.CO]];
- [5] P. A. R. Ade *et al.* [Planck Collaboration], “Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters,” *Astron. Astrophys.* **571**, A16 (2014) [arXiv:1303.5076 [astro-ph.CO]];
- [6] P. A. R. Ade *et al.* [Planck Collaboration], “Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters,” *Astron. Astrophys.* **594**, A13 (2016) [arXiv:1502.01589 [astro-ph.CO]];
- [7] N. Aghanim *et al.* [Planck Collaboration], “Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters,” arXiv:1807.06209 [astro-ph.CO];
- [8] D. J. Eisenstein *et al.* [SDSS Collaboration], “Detection of the Baryon Acoustic Peak in the Large-Scale Correlation Function of SDSS Luminous Red Galaxies,” *Astrophys. J.* **633**, 560 (2005) [astro-ph/0501171];
- [9] G. W. Horndeski, “Second-order scalar-tensor field equations in a four-dimensional space,” *Int. J. Theor. Phys.* **10**, 363-384 (1974);
- [10] B. Abbott *et al.* [LIGO Scientific and Virgo], “GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral,” *Phys. Rev. Lett.* **119**, no.16, 161101 (2017);
- [11] B. Abbott *et al.* “Gravitational Waves and Gamma-rays from a Binary Neutron Star Merger: GW170817 and GRB 170817A,” *Astrophys. J.* **848**, no.2, L13 (2017);  
B. Abbott *et al.* “Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger,” *Astrophys. J.* **848**, no.2, L12 (2017);  
D. Coulter *et al.* “Swope Supernova Survey 2017a (SSS17a), the Optical Counterpart to a Gravitational Wave Source,” *Science* **358**, 1556 (2017);
- [12] J. M. Ezquiaga and M. Zumalacárregui, “Dark Energy After GW170817: Dead Ends and the Road Ahead,” *Phys. Rev. Lett.* **119**, no.25, 251304 (2017);
- [13] B. Bayarsaikhan, S. Koh, E. Tsedenbaljir, G. Tumurtushaa, “Constraints on dark energy models from the Horndeski theory,” [arXiv:2005.11171];
- [14] S. Brahma and M. Wali Hossain, “Avoiding the string swampland in single-field inflation: Excited initial states,” *JHEP* **1903**, 006 (2019);
- [15] D. M. Scolnic *et al.*, “The Complete Light-curve Sample of Spectroscopically Confirmed SNe Ia from Pan-STARRS1 and Cosmological Constraints from the Combined Pantheon Sample,” *Astrophys. J.* **859**, no. 2, 101 (2018);
- [16] M. Chevallier and D. Polarski, “Accelerating universes with scaling dark matter,” *Int. J. Mod. Phys. D* **10**, 213-224 (2001);  
E. V. Linder, “Exploring the expansion history of the universe,” *Phys. Rev. Lett.* **90**, 091301 (2003).