宇宙マイクロ波背景放射による原始重力波探査

重力波若手交流会 2014.3.7 高エネ研 都丸 隆行



宇宙マイクロ波背景放射(CMB)

ビッグバン宇宙論 (ガモフ、1948)

宇宙に存在する物質の73 wt%は水素、24 wt%はヘリウム、 これより重い元素はわずか3 wt%である。なぜ?

→宇宙初期に高温の火の玉状態が存在すれば、核反応で 効率よく軽元素を合成できる。(αβγ理論)







E. Hubble, PNAS, 15 (1929), 168.

宇宙膨張は銀河系外の星雲の観測データから1929年にハッブルにより発見された。

T=3000Kで黒体放射された電磁波($\lambda \sim 5\mu m$)は、宇宙膨張と共に波長が引き 延ばされ、現在は数K($\lambda \sim mm$)の黒体になっているはず!

ビックバン宇宙論の3つの柱

- 宇宙膨張
- 元素存在比
- マイクロ波の黒体放射

田中春夫ら(名大,1951) 宇宙の温度が < 5K であることを示した。 空 基準光源1(常温300K)







DMRによる温度差計測 ΔT = 10µKで温度分布が存在することを確認。

宇宙の誕生からわずか38万年後には、宇宙の階層構造を作るタネが存在した! (重力不安定説の根拠)

2006年度ノーベル物理学賞

COBEの角度分解能: 7° <- 地平線の大きさは~2°

つまり、COBEの観測したムラムラは光錐の外にあり、 宇宙誕生から一度も相互作用していないはず。



なのに、何故こんなに宇宙は一様なんだろう? (COBEのムラムラは1/100,000の大きさ)

やっぱり、インフレーション?

2001 WMAP衛星

64GHzで0.2度角の極めて高分解能のCMB 温度分布測定を達成





WMAPのもたらした驚くべき事実





CMBが偏光を獲得するメカニズム: Thomson 散乱





Quadrupole 非等方性の場合



13

Dipole 非等方性の場合



温度のQuadrupole分布を生じるメカニズム 1: 密度揺らぎ

小松さんの説明より



Thomson散乱による偏光は、天空に必ず対称な分布パターンを作る。



-> E-mode と呼ばれる。



WMAPによるE-mode 偏光のマップ

E-modeはすでに検出されており、Thomson散乱によるメカニズムを支持している。14

温度のQuadrupole分布を生じるメカニズム 2: 重力波

重力波による 質点の 運動

重力波のX mode (h_x)

重力波には45°ずれた 2つの偏光がある。





重力波の + mode (h₊) の場合



重力波の X mode (h_x) の場合





k

k

つまり

重力波 + mode は通常の音波による密度揺らぎと同じ。 -> E-mode(対称な分布; Parity保存) 重力波 X mode は E-mode と異なるねじれた分布。 -> B-mode と呼ばれる。(非対称な分布; Parity非保存)

天球におけるCMB偏光の分布パターン



このような、B-mode パターンは、 現在のところ<mark>重力</mark>からしか考えられない。

もう1つの B-mode: 重力レンズ



1919*年エディントン(英)は太陽背後の星の光が太陽近傍で曲がることを発見し、* 一般相対論を初めて実証した。



しかし、B-modeは非常に小さい効果。



原始重力波の大きさは、テンソル-スカラー比で表現する。 $r\equiv(Tensor)/(Scalar)$

rの大きさにより、インフレーションのポテンシャルを決められる。



 $V^{\frac{1}{4}} = 3.3 \times 10^{16} \times r^{\frac{1}{4}} \text{ GeV}$

Sensitivities for Cosmological Gravitational Wave Detection



CMB observation, especially for polarization measurement, is very sensitive for primordial GW. And the observation technology is simple extend from present technology. 20

CMB 偏光望遠鏡 POLARBEAR

CMB B-modeの検出はビックサイエンス。 しかも、地上望遠鏡で届く可能性有り。 →世界中で熾烈な競争が繰り広げられている。



Unique Point of POLARBEAR

Primary Mirror: φ3.5 m

(High Precision area φ2.5m)

Angular Resolution: 4' @150GHz (2.7' @220GHz)

(Sun & Moon ~30', Venus ~10"-58")



Huan Tran Telescope -mode from gravity lensing

Search for CMB B-mode from gravity lensing is suitable to ground-base telescope

PB is a project to aim first detection of CMB B-mode

POLARBEARのサイト - チリ・アタカマ高原-



気圧は半分。酸素ボンベは必需品









地上で最も乾燥した土地・・・のはず







ALMAのゴージャスなOSF(中腹施設)



POLARBEARの粗末なコンテナハウス



問題: 標高5000mの高地では、 トイレはどうするでしょう?

正解:燃やしてしまう





First Light

Jan. 10. 2012







POLARBEAR-1 (First year of data)







偏光マップノイズレベル: 5uK-arcmin

Detection of *B*-mode Polarization in the Cosmic Microwave Background with Data from the South Pole Telescope

D. Hanson,¹ S. Hoover,^{2,3} A. Crites,^{2,4} P. A. R. Ade,⁵ K. A. Aird,⁶ J. E. Austermann,⁷ J. A. Beall,⁸ A. N. Bender,¹ B. A. Benson,^{2,3} L. E. Bleem,^{2,9} J. J. Bock,^{10,11} J. E. Carlstrom,^{2,3,4,9,12} C. L. Chang,^{12,2,3} H. C. Chiang,^{2,13} H-M. Cho,^{8,7} A. Conley,⁷ T. M. Crawford,^{2,4} T. de Haan,¹ M. A. Dobbs,¹ W. Everett,⁷ J. Gallicchio,² J. Gao,⁸ E. M. George,¹⁴ N. W. Halverson,^{7,15} N. Harrington,¹⁴ J. W. Henning,⁷ G. C. Hilton,⁸ G. P. Holder,¹ W. L. Holzapfel,¹⁴ J. D. Hrubes,⁶ N. Huang,¹⁴ J. Hubmayr,⁸ K. D. Irwin,⁸ R. Keisler,^{2,9} L. Knox,¹⁶ A. T. Lee,¹⁴ E. Leitch,^{2,4} D. Li,⁸ C. Liang,^{2,4} D. Luong-Van,² G. Marsden,¹⁷ J. J. McMahon,¹⁸ J. Mehl,^{2,12} S. S. Mever,^{2,9,3,4} L. Mocanu,^{2,4} T. E. Montrov,¹⁹ T. Natoli,^{2,9} J. P. Nibarger,⁸ V. Novosad,²⁰ S. Padin,¹⁰ C. Pryke,²¹ C. L. Reichardt,¹⁴ J. E. Ruhl,¹⁹ B. R. Saliwanchik,¹⁹ J. T. Sayre,¹⁹ K. K. Schaffer,^{2,22} B. Schulz,^{10,23} G. Smecher,¹ A. A. Stark,²⁴ K. Story,^{2,9} C. Tucker,⁵ K. Vanderlinde,^{1,25,26} J. D. Vieira,¹⁰ M. P. Viero,¹⁰ G. Wang,¹² V. Yefremenko,^{12,20} O. Zahn,²⁷ and M. Zemcov^{10,11} ¹Department of Physics, McGill University, Montreal, QC, Canada H3A 2T8 ²Kavli Institute for Cosmological Physics, University of Chicago, Chicago, IL, USA 60637 ³Enrico Fermi Institute, University of Chicago, Chicago, IL, USA 60637 ⁴Department of Astronomy and Astrophysics, University of Chicago, Chicago, IL, USA 60637 ⁵School of Physics and Astronomy, Cardiff University, CF24 3YB, UK ⁶University of Chicago, Chicago, IL, USA 60637 ⁷CASA, Department of Astrophysical and Planetary Sciences, University of Colorado, 389 UCB, Boulder, CO, USA 80309 ⁸National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO, USA 80305 ⁹Department of Physics, University of Chicago, Chicago, IL, USA 60637 ¹⁰California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA 91125 ¹¹Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, USA 91109 ¹²High Energy Physics Division, Argonne National Laboratory, Argonne, IL, USA 60439 ¹³School of Mathematics, Statistics & Computer Science, University of KwaZulu-Natal, Durban, South Africa ¹⁴Department of Physics, University of California, Berkeley, CA, USA 94720 ¹⁵Department of Physics, University of Colorado, Boulder, CO, USA 80309 ¹⁶Department of Physics, University of California, Davis, CA, USA 95616 ¹⁷Department of Physics and Astronomy, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada V6T 121 ¹⁸Department of Physics, University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA 48109 ¹⁹Physics Department, Case Western Reserve University, Cleveland, OH, USA 44106 ²⁰Materials Science Division, Argonne National Laboratory, Argonne, IL, USA 60439 ²¹Department of Physics, University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA 55455 ²²Liberal Arts Department, School of the Art Institute of Chicago, Chicago, IL, USA 60603 ²³Infrared Processing and Analysis Center, California Institute of Technology, JPL, Pasadena, CA USA 91125 ²⁴Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA, USA 02138 ²⁵Dunlap Institute for Astronomy and Astrophysics, University of Toronto, 50 St George St, Toronto, ON, Canada, M5S 3H4 ²⁶Department of Astronomy and Astrophysics, University of Toronto, 50 St George St, Toronto, ON, Canada, M5S 3H4 ²⁷Berkeley Center for Cosmological Physics, Department of Physics, University of California, and Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA 94720 (Dated: July 22, 2013)

Gravitational lensing of the cosmic microwave background generates a curl pattern in the observed polarization. This "B-mode" signal provides a measure of the projected mass distribution over the entire observable Universe and also acts as a contaminant for the measurement of primordial gravity-wave signals. In this letter we present the first detection of gravitational lensing B modes, using first-season data from the polarization-sensitive receiver on the South Pole Telescope (SPTpol). We construct a template for the lensing B-mode signal by combining E-mode polarization measured by SPTpol with estimates of the lensing potential from a Herschel-SPIRE map of the cosmic infrared background. We compare this template to the B modes measured directly by SPTpol, finding a non-zero correlation at 7.7 σ significance. The correlation has an amplitude and scale-dependence consistent with theoretical expectations, is robust with respect to analysis choices, and constitutes the first measurement of a powerful cosmological observable.

SPT



Evidence for Gravitational Lensing of the Cosmic Microwave Background Polarization from Cross-correlation with the Cosmic Infrared Background

POLARBEAR Collaboration, P.A.R. Ade,¹ Y. Akiba,² A.E. Anthony,³ K. Arnold,⁴ D. Barron,⁴ D. Boettger,⁴ J. Borrill,^{5,6} C. Borys,⁷ S. Chapman,⁸ Y. Chinone,^{9,10} M. Dobbs,¹¹ T. Elleflot,⁴ J. Errard,^{6,5} G. Fabbian,^{12,13} C. Feng,⁴ D. Flanigan,^{10,14} A. Gilbert,¹¹ W. Grainger,¹⁵ N.W. Halverson,^{3,16,17} M. Hasegawa,^{9,2} K. Hattori,⁹ M. Hazumi,^{9,2,18} W.L. Holzapfel,¹⁰ Y. Hori,⁹ J. Howard,^{10,19} P. Hyland,²⁰ Y. Inoue,² G.C. Jaehnig,^{3,17} A. Jaffe,²¹ B. Keating,⁴ Z. Kermish,²² R. Keskitalo,⁵ T. Kisner,^{5,6} M. Le Jeune,¹² A.T. Lee,^{10,23} E. Linder,^{23,6} M. Lungu,¹⁰ F. Matsuda,⁴ T. Matsumura,⁹ X. Meng,¹⁰ N.J. Miller,²⁴ H. Morii,⁹ S. Moyerman,⁴ M.J. Myers,¹⁰ M. Navaroli,⁴ H. Nishino,¹⁸ H. Paar,⁴ J. Peloton,¹² E. Quealy,^{10,25} G. Rebeiz,²⁶ C.L. Reichardt,¹⁰ P.L. Richards,¹⁰ C. Ross,⁸ K. Rotermund,⁸ I. Schanning,⁴ D.E. Schenck,^{3,16} B.D. Sherwin *,^{10,27} A. Shimizu,² C. Shimmin,¹⁰ M. Shimon,^{28,4} P. Siritanasak,⁴ G. Smecher,²⁹ H. Spieler,²³ N. Stebor,⁴ B. Steinbach,¹⁰ R. Stompor,¹² A. Suzuki,¹⁰ S. Takakura,^{30,9} A. Tikhomirov,⁸ T. Tomaru,⁹ B. Wilson,⁴ A. Yadav,⁴ and O. Zahn²³

¹School of Physics and Astronomy, Cardiff University ²The Graduate University for Advanced Studies ³Center for Astrophysics and Space Astronomy, University of Colorado, Boulder ⁴Department of Physics, University of California, San Diego ⁵Computational Cosmology Center, Lawrence Berkeley National Laboratory ⁶Space Sciences Laboratory, University of California, Berkeley ⁷California Institute of Technology, Pasadena, CA ⁸Department of Physics and Atmospheric Science, Dalhousie University, Halifax, NS, B3H 4R2, Canada ⁹High Energy Accelerator Research Organization (KEK) ¹⁰Department of Physics, University of California, Berkeley ¹¹Physics Department, McGill University ¹²AstroParticule et Cosmologie, Univ Paris Diderot, CNRS/IN2P3, CEA/Irfu, Obs de Paris, Sorbonne Paris Cité, France ¹³International School for Advanced Studies (SISSA) ¹⁴Columbia University ¹⁵Rutherford Appleton Laboratory, STFC ¹⁶Department of Astrophysical and Planetary Sciences, University of Colorado, Boulder ⁷Department of Physics, University of Colorado, Boulder ¹⁸Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (WPI), Todai Institutes for Advanced Study, The University of Tokyo ¹⁹University of Oxford ²⁰Physics Department, Austin College ²¹Department of Physics, Imperial College London ²²Physics Department, Princeton University ²³Physics Division, Lawrence Berkeley National Laboratory ²⁴Observational Cosmology Laboratory, Code 665, NASA Goddard Space Flight Center ²⁵Physics Department, Napa Valley College ²⁶Department of Electrical and Computer Engineering, University of California, San Diego ⁷⁷Miller Institute for Basic Research in Science, University of California, Berkeley ²⁸School of Physics and Astronomy, Tel Aviv University, Tel Aviv, Israel ²⁹ Three-Speed Logic, Inc. ³⁰Osaka University

We reconstruct the gravitational lensing convergence signal from Cosmic Microwave Background (CMB) polarization data taken by the POLARBEAR experiment and cross-correlate it with Cosmic Infrared Background (CIB) maps from the *Herschel* satellite. From the cross-spectra, we obtain evidence for gravitational lensing of the CMB polarization at a statistical significance of 4.0σ and evidence for the presence of a lensing *B*-mode signal at a significance of 2.3σ . We demonstrate that our results are not biased by instrumental and astrophysical systematic errors by performing null-tests, checks with simulated and real data, and analytical calculations. This measurement of polarization lensing, made via the robust cross-correlation channel, not only reinforces POLARBEAR auto-correlation measurements, but also represents one of the early steps towards establishing CMB polarization lensing as a powerful new probe of cosmology and astrophysics.

Accepted in PRL



Cosmic Infrared Backgroundによる 重カレンズ効果との相関解析

Herschel 500um帯データを利用

4.0 σでCIBとの無相関を棄却

POLARBEAR-2

Cerro Toco at Atacama, Chile

POLARBEAR-2 (PB-2) is a project with a new receiver system, will be deployed in 2014





New Simons Array Telescope (image from PB-1 telescope)

Install

High Energy Accelerator Research Organization

<u>(KEK)</u>



IPMU

Masashi Hazumi (PB-2, Pi) Takayuki Tomaru Yoshiki Akiba Yuji Chinone Masaya Hasegawa Kaori Hattori Yasuto Hori Yuki Inoue Tomotake Matsumura Hideki Morii Takahiro Okamura Jun-ichi Suzuki

Hiroshi Yamaguchi

NIFS

Suguru Takada

IPMU, Univ. Tokyo

Nobuhiko Katayama Haruki Nishino

Osaka Univ. Satoru Takakura

Collaborators

University of California, Berkeley Adrian T. Lee (PB, PI)

Adrian T. Lee (PB, PI) Ari Cukierman William L. Holzapfel Michael J. Myers Christian L. Reichardt Paul L. Richards Michael Sholl Aritoki Suzuki Oliver Zahn

University of Colorado,

Boulder Nils Halverson Greg Jaehnig

Laboratoire Astroparticule & Cosmologie

(APC) Radek Stompor Giulio Fabbian

Cardiff University Peter Ade William Grainger



ORDIFF Overlight Particle Origon

University of California, San Diego

Brian Keating (SA, PI) Kam S. Arnold Darcy Barron Guangyuan Feng Frederick Matsuda Stephanie Moyerman Praween Siritanasak Nathan Stebor



Dalhousie University

Scott Chapman Colin Ross Peter Smith

McGill University

Matt Dobbs Adam Gilbert Graeme Smecher

Princeton Univ. Zigmund Kermish

LBNL Julian Borrill Ted Kisner Josquin Errard





mound

Main Features of PB-2 Receiver

Dichroic and dual polarization detector at 95GHz/150GHz Foreground study. 7588 TES bolometers x 6 from PB-1. Increase statistics

Detector 300mK stage OW

115cm

PB-2 Science

Good sensitivity between l = 50 - 2000



Improvement from PB-1 to PB-2





Present Status

т [K]







Date/Time



CMB望遠鏡の先進テクノロジー



(1) 超伝導Transition Edge Sensor ボロメータ



しかし、実用化せず。

Onnessの超伝導の発見

1990年代にようやく実用化

電熱フィードバック法



電気-熱複合系を考え、バイアスのジュール 熱でTransition Edge上の適当な点を動作点 とする

- - →導体の電気抵抗が増加
 - → バイアス電流が低下
 - →ジュール熱が減少
- ・入射するパワーが減少した時
 → 温度が低下
 - →導体の電気抵抗が減少
 - →バイアス電流が増加
 - →ジュール熱が増加







4. まとめ

- 宇宙マイクロ波背景放射の偏光を用いた原始重力波探査について紹介。
 CMBのB-mode 偏光はテンソル場でしか生じないので、原始重力波
 に対して高感度。
- CMB B-mode探査は、現在の観測技術で手に届く範囲にある。
 比較的小規模な望遠鏡でもチャンスがあり、熾烈な競争が行われている。
- KEK CMBグループでは、POLARBEAR Projectに参加しいる。
 POLARBEAR は、重カレンズ効果起因のB-modeに高感度で、最近B-modeの 検出に成功した。

原始重力波に対しても感度があり、探査を行っている。

- POLARBEAR-2はアップグレードレシーバーで、KEKで開発中。
 あと2台の望遠鏡(Simons Array)の建設も決まり、デザインを詰めている。
 ニュートリノ質量和や原始重力波に対しても大幅に感度向上を目指す。
- ・超伝導TESボロメータには様々な先進技術が詰まっており、CMBの観測を 支えている。