宇宙理論研究室ガイダンス

http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2015j.html

2015年4月7日 16:40-17:20

教授: 須藤 靖

(太陽系外惑星、観測的宇宙論)

助教:大栗真宗

(観測的宇宙論、重力レンズ)

教授: 吉田直紀

(数值宇宙論、第一世代天体形成)

助教: 細川隆史

(大質量星、ブラックホール形成)

ビッグバンセンターの横山順一教授のグループと 連携しつつ研究室活動を行っている

東大本郷キャンパスでの 宇宙物理学理論研究室 ■物理教室: 宇宙物理研究室 ■ 教授: 須藤靖、助教: 大栗真宗 ■教授:吉田直紀、助教:細川隆史 ビッグバンセンター ■教授:横山順一、助教:須山輝明 3研究室が共同で研究活動を行っている ■ 木曜日に昼食会、ランチセミナー、定例セミナー ■学生間のゼミ、勉強会、議論、雑談、愚痴 ■ サマースクール、遠足、飲み会 ■新着論文紹介(月、水、金)

2015年度前期理論演習

須藤、吉田、横山の3研究室合同で宇宙論の教科書を読む

- Andrew Liddle "An Introduction to Modern Cosmology" Wiley, 2nd edition
- Steven Weinberg "Cosmology" Oxford Univ. Press
- 松原隆彦「現代宇宙論」「宇宙論の物理」東大出版会

須藤・吉田・横山研に配属となった人は、初回は4月14日(火)13:30@理学部一号館9階908号室に集合すること。そこで教科書と分担を相談して決める



2015年度後期理論演習

広義の天文学・宇宙物理学に関する英語の 教科書を選び、担当を決めてそれを発表、 全員で議論する

詳細は第一回目に希望を聞いたうえで決定 する(2010年は重力波、2011年は恒星動力 学、2012年と2013年は星の進化論、2014 年はコンパクト天体の教科書を輪講した)

天文学・宇宙物理学研究対象と方法論: とにかく「いろいろ」⇒多様性が魅力 ■対象別:「XX」の起源と進化 ■「XX」 = 惑星、太陽、恒星、星間物質、超新星、 コンパクト天体、銀河系(天の川)、銀河、活動 銀河核、銀河団、宇宙、時空、生命・文明 ■ 波長別:「YY」天文学 $|| YY|| = \overline{a}$ 波、赤外線、可視光、紫外線、X線、 ガンマ線、宇宙線、ニュートリノ、重力波 ■ 手法別: ■理論、観測(地上、気球、ロケット、衛星、地下)、

実験、数値シミュレーション

Astro2010: decadal survey

New Worlds, New Horizons

in Astronomy and Astrophysics

NATIONAL RESEARCH COUNCIL

■ Cosmic Dawn ⇒吉田

宇宙の夜明け: 第一世代天体・ブラックホールの探索

■ New Worlds ⇒須藤

 新世界: 近傍の居住可能惑 星の探索

■ Physics of the Universe ⇒ 横山

宇宙の物理: 宇宙を支配する
 科学法則の理解

August 13, 2010 http://sites.nationalacademies.org/bpa/BPA_049810



須藤研の研究内容紹介

■ 宇宙論と太陽系外惑星が2つの主テーマ ■すばる望遠鏡に代表される大規模撮像/分 光サーベイに基づく観測的宇宙論(特に大栗 助教は重力レンズ宇宙論の世界的研究者) ■赤外線サーベイと地上光学サーベイを組み 合わせた銀河系内および系外ダストの解明 ■系外惑星系の角運動量の起源と進化 ■ バイオマーカーと宇宙生物学

重カレンズで「見る」ダークマター

http://hubblesite.org/newscenter/newsdesk/archive/releases/2006/23/

98億光年先にある クエーサー(中心に ブラックホール)



銀河団周辺の重力で光線が曲げられ、 みかけ上5つの異なる天体をつくる (ダークマターの存在)

> 62億光年先にある 銀河団まわりの ダークマター

重力レンズ天体 SDSS J1004+4112: 一般相対論的蜃気楼

ハッブル宇宙望遠鏡で観測した 重カレンズ SDSS J1004+4112 重カレンズを

稲田直久、大栗真宗 が2003年に発見

ダークマターの存在 の直接的証拠

重カレンズ クエーザー

受けた銀河

超新星

太陽系外惑星の理論と観測

■ 系外惑星系の角運動量の起源と進化

- ロシター・マクローリン効果による観測的決定
- 軌道進化の天体力学的数値計算

■星震学の応用

- 系外惑星のリングと衛星の探索
- 系外惑星から宇宙生物学へ
 - ■地球型惑星の反射光による表面地図

■ バイオマーカー

太陽系外惑星発見の歴史年表



系外惑星研究の現在・過去・未来 ■ 巨大ガス惑星発見の時代(1995) 惑星大気の発見(2001) 惑星赤外線輻射の検出(2005) 惑星可視域反射光の検出(2009) ■ ハビタブル惑星の発見 ■ 系外惑星リング、衛星の発見 ■ 地球型惑星の直接検出(測光&分光) ■ バイオマーカー(生物存在の証拠)の同定 ■ 地球外生命の発見

系外惑星検出方法



ドップラー法

惑星の公転に同期して、中心星の速度が 毎秒数十メートル程度で周期的に変動

トランジット法

中心星の正面を惑星が横切ることで星の 明るさが1パーセント程度周期的に暗くなる

■ 重力マイクロレンズ法

重カレンズ効果により、背景星が1日程度
 急激に明るくなる

■ 直接撮像

■ 中心星の光を隠して惑星の光を分離

初めてのトランジット惑星HD209458b



トランジット惑星観測からわかること

■ 測光観測

- 公転周期、惑星半径(主星半径との比)、我々の 視線に対する公転面軌道傾斜角
- ■主星の自転速度
- + 分光観測
 - ■惑星質量、離心率
 - spin-orbit 射影角 λ (主星自転軸と惑星公転軸の なす角の天球面上への射影)
- 星震学(asteroseismology)
 主星の温度、半径、密度などの精密推定
 我々の視線に対する主星自転軸傾斜角

惑星間重力散乱 + 主星・惑星潮汐作用 = 円軌道のホットジュピター + 遠方の高離心率軌道の惑星



- 原始惑星系円盤
 ダスト沈殿・成長
 微惑星形成・合体
 円軌道の原始惑星
- ガス降着によるガ ス惑星の誕生

太陽系形成標準モデル (京都モデル・林モデル) 重力少数多体系
 カオス的力学進化
 近接散乱

古在機構

軸のずれ

軌道収縮

円軌道化

主星自転軸と惑星公転

主星·惑星潮汐作用

ホットジュピターの誕生

- ▶ 軌道交差
- 惑星放出

多重トランジット惑星系KOI-94: 惑星食の初検出



P=54.3d P=3.7d P=10.4d P=22.3d $(1.6R_{earth})(3.8R_{earth})$ (6.2R_{earth}) $(11R_{earth})$ ケプラー衛星データから、 初めての惑星食を偶然発見 すばる望遠鏡のロシター 効果観測で、主星自転軸

KOI-94d

KOI-94e

KOI-94c

Hirano et al. ApJL 759 (2012)L36

主星自転軸と惑星公転軸のまとめ (天球上の射影角なので3次元角度ではない)



2013年6月時点でRM効果が測定されたトランジット惑星70個中29個がπ/8以 上の有意なずれ。うち、8個が極軌道、7個が逆行軌道。

Xue et al. (2014)

星震学と系外惑星系

星の非球対称振動モードの解析から、中心星の自転傾斜角 *i_s*を決定 (Benomar et al. 2014)

 $Y_{lm}(\theta,\phi)$ とStellar inclination (l=3) m=±3 m=±2 m=±1 m=0 Kepler-25 (2重トランジ ット惑星系)

- i_s=65.4° +12.1° -7.4°
- 射影角 λ=9.4°±7.1°
- <mark>■ 3次元角 ψ=26.9°</mark>+^{7.0°}-9.2°

HAT-P-7 (逆行惑星候補)

- i_s=27° +35° -18°
- 射影角 λ=186° +10°₋₁₁。
- 3次元角 ψ=122°+30° -18°

T.L. Campante, arXiv:1405.3145

30°

60°

90°

系外惑星系とハビタブルゾーン



Kasting, Kopparapu, Raminez & Harman: arXiv:1312.1328

バイオマーカー:生物が存在する兆候 何を見れば生命があると考えらるのか? 生物由来の大気成分(酸素、オゾン、メタン) 植物のレッドエッジ

■知的生命体からの電磁波

いずれにせよ検出は天文学観測しかない





Nancy Y.Kiang *The color plants on other worlds*Scientific American April 2008
邦訳: 日経サイエンス2008年7月号

G型星

若いM型星

古いM型星

F型星

第二の地球の色から、海、雲、植生 の占める面積の割合を推定する 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 ■**藤井友香、**河原創、樽家篤史、須藤 靖 ■ 東京大学気候システム研究センター ■福田悟、中島映至 ■プリンストン大学 Edwin Turner

Fujii et al. Astrophys. J. 715(2010)866, arXiv:0911.5621 Astrophys. J. 738(2011)184, arXiv:1102.3625

http://www.space.com/scienceastronomy/color-changing-planets-alien-life-100513.html

A pale blue dot

地球は青かった?

Fujii et al. (2010)



自転軸に垂直な方向から観測
 地球観測衛星のデータを用いて計算

地球測光観測データから推定された地表面成分の経度分布地図



一般的なアドバイス

- 夏藤研で行われている研究の詳細に関しては、 以下のホームページを参照のこと
 - http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp
 - http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mytalks.html
- 大学院で進学を希望する研究室の先生にはメイ ルでアポイントをとり、必ず直接話をうかがうこと
 - 学部とは異なり大学院教育は各研究室単位。特に理系の場合には、公私ともに研究室中心の生活になる。
 - それぞれ独自の伝統、文化、雰囲気があるので、研究テーマはもちろん、それらとの相性も極めて大事



限られた時間内で説明しきれな かった部分は以下のプレゼンを参 照してください。 興味がある人は 事前に連絡してくれれば、日時を 打合せた上で説明します。

より詳しくは以下を参照

http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mytalks.html

http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2009j.html

ANNALEN

PHYSIK

T. L. C. GRES, L. W. CILEPAT, L. C. POGGENDORFF, G. C. E. WIEDEMANN, P. SRUDE.

VIERTE FOLGE.

BAND 49.

DER GANDEN REILE SUL MAND.

M. PLANCK, G. QUINCKE, W. C. RÖNTGEN, W. VOIGT, E. WARBURG.

UNTER MITWIEKUNG DEB DEUTSCHEN PHYSIKALISCHEN GESELLSCHAFT

NEELCHORGENN VON

W. WIEN UND M. PLANCK.

MIT EINEM FORTRAT UND ZEHN FIGURENTAFELN.

ANNALEN PHYSIK.

F. L. C. GREN, L. W. GILBERT, J. C. POGGENDORFF, G. WND E. WIEDEWLINK, VIERTE FOLGE. BAND 17.

KOHLRAUSCH, M. PLANCK, G. QUINCKE, W. C. RÖNTGEN, E. WARBURG. UNTER MITWIRKUNG

EN PHYSIKALISCHEN M. PLANCK

PAUL DRUDE.



LEIPZIG, 1905. VERLAG VON JOHANN AMBROSIUS BARTH.







東京大学 理学部

2009年7月14日

須藤 靖

般相対論講義 第13回

8. Zur Elektrodynamik bewegter Körper; von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells - wie dieselbe gegen-strije aufgefaht zu werden pflegt - in ihrer Anwendung auf werste Korper a Arymentrien führt, welche den Phinomenen och aunhaften einen, ist bekannt. Man denke z. B. eine und einen Leiten. Deshacht Aar Afnansen hänget, eine und einen Leiten. Deshacht Aar Afnansen hänget, ein nur ab von der Rac Rab stässung die beächen Fälle, daß eine oder der andere diesen Körper der bewegte sei, streng von innader zu trennen sind. Bewegt sich näufet, der Nagestinne oder der andere dieser Korper der bewegte sei, streng inander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet uht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten int der Detter, ob einsteht in der Unigebung des magneten ektrisches Feld von gewissen Energiewerte, welches an prten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, E. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Litekt in der Umgebung des Magneten kein elektricherspen im Leiter eine elektronotorische Kraft elektrichen Beinergie enspricht, die aber – Gleich weiter zu elektrichen Strömen von derrelben werden Verweiteren einken Verweisenen einken weiten Verweisenen einken versich verweisenen einken versich versienen weitet versich versienen einken versich versienen einken versich versienen weitet versich versienen weitet versich versienen einken versich versienen versich versienen versich vers elben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im erste

seinen Aratte: iele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuch gung der Erde relativ zum "Lichtmedium" zu kor ühren zu der Vermutung, daß dem Begriffe der tahe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in lynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entadern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, ie mechanischen Gleichungen gelten, auch die redynamischen und optischen Gesetze gelten, wie rößen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir ermutung (deren Inhalt im folgenden "Prinzip genannt werden wird) zur Voraussetzung erdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche



LEIPZIG, 1916. VERLAG VON JOHANN AMBROSIUS BARTH.



1. Die Grundlage der allgemeinen Belativitätstheorie; von A. Einstein.

ANNALEN DER PHYSIK.

VIERTE FOLGE. BAND 49.

AS 7.

1916.

Die im nachfolgenden dargelegte Theorie bildet die denkber weitgehendste Verallgemeinerung der heute allgemein als Beistivitätstheorie" bezeichneten Theorie; die letztere nenne henrichten sin folgenden zur Unterscheidung von der ersteren "spezielle hairvijatstheorie" und setze sie als bekannt voraus. Die allgemeinerung der Relativitätstheorie wurde sehr erfert durch die Gestalt, welche der speziellen Relativitätster durch Minkowski gegeben wurde, welcher Matheer zuerst die formale Gleichwertigkeit der räumlichen naten und der Zeitkoordinate klar erkannte und für fbau der Theorie nutzbar machte. Die für die all-Relativitätstheorie nötigen mathematischen Hillsen fertig bereit in dem "absoluten Differentialkalkül", uf den Forschungen von, Gauss, Riemann und el über nichteuklidische Mannigfaltigkeiten ruht und und Lovi-Civita in ein System gebracht und Probleme der theoretischen Physik angewendet habe im Abschnitt B der vorliegenden Abhanduns nötigen, bei dem Physiker nicht als bekannt iden mathematischen Hillsmittel in möglichst durchsichtiger Weise entwickelt, so daß ein matischer Literatur für das Verständnis der handlung nicht erforderlich ist. Endlich sei dankbar meines Freundes, des Mathematikers lacht, der mir durch seine Hilfe nicht nur einschlägigen mathematischen Literatur er-

重カ=時空の曲がり



重
 力による
 時空の
 曲がり







三尾典克 2003年度科学セミナープレゼンより



皆既日食 部分日食 2009年7月22日

皆既日食が 見られる地域

屋久

食の始め09時37分06秒皆既の始め10時56分10秒食の最大10時58分07秒皆既の終り11時00分05秒食の終り12時22分37秒

悪石島

食の始め 09時35分25秒 皆既の始め 10時53分16秒 食の最大 10時56分28秒 皆既の終り 10時59分41秒 食の終り 12時21分26秒

奄美

| 食の始め | 09時35分21秒 |
|-------|-----------|
| 皆既の始め | 10時55分58秒 |
| 食の最大 | 10時56分53秒 |
| 皆既の終り | 10時57分48秒 |
| 食の終り | 12時22分26秒 |

国立天文台 天文情報センター

部分日食の間、木漏れ日が三日月型になる

2008年8月1日 皆既日食@中国酒泉 柴田一成氏撮影 (京都大学、世界天文年全国同時七夕講演会実行委員会委員長)



2008年8月1日 皆既日食@中国酒泉 柴田一成氏撮影 (京都大学、世界天文年 全国同時七夕講演会実行 委員会委員長)

0

一般相対論の検証





太陽の周りの光線の湾曲



BENDING LIGHT



MERCURY'S ORBIT




重カレンズ



Zariel. 14. X. 13. Koch geelerter Hers Kollege!

time emfache theoretische therlegung macht die Annahme plansikl, dass Lichtstrahlen in einem Geavitationsfelde eine Deviation uphren. Jahr hild

An Tonneurande misste diese Ablenkung (R Standy on the Balankt)

() some

So mare deshalt van geoseten Interesse, bis zu wie grosse Sonnennehe grosse Firsteene bei Anwendung der stinketen Vergrösserungen be Tage (ohne Sonnenfinsternis) gerehen werden können



■ 光線は重力場によって曲げられる

- 天体が多重像をつくる(強い重力レンズ)
- 天体の形状が変形を受ける(弱い重力レンズ)
- 天体の見かけの明るさが増光する(マイクロレンズ)

初めて発見された重力レンズ多重像

2

QSO 0957+561 A, B (z=1.4)

Walsh, Carswell and Weymann (1979)

0957+561 A, Bの光度曲線と時間差



QSOの明るさの時間 変化より、Bイメージが 約一年遅れていること がわかる 理論モデルとの比較 より、ハッブル定数が 推定できる (Kundic et al. 1997)

 $H_0 = 64 \pm 13 \text{km/s/Mpc}$

強い重カレンズの観測例(HST)



















Gallery of Gravitational Lenses PRC99-18 • STScI OPO • K. Ratnatunga (Carnegie Mellon University) and NASA

HST · L

Gravitational Lens G2237+0305

アインシュタインリング

Einstein Ring Gravitational Lenses

Hubble Space Telescope - ACS

| | | · C , | |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| J073728.45+321618.5 | J095629.77+510006.6 | J120540.43+491029.3 | J125028.25+052349.0 |
| | | | |
| J140228.21+632133.5 | J162746.44-005357.5 | J163028.15+452036.2 | J232120.93-093910.2 |

NASA, ESA, A. Bolton (Harvard-Smithsonian CfA), and the SLACS Team

STScI-PRC05-32

銀河団 Abell 2188



Galaxy Cluster Abell 2218 Hubble Space Telescope • WFPC2



Distant Object Gravitationally Lensed by Galaxy Cluster Abell 2218 HST • WFPC2 NASA, ESA, R. Ellis (Caltech) and J.-P. Kneib (Observatoire Midi-Pyrenees) • STScI-PRC01-32

Distant Gravitationally Lensed Galaxy Galaxy Cluster Abell 1689

Hubble Space Telescope ACS/WFC NICMOS



NASA, ESA, and L. Bradley (JHU), R. Bouwens (UCSC), H. Ford (JHU), and G. Illingworth (UCSC)

STScI-PRC08-08a



ハッブル宇宙望遠鏡で観測した 重カレンズ SDSS J1004+4112

重力レンズを 受けた銀河

重力レンズ クエーザー

超新星

稲田直久、大栗真宗が2003年に発見

10"

SDSSJ1004+4112のスペクトルとレンズモデル



Inada et al. Nature 426 (2003) 810

SDSS J1004+4112





z=0.3に10¹⁴太陽質量の重力レンズ天体がある 場合に予想されるイメージ

衝突銀河団

ダークマター存在の証拠



重カマイクロレンズによるMACHO探査



重力マイクロレンズによる増光



time (day)

2020

Massive Compact Halo Objectの発見



最初に発見された重力マイクロレンズ現象 (Alcock et al. 1993)

MACHOイベントの 光度 曲線



銀河系ダークマターの組成



銀河系ハローには 確かにMACHO が存 在する ■ 質量は太陽の0.1か ら1倍程度 ハロー全体に占め る質量は2割程度(つ まり、それ以外のダー クマターも存在する)

> MACHO mass fraction Lasserre et al. (2000): EROS collaboration

マイクロレンズを用いた系外惑星探査



差分イメージ解析







マイクロレンズで発見された最初の系外惑星 OGLE 2003-BLG-235/MOA 2003-BLG-53



OGLEが2003年6月22日に、MOAが2003年7月21日に観測

(名古屋大学 住貴宏氏)

惑星質量: ~M_{太星} 公転半径: ~3AU

重カレンズのまとめ

 一般相対論的現象にもかかわらず、目で 見えるため直感的で面白い
 宇宙の光っていない成分を探れるユニー

クな手段を提供する

■ダークマター

■暗くて見えない遠方天体

■ 系外惑星

Known unknowns and unknown unknowns: *astronomy vs. physics*



Yasushi Suto Dept. of Phys., The University of Tokyo & Global Scholar, Dept. of Astrophys. Sci., Princeton University XVI International Symposium of Multiparticle Dynamics (ISMD) 2011 September 28, 2011 @Miyajima Morinoyado Inn, Hiroshima, Japan

Nightfall: We didn't know anything



no "night" on "Lagash" except the total eclipse due to another inner planet every 2049 years

People realized the true world for the first time through the darkness full of "stars"

Issac Asimov: Nightfall

A Fawcett 220 Grest Book M1486 95c

Thrilling, Terrifying Tales from the Master of Science Fiction

isaac asimov

AND OTHER STORIES

"Light !" he screamed. Aton, somewhere, was crying, whimpering horribly like a terribly frightened child. "Stars -- all the Stars -we didn't know at all. We didn't know anything."

a famous American philosopher and poet: D.H.Rumsfeld



The Unknown

As we know, There are known knowns. There are things we know we know. We also know There are known unknowns. That is to say We know there are some things We do not know. But there are also unknown unknowns, The ones we don't know We don't know.

-Feb. 12, 2002, Department of Defense news briefing

Composition of the universe



atomordinary mattermakes up merely 5percent

dark matter

galaxies and clusters are surrounded by invisible mass an order-of-magnitude more massive than their visible part

dark energy

even more exotic component !
homogeneously fills the universe (unclustered component)
repulsive force (negative pressure; P=-p?)
Einstein's cosmological constant ?
or just an illusion ...

Dark matter and dark energy: 21st century clouds over the universe?



http://www.physics.gla.ac.uk/Physics3/Kelvin_online/clouds.htm

Lord Kelvin @ Royal society on April 27, 1900
 beauty and clearness of theory was overshadowed by two clouds

Dark matter and dark energy in the 21st century

- Two dark clouds in astronomy? \rightarrow No !
- Two probes of new physics? \rightarrow Yes (hopefully)

CVs of the two dark clouds

| name | dark matter | dark energy |
|------------------|--|---|
| maiden | missing mass | cosmological constant |
| name | | |
| year of birth | 1933 | 1917 |
| father | Fritz Zwicky | Albert Einstein |
| candidates | lightest super- symmetric particle, axion, ALP, WISP | vacuum energy, unknown scalar field, leaks to extra-dimension |
| weight | 23 percent of the universe | 72 percent of the universe |
| character | attractive | repulsive |

Dark matter in the universe

Observational signatures of dark matter

- Flat rotation curves of galaxies
- Multiple images of quasars due to gravitational lensing





Bullet clusters



Mirage from the universe 10 billion years ago (SDSS J1004+4112)

Discovered by N.Inada and M.Oguri at Univ. of Tokyo in 2003 from SDSS images and then confirmed by Subaru and Keck Inada et al. Nature 426(2003)810

http://hubblesite.org/newscenter/newsdesk/archive/releases/2006/23/ Light emitted from quasar bends around intervening galaxy cluster,

QSO at 10 billion light years away



producing lensed images*



Gravitational lens SDSS J1004+4112 : general relativistic mirage



Galaxy Cluster SDSS J1004+4112 HST ACS/WFC

Gravitational lens SDSS J1004+4112

Lensed Galaxy

Supernova Lensed Quasar

10"
Gravitationally Lensed Quasar in Galaxy Cluster SDSS J1004+4112 H

HST ACS/WFC

Looking toward the edge of the universe has revealed the presence of dark matter

NASA, ESA, K. Sharon (Tel Aviv University) and E. Ofek (Caltech)

STScI-PRC05-23

Bullet cluster (1E 0657-56)

Implies collisionless dark matter



Dark matter: from astronomy to physics

- Astronomical observations unambiguously proved the existence of dark matter
 - Astronomy does not require any specific form of Lagrangian of dark matter particles
 - From unknown unknowns to known unknowns
- On-going/up-coming **physics experiments** will identify the elementary particle responsible for dark matter in the universe
 - Particle physics will specify the Lagrangian
 - From known unknowns to known knowns

Dark energy in the universe

Are there any unknown unknowns that distribute homogeneously in the universe ?

- Objects are usually identified only through differential measurements
 - Visible matter: contrast between dark and bright regions
 - Dark matter: spatial clustering dynamically and gravitationally traced by visible stars, galaxies and quasars

Is it possible to identify the existence of a homogeneously distributed component ?

 differential measurements in time domain (cosmic acceleration, structure growth)

Expanding the expanding universe

Expand the "size" of the universe around now

$$a(t) = a(t_0) + \frac{da}{dt}\Big|_{t_0} (t - t_0) + \frac{1}{2} \frac{d^2 a}{dt^2}\Big|_{t_0} (t - t_0)^2 + \cdots$$

current size:

 $a(t_0)$

⇔ the value itself has no physical meaning

current expansion rate: the Hubble constant

$$H_0 = \frac{da \, / \, dt}{a} \bigg|_{t_0}$$

 ⇔ unpredictable: basically determined by the initial condition (can be either negative or positive)

current acceleration rate: the deceleration parameter

$$q_0 \equiv -\frac{a d^2 a / dt^2}{\left(da / dt\right)^2} \bigg|_{t_0}$$

⇔ related to the cosmic energy density via the Einstein eq.
(should be positive)

Cosmic acceleration vs. dark energy



Dark energy?

Modified gravity?

time 13.7 Gyr

Universe should not be accelerated ! Newton's inverse square law

$$\frac{d^2 a}{dt^2} = -\frac{GM(< a)}{a^2} = -\frac{G}{a^2} \left(\frac{4\pi}{3}\rho a^3\right) = -\frac{4\pi G}{3}\rho a < 0$$

Einstein's general relativity

$$\frac{d^2a}{dt^2} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p + \rho_{DE} + 3p_{DE})a$$

- Pressure contributes to gravity
- Negative pressure required for acceleration
 - Cosmological constant: p_{DE}=-ρ_{DE}
 - More generally, dark energy: $p_{DE} = w \rho_{DE}$ with w<-1/3

General relativity is inaccurate at cosmological scales ? (modified gravity theories)

From cosmological constant to dark energy

- 1916: general relativity
- 1917: Einstein's static universe
- After 1980's: vacuum energy density

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$
Dark energy
(matter field)
$$Cosmological constant$$
(geometrical quantity)
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = 8\pi G \left(T_{\mu\nu} - \frac{\Lambda}{8\pi G} g_{\mu\nu} \right)$$

Natural value: the Planck units

$$\Lambda = \frac{c^5}{\hbar G} \approx 5.2 \times 10^{93} \,\text{g/cm}^3 \quad \Leftrightarrow \quad \Omega_{\Lambda} \equiv \frac{\Lambda}{3H_0^2} \approx 10^{121}$$

Observed value: $\Omega_{\Lambda} \approx 0.7$

The worst discrepancy in the history of physics !

Dark energy and the equation of state of the universe

Parameterized equation of state

- (pressure) = w x (density)
 - w=0: dark matter, baryons
 - w=1/3: photons
 - w=-1: cosmological constant
- Poisson eq. in GR : $\Delta \phi = 4\pi G(\rho$
 - $+3p)=4\pi G\rho(1+3w)$
 - $w < -1/3 \Rightarrow$ repulsion force

w=-1 or not: that is the question

■ p=wp (w<-1/3)</p>

- Negative pressure: dark energy
- More generally w may change with time
- conventional but not unique parameterization:
 - $w(a) = w_0 + w_a(1-a)$ where a = 1/(1+z)
 - - $w_0 = -1 \text{ or not } ???$
 - $w_a = 0 \text{ or not } ???$
 - $w_0 = -1 \& w_a = 0$??? (cosmological constant)

Observational signatures of dark energy

- cosmic acceleration
- geometry of the universe
- evolution of structure

4 major probes

- Supernova Hubble diagram
- Cosmic Microwave Background
- Gravitational lensing (galaxy imaging survey)
- Baryon Acoustic Oscillation (galaxy redshift survey)









Standard ruler: baryon acoustic oscillation (BAO) length



Sound horizon length at recombination (≒c_s×0.37Myr)
 r_s=147 (Ω_m h²/0.13)^{-0.25} (Ω_b h²/0.024)^{-0.08} Mpc
 Estimate the distance to the CMB last-scattering surface using the above as a standard ruler

Acoustic oscillations detected





 $Ω_m$ =0.24 best-fit WMAP model

Percival et al. (2007)

Baryon acoustic oscillation (BAO) as a standard ruler

Distance measurement at different epochs
 Promising methodology to observationally constrain dark energy



Picture credit: Bob Nichol

Required accuracy of the BAO scale measurement to constrain w



3% accuracy of w requires to determine **BAO** scale at z=1within <1%⇒ Needs bigger surveys of galaxies

Nishimichi et al. (2007)

Sub-percent level accuracy is demanding even for theoretical templates Best analytic model of nonlinear gravitational evolution: Taruya et al. (2009)



International Research Network for Dark Energy (JSPS, core-to-core program 2007-2012)



Future dark energy surveys

DES: Dark Energy Survey (Fermi Lab+, 2011-?)

- Imaging galaxy survey
- 5000 deg²@Chile 4m telescope

LSST: Large Synoptic Survey Telescope (SLAC+, 2016-?)

- Imaging galaxy survey
- 20000 deg²@Chile 8.4m dedicated telescope
- SuMIRe HSC: Hyper Suprime-Cam (Subaru+Princeton +Taiwan, 2012-)
 - Imaging galaxy survey (1.5deg FOV)
 - 1500 deg²@Subaru 8m telescope

SuMIRe PFS: Prime Focus Spectrograph (Subaru

- +US,France,Taiwan,Brazil,,, 2016-???)
- Spectroscopic galaxy survey (1.3deg FOV)
- 2500 fibers, 10000 galaxy redshifts a night

Galaxy survey project: SuMIRe

Subaru Measurement of Imaging and Redshift of the universe

- PI: Hitoshi Murayama (director of IPMU, U. of Tokyo)
 - Japanese Institutes in charge: IPMU, The University of Tokyo, NAOJ,,,
- Imaging survey with HSC (Hyper-Suprime Cam)
 - Japan + Princeton + ASIAA (Taiwan)
- Spectroscopic survey with PFS (Prime Focus Spectrograph)
 Japan + US, Taiwan, France, Brazil,,,

SuMIRe is pronounced as S-me-lé

- Don't pronounce SUMIRE as Smile
 - ∎ I = **(i)** ≠ **(**ai)
 - $E = [e] \neq \text{silent}$
- Don't care whether R or L

"R=L" is the most well-known identity in Japanese



Japanese: Sumire (すみれ) Chinese: 菫 English: violet (more specifically, Viola mandshurica)

HSC: Hyper-Suprime Cam Japan+Princeton+ASIAA (2012-2016)

- Imaging galaxy survey (1.5deg FOV) g,r,i,z,Y
- 200 nights for 1500 deg² wide survey for weak lensing
- 100 nights for deep surveys of galaxies



Presented at DENET-Princeton conference (2009) by Satoshi Miyazaki (NAOJ)

PFS: Prime Focus Spectrograph Japan+ (2016-2020 ???)

- Spectroscopic galaxy survey (1.3deg FOV)
- 2500 fibers, 10000 galaxy redshifts a night
- BAO, galactic evolution, Galactic archaeology



presented at DENET summer school (2009) by Mike Seiffert (JPL/Caltech)

Courtesy of Masahiro Takada (IPMU)

Without dark sky, one could have never imagined

what dominates our world

Hopefully soon, we will recognize that we didn't know anything!



Have we made progress at all ?

Spatial extent of dust from stacking image analysis of SDSS galaxies over IRAS and AKARI maps



Yasushi Suto Department of Physics, The University of Tokyo 15:30-16:00 November 5, 2014 The 6th KIAS workshop on Cosmology and Structure Formation

Top 5 cited papers in astronomy

| | authors | citation | title |
|---|---|----------|--|
| 1 | Schlegel, Finkbeiner & Davis (1998) | 8880 | Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds |
| 2 | Perdew & Zunger (1981) | 8393 | Self-interaction correction to density- functional approximations for many-electron systems |
| 3 | Perlmutter et al. (1999) | 8288 | Measurements of Omega and Lambda from 42 High-Redshift Supernovae |
| 4 | Riess et al. (1998) | 8187 | Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant |
| 5 | Spergel et al. (2003) | 7801 | First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters |

Nature 514(2014) 550-553, Oct. 30 issue

THF PAPFR **4400** TOP-10 PAPERS 1.871 citati 2²500

Stacking the first page of all published papers almost reaches the top of Mt. Kilimanjaro (h=5800m) Only the top 1.5m (1.5cm) has citations >1000 (10000) 0 citations at h=2500m 1-9 citations at 4400m 10-99 citations at 5700m the mountain is dominated by a completely invisible component ⇔ stacked dust !

A closer look



The most cited paper in history

Rank: 1 Citations: 305,148 *Protein measurement with the folin phenol reagent*Lowry, O. H., Rosebrough, N. J., Farr, A. L. & Randall,
R. J. J. Biol. Chem. 193, 265–275 (1951).

The most cited work in history, for example, is a 1951 paper describing an assay to determine the amount of protein in a solution. It has now gathered more than 305,000 citations — a recognition that always puzzled its lead author, the late US biochemist Oliver Lowry. "Although I really know it is not a great paper ... I secretly get a kick out of the response," he wrote in 1977.

from Nature article in Oct.30, 2014 issue

Discovery of the anomaly in the SFD Galactic extinction map using SDSS galaxy number counts

K.Yahata, A.Yonehara, YS, E.L.Turner, T.Broadhurst, & D.P. Finkbeiner Publ.Astron.Soc.Japan 59(2007)205
T.Kashiwagi, YS, A.Taruya, I.Kayo, T.Nishimichi & K.Yahata submitted to ApJ (2014)

SFD Galactic extinction map



Galactic extinction E(B-V) map (Schlegel, Finkbeiner & Davis 1998; SFD)

 The most fundamental dataset for all astronomical observations

True large-scale structures revealed only after the extinction correction

Its reliability is of vital importance in precision cosmology

SFD procedure to construct the Galactic extinction map

COBE 100µm+240µm maps (0.7deg.pixel)

- Remove zodiacal light and cosmic infrared background
- Dust temperature map ⇒ temperature-dependent emissivity corrected 100µm map
- Calibration of higher angular-resolution IRAS 100µm map (5 arcmin. pixel)
- Assume E(B-V)=pI_{100µm}X(T)
 dust temperature correction factor

at each region and determine $p \sim 0.0184$ from the data

• Convert E(B-V) to A_{band} adopting $R_V = A_V / E(B-V) = 3.1$
A_{SFD} map in SDSS DR7 survey region 3.6x10⁶ galaxies (17.5<r<19.4) in 7270 deg² from SDSS DR7 photometric catalog



Estimating Galactic extinction from SDSS galaxy surface density







- divide the SDSS DR7 survey area into many small regions according to A_{SFD}
- combine those non-contiguous regions into 84 bins for A_{SFD} with ${\sim}100~\text{deg}^2$ each
- compute the SDSS galaxy number density S_{gal} for those bins



Origin of the anomaly

A_{SFD} is estimated assuming that the extinction is proportional to the FIR emission flux (100µm)

the anomaly indicates the positive correlation between galaxy surface density and the FIR flux at least where the real extinction is small

$100\mu m$ flux = Galactic dust + galaxies

contamination by the FIR emission from galaxies proposed by Yahata et al. (2007)

Direct detection of FIR emission of galaxies

FIR emission of a majority of SDSS photometric galaxies is weak and cannot be detected individually.

■ Can we detect their FIR emission statistically through stacking SDSS galaxies over the SFD map ? ⇒ Yes !

> Kashiwagi, Yahata & YS Publ.Astron.Soc.Japan 65 (2013)43

Stacking analysis of SDSS galaxies on the SFD map



 $N = 10^{3}$

 $N = 10^4$

Magnitude dependence Stacking SDSS galaxies ($15.5 < m_r < 20.5$) over SFD map according to their r-band magnitude ($\Delta m_r = 0.5$)



-10

-20

Stacking image analysis of SDSS galaxies on AKARI FIS 90µm map



Arimitsu et al. (2014)

 AKARI (February 2006, launched)

> FIS (Far-Infrared Surveyor) 65, 80, 140 & 160µm

- AKARI PSF (FWHM)
 - 98" (in-scan)
 - 55" (cross-scan)
- c.f., IRAS
 PSF@100µm ~6'

Stacked images of SDSS galaxies on AKARI@90µm





Angular resolution: IRAS vs AKARI



Due to the poor angular resolution of IRAS, the FIR flux of stacked image is dominated by clustered galaxies, not by the central single galaxy

Angular resolution: IRAS vs AKARI



Due to the poor angular resolution of IRAS, the FIR flux of stacked image is dominated by clustered galaxies, not by the central single galaxy Numerical and analytic models to explain the anomaly of SFD map from the FIR emission of galaxies

 T.Kashiwagi, YS, A.Taruya, I.Kayo, T.Nishimichi & K.Yahata submitted to ApJ (2014)

Analytic model for S_{gal} with contamination of FIR galaxy emission

- Poisson distributed galaxies (spatial clustering is ignored)
- Log-normal PDF for $y = (vL)_{100\mu m}/(vL)_r$ of each galaxy (characterized by y_{avg} and y_{rms})
- Compute the PDF of the additional extinction (converted from the FIR emission of galaxies) for a pixel on the SFD map with N galaxies $P_N(\Delta A)$
- Compute N(A') and $\Omega(A') \Rightarrow S_{gal}(A')$ where A'=A+ ΔA
- Very good agreement with mock simulation results

Mock simulation vs. analytic prediction



Fit to the observed SFD anomaly using the analytic model



Observed anomaly is reproduced by our current FIR galaxy emission model reasonably well, even if not completely

The spatial extent of the dust:

- associated with individual galaxies or extended over their common halos ? -
 - T.Kashiwagi & YS: in preparation

Intergalactic dust is universal?



Ménard, Scranton, Fukugita & Richards: MNRAS 405 (2010) 1025

- Measure the reddening of background quasars due to the dust of SDSS galaxies from $<\delta m_0(\Phi)\delta_q(\Phi+\theta)>$
- Detected the presence of dust from 20kpc to several Mpc

Spatial distribution of intergalactic dust ?

$$\langle E(g-i)\rangle(\theta) = (1.5 \pm 0.4) \times 10^{-3}$$

Ménard et al. (2010)

- Extended much beyond each galaxy ?
- Sum of dust associated with galaxies ?
 - Very similar to the galaxy angular correlation function power-law...



 -0.86 ± 0.19

Stacking IRAS map to detect 100µm emission of SDSS galaxies

- MSFR measure the *absorption* of dust
- Combining with the measurement of the *emission* of dust of galaxies, we constrain the dust temperature, which would distinguish intragalaxy and intracluster dust.

Repeat the same stacking procedure

SDSS galaxies with 17<m_i<21 that MSFR use</p>

decomposition into three terms

 $I_{\text{total}}(\theta, m_i) = I_{\text{single}}(\theta, m_i) + I_{\text{clustering}}(\theta, m_i) + C$

Emission and absorption of dust

Optical depth (extinction=scattering+absorption)

$$\tau(\theta, \lambda) = \kappa_{\text{ext}}(\lambda) \Sigma_{\text{d}}(\theta)$$

Color excess

$$E_{g-i}(\theta, z) = \frac{2.5}{\ln 10} \left[\tau \left(\theta, \lambda_g^{\text{rest}}(z) \right) - \tau \left(\theta, \lambda_i^{\text{rest}}(z) \right) \right]$$

Emission (optically thin approximation)

$$I(\lambda_{100\mu m}, \theta, z) = \frac{1}{(1+z)^4} B\left(\lambda_{100\mu m}^{\text{rest}}, T_{d}(z)\right) \tau(\lambda_{100\mu m}^{\text{rest}}(z))$$

Emission/absorption

$$\frac{I(\lambda_{100\mu m}, \theta, \bar{z})}{E_{g-i}(\theta, \bar{z})} = \frac{\ln 10}{2.5} \frac{1}{(1+\bar{z})^4} B(\lambda_{100\mu m}^{\text{rest}}(\bar{z}), T_{\rm d}(\bar{z})) \frac{\kappa_{\rm abs}(\lambda_{100\mu m}^{\rm rest}(\bar{z}))}{\kappa_{\rm ext}\left(\lambda_g^{\rm rest}(\bar{z})\right) - \kappa_{\rm ext}\left(\lambda_i^{\rm rest}(\bar{z})\right)}$$

constraining the dust temperature

- The ratio of emission and absorption compared with MW and SMC models (Weingartner & Draine 2001) http://www.astro.princeton.edu/~draine/dust/dustmix.html
- consistent with typical dust temperature of galaxies (~20K)
 - MSFR and we observed the absorption and emission of the same component, respectively.
 - Temperature of cluster/ intergalactic dust ???



Summary

 Detection of FIR emission from SDSS galaxies by stacking image analysis over the SFD (IRAS@100µm) and AKARI FIS@90µm

- Largely explains the anomaly of SDSS galaxy number counts discovered by Yahata et al.(2007)
- The dust is unlikely to be extended over the cluster halo scales (~1Mpc)
 - The estimated dust temperature of ~20K is close to the dust temperature of galaxies
 - The amount of dust is consistent with that expected to be associated with SDSS galaxies from stacking analysis

Future prospects

- A new probe of unresolved (dusty) galaxy spatial correlations and/or dust profile of the hosting halo
- Possible correction to the SFD map and a future Galactic extinction map by *Planck*
- FIR emission from SDSS quasars is also detected by stacking analysis, which we plan to explore in future

references

Detection of Far Infrared Emission from Galaxies and Quasars in the Galactic Extinction Map by Stacking Analysis

- Kashiwagi, Yahata + YS, PASJ 65(2013)43
- The effect of FIR emission from SDSS galaxies on the SFD Galactic extinction map
 - Yahata et al., PASJ 59(2007)205



Kashiwagi + YS, in preparation

 Modeling the anomaly of surface number densities of galaxies on the Galactic extinction map due to their FIR emission contamination

Kashiwagi et al., submitted to ApJ

Stacking image analysis of SDSS galaxies with AKARI FIS

Okabe, Kashiwagi, YS + AKARI FIS team, in preparation



Stacking SDSS quasars Similar stacking analysis of SDSS photometric quasar catalogue (Richards et al. 2009) indicates the FIR signals as well.



Profiles of stacked quasar images



Quasars stacking should deserve further study...

トランジット系外惑星研究の魅力





地上望遠鏡による HD209458の光度曲線



地上望遠鏡による HD209458の速度時間変化





トランジット惑星の重要性

- 速度変動データを惑星の存在とする解釈の正当性
- 食の光度曲線による惑星半径の決定
- 惑星大気吸収による大気組成の決定
- 主星の自転軸と惑星の公転軸の関係(角運動量の起 源): ロシター効果
- 系外惑星のリングや衛星を発見する最大の可能性を 提供:惑星の自転軸の決定
- 測光観測による系外惑星サーベイ
 - 今後(より遠方)の惑星探査の有効な手段
 - 速度変動は分光観測を要するため効率が低い
 - アマチュアだからこそ可能な長期継続モニター観測によって、
 より外側の惑星の発見につながる可能性も
 137



2000年 系外惑星のトランジットを初検出
 惑星の大きさがわかる
 質量の観測データとあわせて密度を0.4g/ccと推定
 巨大ガス惑星であることの確認
 2001年11月 この惑星大気中にナトリウムを発見

ロシター効果を利用したHD209458の中心星 自転軸と惑星公転軸のずれの発見



太陽系外惑星の公転軸はちょっぴり傾いていを

ロシター効果とはなにか

食連星において、一方の星が他方の星の一部を掩蔽 することで、星の自転速度の一部が見かけ上、その星 と観測者の相対速度のように見えてしまう現象 (Rossiter 1924)



1. 恒星の自転によるドップ ラー効果によって、スペク トル線が広がる 惑星が恒星の一部を隠す と、スペクトル線の対応す る部分が欠ける 3. スペクトル線の平均的な 波長がずれる

ロシター効果とは

- 中心星の自転のため、星の線スペクトルの形 は波長に関して左右対称に広がっている
- しかし、トランジット惑星が同じ向き(左から 近づく側
 右)に通過すると
 - 中心星の近づく面を隠してから遠ざかる面を隠す
 - 星は、まず遠ざかりその後近づくように見える
- 一方、逆周り(右から左)の場合には
 - 中心星の遠ざかる面を隠してから近づく面を隠す
 - ▲ 星は、まず近づきその後遠ざかるように見える
- この結果、線スペクトルの形に非対称性が生まれる
 - この波長のズレを精密に観測すれば、惑星が右回りかた回りかがわかる
 - さら詳しく解析すると、惑星の公転面の傾きの角度 までわかる!



1924年、食連星 こと 座ベータ星の速度 データの解析に際して ロシターが発見した R.A. Rossiter: ApJ 60(1924)15

惑星の公転方向とロシター効果の関係予想図



わずかなズレの初検出!

私の研究室の大学院生太田泰弘君の理論的研究が、共同研究者であるハーバード大学のJosh Winn氏を刺激した結果

 $\lambda = 4^{\circ}.4 \pm 1^{\circ}.4$

- トランジット惑星 HD209458 のベストデータフィット
 - ケック天文台(ハワイの10m望遠鏡)による可視光での分光観測
 - ハッブル宇宙望遠鏡による可視光強度変動モニター
 - スピッツァー望遠鏡による赤外線強度変動モニター
- 主星の自転軸と惑星の公転軸が、(射影された)角度 λ にして (-4.4±1.4)度だけずれていることを発見
 - Queloz et al.(2000)の精度(約20度)を一桁以上向上
 - 本陽の場合、自転軸は系内惑星の全角運動量軸(不変面の法線方向) に対して約6度傾いている









わずかではあるが有意 に0からずれている!



中心星の視線速度

velocity [m 8⁻¹]

300101

Ě.

Winn et al. astro-ph/0504555 ApJ 631(2005)1215 144
系外惑星の初期条件と進化

太陽系外惑星系HD209458の観測データの解析 から、中心星の自転軸と惑星の公転軸がわずか 4.4度だけ傾いていることを発見した ■ 1) 「史上初」 観測精度の飛躍的進歩による成果 ■ 2) 「標準モデルの検証」 惑星は中心星の誕生ととも に形成される原始惑星系円盤を起源とする 3)「新たな謎の提供」 公転軸のわずかな傾きを説 明するモデルが必要

4) 「将来性」多くの惑星系に対して測定されれば、 原始惑星系円盤内の密度分布や角運動量分布など の手がかり。惑星リング・衛星の検出可能性。

天王星リングの発見



■ 天王星 ■ 1781年3月13日 ウィリア ム・ハーシェルが発見 天王星リング 1977年3月10日 天王星が 背景星を掩蔽する際の測 光観測から偶然発見 (Elliot et al. 1977) ■ 1986年 ボイジャー2号が 新たに2本の環を発見、現 在11本の環が知られてい る

天王星リングから学ぶこと **天王星リング**



半径:3.8万~5.1万kmの範囲 最大の環の幅は2500km ■ 天王星半径約2.5万km リングの向き⇒惑星の自転軸 リングは土星だけではない ■ ガス惑星に一般的? ■ 木星(3本、1979年:ボイジャー) ■ 土星(9本、1610年:ガリレオ) 天王星(11本、1977年:トランジット) 海王星(4本、1986年:トランジット) トランジットはリング発見に貢献

系外惑星リングの検出可能性(太田泰弘D論)



<u>トランジット惑星系HD209458</u> がリングを持つと仮定 ■ 惑星半径: R_木² リング内径: 1.5R_{木星} ■ リング外径: 2R_{未星} リングがないモデルとのズレ ■ 速度:1m/s程度 ■ 光度変化:0.1パーセント程度 ほとんど現在の測定精度の レベル! もし本当に存在していれば 近い将来検出できるかも 148

今後の系外惑星研究方向

 巨大ガス惑星発見の時代
 惑星大気の発見 惑星大気の精密分光観測による組成決定 惑星反射光の検出 ′■ 地球型惑星の発見 ■ 居住可能惑星の発見 バイオマーカー(生物存在の証拠)の同定 ■ 地球外生命の発見



- HD69830:約40光年先のK型星(0.86太陽質量)の周りに3つの 惑星(Lovis et al. Nature 2006年5月18日 441巻305ページ)
 - b. 10地球質量、0.08天文単位、8.7日公転周期
 - c. 12地球質量、0.19天文単位、32日公転周期
 - d. 18地球質量、0.63天文単位、197日公転周期(居住可能惑星? ただし地 球型ではなく表面はガスでおおわれているであろう)

http://www.eso.org/outreach/press-rel/pr-2006/phot-18-06.htm⁵⁰

バイオマーカー (生物存在の証拠)の同定 (居住可能)地球型惑星を発見するだけでは、 そこに生命があるかどうかはわからない ■ Biomarker の探求 Н,О ■酸素、オゾン、水の吸収線 red edge 0.4本当は真っ赤 反射率 ■ 植物のred edge H_C 0.2 ehlorophy H20 ■とにかく超精密分光観測 bum やっぱりSETIか? 2.5 (μm) ■可能性は低くともこれ以上に確実なものはない まっとうなバイオマーカーではやはり隔靴掻痒 151

地球が30光年先にあるとして何がどこまでわかるか?





Ford, Seager & Turner: Nature 412 (2001) 885

10%レベルの日変化は検出可能
 大陸、海洋、森林などの反射特性の違いを用いる
 三の存在が鍵
 太陽系外地球型惑星の天気予報の精度が本質的!

トランジット惑星研究の今後 "長岡半太郎に学べ"

長岡の土星型原子モデル Nagaoka, H.: Phil. Mag. 7(1904) 445

■量子論の先駆け

■ トランジット惑星

惑星の軌道角運動量(L):視線速度
主星のスピン(S): ロシター効果
惑星のスピン(s): リング、衛星
惑星系から原子物理学へ
原子物理(分光)学から惑星系へ





写真 2:長岡半太郎(1865-1950)

系外惑星にリングはあるか? 長岡論文の最終章より



写真 2:長岡半太郎 (1865-1950)

There are various problems which will possibly be capable of being attacked on the hypothesis of a Saturnian system

The rough calculation and rather unpolished exposition of various phenomena above sketched may serve is a hint to a more complete solution of atomic structure

トランジット惑星系の 主星自転・惑星軌道公転角



東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 須藤靖 神戸大学地球惑星談話会@理学講義棟Z101 2015年1月29日 16:00-17:00

初めてのトランジット惑星HD209458b



トランジット惑星観測からわかること

■ 測光観測

- 公転周期、惑星半径(主星半径との比)、我々の 視線に対する公転面軌道傾斜角
- ■主星の自転速度
- + 分光観測
 - ■惑星質量、離心率
 - spin-orbit 射影角 λ (主星自転軸と惑星公転軸の なす角の天球面上への射影)
- 星振学(asteroseismology)
 主星の温度、半径、密度などの精密推定
 我々の視線に対する主星自転軸傾斜角

主星-惑星-観測 者の位置関係



Benomar et al. 2014, PASJ 66, 9421, arXiv:1407.7332 Lund et al. 2014, AA 570, A54 arXiv:1407.7516



Observers (front) view



ロシター効果と惑星公転軸

- 中心星の自転のため、星の線スペクトルの 形は波長に関して左右対称に広がっている
 - しかし、トランジット惑星が同じ向き(左から右)に通過すると
 - 中心星の近づく面を隠してから遠ざかる面を隠す
 - 星は、まず遠ざかりその後近づくように見える
- 一方、逆周り(右から左)の場合には
 - 中心星の遠ざかる面を隠してから近づく面を隠す
 - 星は、まず近づきその後遠ざかるように見える
- この結果、線スペクトルの形に非対称性が 生まれる
 - この波長のズレを精密に観測すれば、惑星が右 回りか左回りかがわかる
 - さら詳しく解析すると、惑星の公転面の傾きの角 度までわかる!



1924年、食連星 こと 座ベータ星の速度 データの解析に際して ロシターが発見した R.A. Rossiter: ApJ 60(1924)15

Ohta, Taruya & Suto: ApJ 622(2005)1118

THE ROSSITER-MCLAUGHLIN EFFECT AND ANALYTIC RADIAL VELOCITY CURVES FOR TRANSITING EXTRASOLAR PLANETARY SYSTEMS

YASUHIRO OHTA, ATSUSHI TARUYA,¹ AND YASUSHI SUTO¹ Department of Physics, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan; ohta@utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp, ataruya@utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp, suto@phys.s.u-tokyo.ac.jp Received 2004 October 13; accepted 2004 December 10

Among the recently discovered transiting extrasolar planetary systems, i.e., TrES-1 by the Trans-Atlantic Exoplanet Survey (Alonso et al. 2004) and OGLE-TR 10, 56, 111, 113, 132 by the Optically Gravitational Lens Event survey (e.g., Udalski et al. 2002c, 2002b, 2002a, 2003; Konacki et al. 2003; Bouchy et al. 2004; Pont et al. 2004), TrES-1 has similar orbital period and mass to those of HD 209458b, but its radius is smaller. Thus, it is an interesting target to determine the spin parameters via the RM effect; if its planetary orbit and the stellar rotation share the same direction as discovered for the HD 209458 system, it would be an important confirmation of the current view of planet formation out of the protoplanetary disk surrounding the protostar. If not, the result would be more exciting and even challenge the standard view, depending on the value of the misalignment angle λ .

We also note that the future satellites *COROT* and *Kepler* will detect numerous transiting planetary systems, most of which will be important targets for the RM effect in 8–10 m class ground-based telescopes. We hope that our analytic formulae presented here will be a useful template in estimating parameters for those stellar and planetary systems.

In conclusion, we have demonstrated that the radial velocity anomaly due to the RM effect provides a reliable estimation of spin parameters. Combining data with the analytic formulae for radial velocity shift Δv_s , this methodology becomes a powerful tool in extracting information on the formation and the evolution of extrasolar planetary systems, especially the origin of their angular momentum. Although it is unlikely, we may even speculate that a future RM observation may discover an extrasolar planetary system in which the stellar spin and the planetary orbital axes are antiparallel or orthogonal. This would have a great impact on the planetary formation scenario, which would have to invoke an additional effect from possible other planets in the system during the migration or the capture of a free-floating planet. While it is premature to discuss such extreme possibilities at this point, the observational exploration of transiting systems using the RM effect is one of the most important probes for a better understanding of the origin of extrasolar planets.

主星自転軸と惑星公転軸のずれは系外惑星の起源と進化を探る重要な手がかり

ロシター効果@wikipedia

13/06/05

Rossiter-McLaughlin effect - Wikipedia, the free encyclopedia

Rossiter-McLaughlin effect

From Wikipedia, the free encyclopedia

The **Rossiter-McLaughlin effect** is a spectroscopic phenomenon observed when either an eclipsing binary's secondary star or an extrasolar planet is seen to transit across the face of the primary or parent star. As the main star rotates on its axis, one quadrant of its photosphere will be seen to be coming towards the viewer, and the other visible quadrant to be moving away. These motions produce blueshifts and redshifts, respectively, in the star's spectrum, usually observed as a broadening of the spectral lines. When the secondary star or planet transits the primary, it blocks part of the latter's disc, preventing some of the shifted light from reaching the observer. This causes the observed mean redshift of the primary star as a whole to vary from its normal value. As the transiting object moves across to the other side of the star's disc, the redshift anomaly will switch from being negative to being positive, or vice versa. This effect has been used to show that as many as 25% of hot Jupiters are orbiting in a retrograde direction with respect to their parent stars.^[1] strongly suggesting that dynamical interactions rather than planetary migration produce these objects.



Illustration showing the effect. The viewer is situated at the bottom. Light from the anticlockwiserotating star is blue-shifted on the approaching side, and red-shifted on the receding side. As the planet passes in front of the star it sequentially blocks blue- and red-shifted light, causing the star's apparent radial velocity to change when it in fact does not.

History

J. R. Holt in 1893 proposed a method to measure the stellar rotation of stars using radial velocity measurements, he predicted that when one star of an eclipsing binary eclipsed the other it would first cover the advancing blueshifted half and then the receding redshifted half. This motion would create a redshift of the eclipsed star's spectrum followed by a blueshift, thus appearing as a change in the radial velocity in addition to that caused by the orbital motion of the eclipsed star.^[2]

Further reading

 Ohta, Y.; Taruya, A. & Suto, Y. (2005). "The Rossiter–McLaughlin Effect and Analytic Radial Velocity Curves for Transiting Extrasolar Planetary Systems". *The Astrophysical Journal* 622 (1): 1118–1135. arXiv:astro-ph/0410499 (http://arxiv.org/abs/astro13/06/05

出典:フリー百科事典『ウィキペディア(Wikipedia)』

ロシター効果または**ロシター・マクローリン効果**とは、食連星の伴星や太陽系外惑 星が恒星面通過(食)を起こす際に、主恒星の光のドップラーシフトに一時的な変化 が起きる現象のことである。

原理

恒星が自転をしている場 合、観測される恒星面の半 分は手前に近づいてくるよ うに見え、残り半分は奥に 逃げて行くように見える。 この動きによってそれぞれ の面が発する光は相異なる 方向(青方と赤方)にドッ プラーシフトを起こす。通 常は、地球から遠く離れた 恒星のそれぞれの半球を個 別に観測することはできな いため、このドップラーシ フトはスペクトル中の吸収 線や輝線が本来より幅広く なるという形で観測され る。



恒星の日転により、恒星からの元は異なったトップラージ フトを持つ光を合成したものになっている。そのため、伴 星によって光が一部分だけが遮られると、ドップラーシフ トの平均値には変化が生じる。なお、上図では観測者は下 方から恒星を眺めており、伴星の軌道は順行軌道を仮定し ている。

順行軌道の伴星が恒星面を

通過する場合は、まず手前に流れてくる側の半円が一部覆い隠される。これは青方偏 移を起こした恒星の光のみが選択的にブロックされることを意味する。その結果、ド ップラーシフトの平均としては赤方寄りに偏移することになる。伴星が恒星面の中央 に近づくにつれこの効果は次第に弱まるが、偏移が0になった後は、同様のメカニズ ムによって次第に青方偏移が見られるようになる。そして、通過が完全に終了すると 恒星のドップラーシフトは平常に戻る。

ロシター効果を観測することで主星の赤道面と伴星の公転面のなす角度を推定するこ とができる。また、惑星が逆行軌道を持つ場合は、上の説明とは逆の青方→赤方とい うパターンの偏移が起きる。これを利用し、太陽系外惑星のWASP-17bやHAT-P-7bの逆行公転が発見されている^{[1][2]}。

参考文献

- Anderson, D. R. *et al.* (2009). "WASP-17b: an ultra-low density planet in a probable retrograde orbit" (http://ads.nao.ac.jp/abs/2009arXiv0908.1553A). *The Astrophysical Journal* Submitted.
- Narita, N. *et al.* (2009). "First Evidence of a Retrograde Orbit of a Transiting Exoplanet HAT-P-7b" (http://ads.nao.ac.jp/abs/2009PASJ...61L..35N). *Publications of the Astronomical Society of Japan* 61 (5): L35-L40.
- Ohta, Y *et al.* (2005). "The Rossiter-McLaughlin Effect and Analytic Radial Velocity Curves for Transiting Extrasolar Planetary Systems" (http://ads.nao.ac.jp/abs/2005ApJ...622.1118O). *The Astrophysical Journal* 622 (2): 1118-1135.

惑星の公転方向とロシター効果の関係予想図



Measurement of Spin-Orbit Alignment in an Extrasolar Planetary System (太陽系外惑星系における自転軸と公転軸の向きの測定)

- Joshua N. Winn¹, Robert W. Noyes¹, Matthew J. Holman¹, David B. Charbonneau¹, 太田泰弘²、樽家篤史²、須藤靖²、成田憲保², Edwin L. Turner ^{2,3}, John A. Johnson⁴, Geoffrey W. Marcy⁴, R. Paul Butler⁵, & Steven S. Vogt⁶
 - ¹ハーバード大学、²東京大学、³プリンストン大学、⁴カリフォルニア大学バーク レー校、⁵ワシントン カーネギー研究所、⁶カリフォルニア大学サンタクルス校
- The Astrophysical Journal 631(2005)1215 (10月1日号)









逆行する系外惑星(HAT-P-7)の発見



ともにすばる望遠鏡@ハワイでの成果
 でも逆行軌道の惑星なんて、どうやったら出来るの???

私的先入観の時間的推移(1) 2005年: (Ohta et al., Winn et al.) ■惑星公転軸と主星自転軸とは当然平行のはず 2009年:多くのmisaligned惑星発見(ただ) し実質的に単独のホットジュピターのみ) 惑星間の重力散乱が悪さをしているのでは? 外側で誕生したガス惑星が、他の惑星との重力 散乱の結果内側に落ちる(放出されるものもある) ■軌道は一般に高離心率、傾斜角も大きい ■その後、主星との潮汐相互作用を通じて順行 (一部は逆行)軌道へ近づく

代表的な惑星移動シナリオ Type I migration Low-mass planet - spiral wave in the gas disk Type II migration High-mass planet - gap in the disk Gravitation scattering Planet - planet **Simulation by Phil Armitage**







惑星間重力散乱 + 主星・惑星潮汐作用 = 円軌道のホットジュピター + 遠方の高離心率軌道の惑星



- 原始惑星系円盤
 ダスト沈殿・成長
 微惑星形成・合体
 円軌道の原始惑星
- ガス降着によるガ ス惑星の誕生

太陽系形成標準モデル (京都モデル・林モデル) 重力少数多体系
 カオス的力学進化
 近接散乱

古在機構

軸のずれ

軌道収縮

円軌道化

主星自転軸と惑星公転

主星·惑星潮汐作用

ホットジュピターの誕生

- ▶ 軌道交差
- 惑星放出



3惑星系の 数値計算例 古在機構の保存量 $h = (1 - e^2)cos^2I = const.$

Tidal circularization after the Kozai cycle

Xue et al. (2013)

主星と惑星の潮汐相互作用・散逸



Xue et al. (2013)

主星と惑星の角運動量の大きさの 比を変化させたときの、主星の自 転軸と惑星の公転軸のなす角度 の時間発展計算例

主星の自転軸と惑星の公転軸の向きの時間発展計算例

順行軌道がもっとも安定だが、逆行 軌道に向かう場合もある。極軌道 (直交)も一時的には安定となるが やがて順行か逆行に落ち着く



ET(equilibrium tide) モデルの問題点



Lai(2012)による潮汐model



この仮説から予想されるホットジュピター

外側で誕生したガス惑星が、少数多体系の重力散乱で内側に落ちる

- 軌道は一般に高離心率、傾斜角も大きい
- 主星自転軸とも惑星公転軸は大きくずれているが、その後の潮汐相互作用を通じて順行(あるいは一部は逆行)軌道へ近づいて行く
 - 太陽系は強い重力散乱を経験していないため、ホットジュピターはなく、惑星の公転軸と太陽の自転軸はすべてほぼ平行のまま

私的先入観の 時間的推移(2)



■ 2010年

- 太陽系のように公転面をほぼ共有する複数惑星系では、惑星間の重力散乱が効いたとは思えない
- 実際、太陽系では太陽の自転軸と惑星の公転軸 は5、6度の範囲でほぼ揃っている
- ■とすれば複数トランジット惑星系(公転面がほぼ同じ)のλはほぼ0のはず ⇒ すばるで観測して確認しようじゃないか!(Hirano et al.)

多重トランジット惑星系KOI-94: 惑星食の初検出



Hirano et al. ApJL 759 (2012)L36



- すばる観測前にケプラー衛星 測光データを確認中、初めて の惑星食を偶然発見 すばる望遠鏡のロシター効果
- 観測で、主星自転軸と惑星公 転軸がほぼ揃っている事を発見

KOI-94:ロシター効果と惑星食



惑星食の確率は極めて低いので、これが最初で最後の例かも? 地球からみて金星と水星が同時に太陽面を通過(トランジット) するのは、西暦69163年7月26日と西暦224508年3月27日だけ らしい。しかもこれは単なる同時トランジットで、惑星食ではない。

私的先入観の時間的推移(3) 2012年 (Hirano et al., Masuda et al.) 複数トランジット惑星系で初めてロシター効 果が観測されたKOI-94は $\lambda = -6^{\circ+13^{\circ}}$ -11.で、 予想通り確かにほぼ平行だった ■ついでに惑星食を発見。その後の増田君に

よる詳細な解析が認められて、惑星系候補 KOI-94は惑星系Kepler-89として承認された (多分日本人でKepler番号を確定させたの は初めて)

めでたしめでたし、、、(?)



Dear Kento Masuda,

Congratulations on the publication of your discovery of the planetary system around KOI-94 (KIC 6462863).

It is our policy to assign Kepler numbers to all confirmed planets that have been observed by the Kepler Mission. The Kepler name that corresponds to KOI-94 is Kepler 89, with the same planet letters as assigned in your paper.

We look forward to seeing more planets confirmed by your group.

Thanks,

Solange V. Ramirez (on behalf of the NASA Exoplanet Archive)

主星自転軸と惑星公転軸のまとめ (天球上の射影角なので3次元角度ではない)



2013年6月時点でRM効果が測定されたトランジット惑星70個中29個がπ/8以 上の有意なずれ。うち、8個が極軌道、7個が逆行軌道。

Xue et al. (2014)

私的先入観の
時間的推移(4)



Observers (front) view

- 2013年 (Huber et al. Science 342, 331)
 - Kepler-56 = red giant (1.3M_s, 4.3R_s) + 10.5day and 20.4day planets
 - Asteroseismology解析の結果、主星の自転軸が 47±6度傾いていることがわかった
 - ■惑星公転軸と主星自転軸も同程度ずれているはず
 - 複数トランジット惑星系でもspin-orbit角は有意にO からずれている!?

私的先入観の時間的推移(5)

- 2014年 (Benomar, Masuda, Shibahashi+YS)
 中心星が主系列星の場合を知りたい
 - Asteroseismologyをやってみたい
 - Kepler-25 = F-type star (1.2M_s, 1.4R_s) +
 6.2day and 12.7day transiting planets+
 123day non-transiting planet
 - Kepler-25c: λ=7°±8°、-0.5°±5.7°の2つの以前の観測結果はいずれも0と一致
 λではなく、3次元的なspin-orbit角を知りたい(逆行惑星と考えられているHAT-P-7も)
主星-惑星-観測 者の位置関係



Benomar et al. 2014, PASJ 66, 9421, arXiv:1407.7332 Lund et al. 2014, AA 570, A54 arXiv:1407.7516



Observers (front) view





http://www.asteroseismology.org/

Non-radial oscillations $Y_{Im}(\theta, \phi)$ (spherical degree I=2)



http://www.asteroseismology.org/

Stellar inclination (I=3)

m=±3

m=±2

 $m=\pm 1$

m=0



T.L. Campante, arXiv:1405.3145

Power spectra of I=1 and 2 modes



Gizon & Solanki, ApJ 589 (2003)1009

Power spectra of Kepler-25



Benomar et al. 2014, PASJ 66, 9421, arXiv:1407.7332

Kepler-25とHAT-P-7のspin-orbit角

- Kepler-25 (2重トランジット惑星系)
 - 主星自転傾斜角 i_s=65.4° ^{+12.1°}-7.4°
 - ■射影角 λ=9.4°±7.1°
 - **3次元角** ψ=26.9° +^{7.0°}-9.2°
- HAT-P-7 (逆行惑星候補)
 - 主星自転傾斜角 i_s=27° +^{35°}-18°
 - 射影角 λ=186° +10°₋₁₁。





Benomar et al. 2014, PASJ 66, 9421, arXiv:1407.7332

結論:結局よくわからない

Nature vs. Nurtureの一例?

- 初期条件: 共通の原始惑星系円盤から誕生した主星 と惑星は同じ向きに回っているはずじゃなかったの?
 - Eve Ostriker@Princeton「そんなこと誰が言った!?」
- 力学的進化
 - ■主星の誕生
 - ■主星--円盤相互作用
 - ■惑星の誕生
 - ■惑星間の重力散乱
 - 主星-惑星の潮汐相互作用

数値シミュレーション、理論モデル、観測提案、デー タ解析でやるべきことがいっぱい残っている

系外惑星とバイオマーカー ~生命の存在を伝える~

大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖 理学クラスター講義Ⅳ 「伝える」 2014年7月22日 13:00-15:00 @小柴ホール





太陽系外惑星発見の歴史年表

| 850 |) 1 3 1 1 6 7 11 20 13 30 25 30 33 29 61 64 82 119 184 116 125 | 818 | 850 |
|-----|---|------|-----|
| 800 |) | | 800 |
| 750 | | | 750 |
| 700 | 1995年に我々は何も知ら | | 700 |
| 650 | | | 650 |
| 600 | なかった事を思い知る | | 600 |
| 550 | | | 550 |
| 500 |) | | 500 |
| 450 |) | | 450 |
| 400 |) | | 400 |
| 350 |) | | 350 |
| 300 |) | | 300 |
| 250 |) | | 250 |
| 200 |) | | 200 |
| 150 |) | | 150 |
| 100 | | | 100 |
| 50 | | | 50 |
| 0 | 1988 1989 1990 1991 1992 1993 1994 1995 1996 1997 1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2 | 2014 | 0 |

系外惑星研究の現在・過去・未来 ■ 巨大ガス惑星発見の時代(1995) 惑星大気の発見(2001) 惑星赤外線輻射の検出(2005) 惑星可視域反射光の検出 (2009) ■ 地球型居住可能惑星の発見

- 系外惑星リング、衛星の発見
- 地球型惑星の直接検出(測光&分光)
- バイオマーカー(生物存在の証拠)の同定
 - 地球外生命の発見



newscenter/archive/2001/38/

- 2000年 系外惑星HD209458bのトランジットを検出
 - 惑星の大きさがわかる
 - 質量の観測データとあわせて密度を0.4g/ccと推定
 - 巨大ガス惑星であることの確認
- 2001年11月 この惑星大気中にナトリウムを発見 (Charbonneau et al. 2001)

すばる望遠鏡によるガス惑星GJ504bの直接撮像:コロナグラフ技術の進歩



57光年先にある 4木星質量の惑 星の初直接撮像 Kuzuhara et al. ApJ 774(2013)11 すばる望遠鏡 SEEDSサーベイ の成果 ■ 地球型惑星直接 撮像への第一歩

すでに学んだこと:惑星いろいろ

■惑星(系)は稀なものでなく普遍的

太陽と似た恒星の34%(以上)が惑星を持ち、17%(以上)は複数の惑星を持つ

■ 太陽系と良く似た系もかけ離れた系も存在

- 太陽の周りを数日で公転する木星型惑星が大量 に存在(太陽系の木星の周期は約10年)
- 太陽系とは違い円軌道というよりもかなりゆがん だ楕円軌道の惑星も多い

■地球の2倍程度の質量の惑星候補も複数報告

水が液体として存在する摂氏0度から100度の温度の惑星(ハビタブル惑星)候補も報告

系外惑星に生命の兆候を探る

- 天文学の文脈での生命の定義
 リモートセンシング
- 生命が存在する可能性の高い惑星
 ハビタブルゾーン
- 何を観測すべきか/できるか

バイオマーカーとしての酸素とレッドエッジ

■いくつかの研究の紹介

何を観測すれば良いのだろう?

■ 生物学者による生命の定義はかなり原理的

- ■代謝、自己増殖、外界との隔離(個別の生命)
- ■ダーウィン的進化を行う自己維持的化学系
- 天文学者が期待する生命の定義は実用的
 - 遠方からの観測によって区別できるような実用 的なものでないと役に立たない(生命系)
- (できれば十分条件に近い)生命を宿す環境の必要条件とは何か?
 - (非生物環境では実現しにくい)熱平衡からの極端なずれ(Lederberg 1965, Lovelock 1965)

地球の観測

ガリレオ探査機による地球上の生命探査

- 1986年5月打ち上げ
- 1990年12月8日一回目の 地球スイングバイ時に地球 上の"生命探査"
- 地球には生命がいるらしい!
 - ■大量の気体酸素
 - 植物のレッドエッジ
 - 熱平衡から極端にずれた大 気中のメタンの存在量
 - 狭帯域で振幅が変化する"不 自然な"パルス状電波



Sagan, Thompson, Carlson, Gurnett & Hord: Nature 365(1993)715

Sagan et al. (1993): 大気分光

ガリレオ探査機の観測した地球の可視光一近赤外スペクトル



酸素分子の吸収@Aバンド(0.76µm)

FIG. 1 a, Galileo long-wavelength-visible and near-infrared spectra of the Earth over a relatively cloud-free region of the Pacific Ocean, north of Borneo. The incidence and emission angles are 77° and 57° respectively. The $(b'\sum_{g}^{+}-X^{3}\sum_{g}^{-})$ 0–0 band of O_{2} at 0.76 µm is evident, along with a number of H₂O features. Using several cloud-free regions of varying airmass, we estimate an O_{2} vertical column density of 1.5 km-amagat ± 25%. *b* and *c*, Infrared spectra of the Earth in the 2.4–5.2 µm region. The strong v_{3} CO₂ band is seen at the 4.3 µm, and water vapour bands are found, but not indicated, in the 3.0 µm region. The v_{3} band of nitrous oxide, N₂O, is apparent at the edge of the CO₂ band near 4.5 µm, and N₂O combination bands are also seen near 4.0 µm. The



methane (0010) vibrational transition is evident at 3.31 μ m. A crude estimate¹⁰ of the CH₄ and N₂O column abundances is, for both species, of the order of 1 cm-amagate (=1 cm path at STP).



ガリレオ探査機の観測した地球のレッドエッジ



(参考)等方散乱近似での反射スペクトル



Sagan et al. (1993): 電波観測

ガリレオ探査機の観測した地球の電波信号の時系列

FIG. 4 A frequency–time spectrogram of the radio signals detected by the Galileo plasma wave instrument. The intensities are coded in the sequence blue–green-yellow–red, with blue lowest and red highest. Several natural sources of radio emission are shown in a, including auro-ral kilometric radiation (AKR). Modulated emission at f > 4 MHz is shown with an expanded time scale in b. Modulated patterns of this type are characteristic of the transmission of information, and would be highly unusual for a naturally occurring radio source. (ut, universal time; R is distance of Galileo from Earth in units of Earth's radius, $R_{\rm E}$; LT, local time.)



ボイジャー1号による太陽系内惑星撮像



ペイル・ブルー・ドット





土星越しに 見る地球

土星探査機カッシーニが撮影した地球と月 2013年7月20日(日本時間):2万人がこちらに手を振っている

> View from Saturn (Cassini) 900 million miles away

ハビタブル惑星

ハビタブルゾーン

水が液体として存在できる温度領域と言われる事が多いが、実は中心星からのフラックスで定義する(でないと、惑星の反射率が必要)

▶側の境界⇔最大温室効果

CO2による温室効果が最大となる分圧が存在する。 これは、CO2の温室効果がCO2によるレイリー散乱による反射率の上昇で相殺されてしまうため。したがって、この時の温室効果を考慮しても地表温度を273K以上にできないような中心星からのフラックス(すなわち距離)が、ハビタブルゾーンの外側境界を決める。

<u> ハビタブルゾーン:内側の境界</u>

■ 暴走温室効果

- 表面温度が臨界温度(真水なら674K)を越えると、 海が完全に蒸発する
- 熱的に赤外線で放出できる最大値以上のフラックス が入射する(事実上、これは上の定義と同じ)

■ 湿潤温室効果

地表温度が340Kを超えると対流圏界面が上昇し、 成層圏の水蒸気が増える。その水蒸気は光分解し、 水素が流出し続けるためやがて水がなくなる。

Recent Venus

■ 10億年前には金星から水がなくなっているという事 実を現在の太陽光度に応用した経験的推定

中心星の距離とハビタブルゾーン



Kasting, Kopparapu, Raminez & Harman: arXiv:1312.1328

地球サイズのハビタブル惑星の存在確率

■ GK型星を公転する地球半径の1~2倍の惑星

- ケプラーのトランジット惑星検出数から、観測的選択効果 を補正して推定
- 11±4% (地球上での太陽フラックスの1~4倍のもの)
 5.7+2.2-1.7% (公転周期が200~400日のもの)

Table 1. Occurrence of small planets in the habitable zone

| HZ definition | a _{inner} | a outer | F _{P,inner} | F _{P,outer} | f _{HZ} (%) | |
|---------------------------------|---------------------------|----------------|----------------------|----------------------|---------------------|--|
| Simple | 0.5 | 2 | 4 | 0.25 | 22 | |
| Kasting (1993) | 0.95 | 1.37 | 1.11 | 0.53 | 5.8 | |
| Kopparapu et al. (2013) | 0.99 | 1.70 | 1.02 | 0.35 | 8.6 | |
| Zsom et al. (2013) | 0.38 | | 6.92 | | 26* | |
| Pierrehumbert and Gaidos (2011) | | 10 | | 0.01 | $\sim 50^{+}$ | |

Petigura, Howard & Marcy: arXiv:1311.6806



バイオマーカー

- 何をもってバイオマーカーとするのかは曖昧
 - 生物由来と考えられる大気成分(酸素、オゾン、 メタン)の分光観測
 - 植物のレッドエッジの測光観測
 - ■知的生命体からの信号の電波観測
 - 地球外での生命を生み出す環境とそれに対応した生物の多様性をどこまで認めるか
- いずれにせよ、検出は天文学観測しかない
 - 天文学で検出可能な限界は何か
 - どのような検出器・望遠鏡を作るべきか



Kasting et al. arXiv:0911.2936 "Exoplanet characterization and the search for life"

地球の赤外スペクトルとバイオマーカー



オゾン:@9.6µm 仮に酸素が少量であっ ても検出可能なので、 酸素の良いトレーサー ■ 水: <8µm, >17µm <mark>_ メタン@7.7µm</mark> ■ 24億年以上前の地球 にはまだほとんど酸素 がなかったはず ■ メタン生成細菌由来?

Kasting et al. arXiv:0911.2936 "Exoplanet characterization and the search for life"

より過激(保守的?)なバイオマーカー Extrasolar plants on extrasolar planets (居住可能)地球型惑星を発見するだけでは 、そこに生命があるかどうかはわからない ■ Biomarker の探求 H_C ■酸素、オゾン、水の吸収線 落葉樹の葉 red edge ■ 植物のred edge 本当は真っ赤 反射率 H_Ø 地球のリモートセンシング 0.2ehlorophvll H.0 ではすでに確立 bumb Seager, Turner, Schafer & Ford: 2.5 astro-ph/050330 波長 [ミクロン]

地球が30光年先にあるとし て何がどこまでわかるか? 系外惑星リモートセンシング





Ford, Seager & Turner: Nature 412 (2001) 885

10%レベルの日変化は検出可能
大陸、海洋、森林などの反射特性の違いを用いる

裏の存在が鍵

太陽系外地球型惑星の天気予報の精度が本質的!
Vesto Melvin Slipher (1875-1969)

レッドエッジをバイオマーカーとして使う先駆的な試み

- "spiral nebulae" (今で言う銀河)の赤方偏移を発見
- ハッブルによる宇宙膨張の発見に本質的寄与
- 天文台長としてPluto(冥王星)という名前を採用し決定

"Observations of Mars in 1924 made at the Lowell Observatory: II spectrum observations of Mars' PASP 36(1924)261





reflection spectrum. The Martian spectra of the dark regions so far do not give any certain evidence of the typical reflection spectrum of chlorophyl. The amount and types of vegetation required to make the effect noticeable is being investigated by suitable terrestrial exposures.

系外惑星の植物の色

- The color of plants on other worlds
 - Nancy Y.Kiang
 - Scientific American April 2008
 - 邦訳: 日経サイエンス2008年7月号



- 生物学と学際的な協力が、天文学にとっていかに大切かを示す具体例
- 以下はこの解説の単なる要約
- 私は専門家ではないため誤解している可能 性が高い。あらかじめご容赦を

大気中のバイオマーカー

酸素(O₂)と水(H₂O) 生命の存在しない世界でも、中心星からの光による 水蒸気の分解で、惑星の大気中に少量の酸素ができる可能性はある。しかし、酸素ガ スは雨に溶けたり、岩石の酸化や火山ガスの酸化に使われて減っていく。したが って、もし液体の水のある惑星に酸素が大量に存在すれば、酸素の発生源はほ かにもあるはずだ。酸素発生型光合成が有力な候補となる。

オゾン(O₃) 地球の成層圏では、太陽光のエネルギーで酸素分子が分解され、 これが再結合することでオゾンが生じる。液体の水とともにオゾンの存在が確認でき れば、生命の強力な証拠となる。酸素は可視光領域で検出可能だし、オゾンも赤外 波長域で検出できる。従来の望遠鏡で容易に観測できる。

メタン (CH4) と酸素の組み合わせ, またはメタンの季節変動 メタンと酸素は, 光合成以外では生成されにくい特徴的な組み合わせだ。また, メタン濃度が季節変動を示したら, 生命体の存在を示す優れた指標となる。生 命の存在しない惑星では, メタン濃度はほぼ一定だが, 恒星からの光がメタン を分解するために, 長い時間をかけて徐々に低下する。

塩化メチル(CH₃Cl) 塩化メチルガスが地球上で生じるケースは,植物の燃焼(おもに森林火災)のほか,プランクトンや海水中の塩素に太陽光が作用することなどだ。塩化メチルは酸化されると分解する。しかし,M型星の放射は比較的弱いので,塩化メチルガスが検出可能な量まで蓄積する可能性がある。

惑星表面での光のスペクトル: G型星の場合

光合成色素は, さまざまな波長域の光 を吸収する。地球上のすべての陸上植 物は, クロロフィルaとクロロフィルb, カロテノイド系色素なしには生存でき ない。藻類やシアノバクテリアはフィコ ビリン色素を使用する。



恒星の光

大気中に入射前の光は明瞭なスペクトル を示す。スペクトルの全体的な形状は, 恒星の表面温度によって決まる。曲線上 の切れ込みの一部は,恒星そのものの 大気が吸収したことによる。

惑星表面

大気中のガスが恒星の放射する光を不均 ーに吸収し,そのピークの色をずらす。 また,特定の波長を吸収するのでスペク トルに吸収帯が生じる。吸収帯は地球(太 陽はG型)について最もよく知られている。

水面下

水は青色光は通すが,赤色光や赤外光を 吸収する傾向がある。グラフは,水面下 5cmおよび60cmにおける値を示す(成 熟したM型星については酸素のほとんど ない大気を想定した)。



G型星

寿命:100億年

下の曲線は、地球上に注ぐ 太陽光のスペクトルを示す

地球の軌道:1天文単位

異なる環境下での光のスペクトル:







系外惑星リモートセンシング

地球型惑星探査プロポーザル: *The New Worlds Mission*



http://newworlds.colorado.edu/

■ 口径(2-4)mの可視光望遠鏡@L2点

- ■7万km先に中心星を隠すオカルター衛星をおく
- 望遠鏡にはその星の周りの惑星からに光のみが届く
- ■惑星の分光・測光モニターからのバイオマーカー検出
- コロラド大学を中心とした米国と英国の共同計画
- 同様の計画がプリンストン大学でも検討中(O3)

New Worlds Mission: simulated image

軌道面傾斜角=0°

軌道面傾斜角=60°



- 我々の太陽系の内惑星を(4m宇宙望遠鏡+オカルター)を用いて30光年先から観測した場合に予想される画像
- このようなミッションが実現した場合、一体何がどこまで分かるのだろうか?
 <u>http://</u>

newworlds colorado edu/

O₃: The Occulting Ozone Observatory

O₃: The Occulting Ozone Observatory



N. Jeremy Kasdin¹, David N. Spergel¹, P. Doug Lisman², Stuart B. Shaklan², Dmitry Savransky¹, Eric Cady¹, Edwin L. Turner¹, Robert Vanderbei¹, Mark W. Thomson², Stefan R. Martin², K. Balasubramamian², Steven H. Pravdo², Yuka Fujii³, Yasushi Suto³ ¹Princeton University, ²Jet Propulsion Laboratory, ³University of Tokyo

arass+atmos

t=20

0

-2.5 log (f_{0.44 µm} / f_{0.60 µm})

drygrass+atmos

snow+atmos

t=14

atmos

-1

ocean+atmos

2.5 log (f_{0.60μm} / f_{0.80μm})

0

-2



Occulter & Observatory Launch together

第二の地球の色から、海、雲、植生の占める面積の割合を推定する

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻
 藤井友香、河原創、樽家篤史、須藤靖
 東京大学気候システム研究センター
 福田悟、中島映至
 プリンストン大学

Edwin Turner

Fujii et al. Astrophys. J. 715(2010)866, arXiv:0911.5621 Astrophys. J. 738(2011)184, arXiv:1102.3625

http://www.space.com/scienceastronomy/color-changing-planets-alienlife-100513.html

A pale blue dot

地球は青かった?



ミュレーション

■ 春分(3月)



自転軸に垂直な方向から観測 Fujii et al. (2010)
 地球観測衛星のデータを用いて計算

等方散乱近似での反射スペクトル



第二の地球の色から表面積を推定



雲は無視 中心星の光が完全にブロ ックできた場合 10pc先の地球を口径4m の宇宙望遠鏡で1週間観測 レイリー散乱の一次近似 海、土、植物、雪の4つ の成分の面積比を推定

地球の色



time from start of observation [hr]

雲の反射スペクトル:モデル依存性



EPOXIデータから推定された面積



地球測光観測データから推定された地表面成分の経度分布地図



地球型系外惑星の世界地図:反射光ト モグラフィーによる惑星表面マッピング

- 河原創(東大地惑)、藤井友香(東工大ELSI)
 - Kawahara and Fujii (2010) ApJ 720, 1333
- 自転だけでなく公転の効果も取り入れれば、自転 傾斜角が大きくとも、地球の全表面を観測できる

■ 地球の全球表面地図が描けるはず

- 雲なし・等方散乱を仮定して模擬データを作成し、 それから2次元マップが再構築できるか試した
- 惑星の自転周期、自転軸の傾斜角、季節の有無も 同時にわかる

- 生物由来の気体(O₂、O₃、CH₄など)
 植物のレッドエッジ
 - Slipher (1924), Sagan et al. (1993)
 - Seager, Turner & Ford (2001); mock simulation
 - Tinetti et al. (2006), Kiang et al. (2007)
 - Fujii et al. (2010,2011) first inversion (1D mapping)
 Kawahara & Fujii (2010,2011) 2D mapping
- 植物が陸上に進出する以前の過去の地球で レッドエッジに対応するバイオマーカー?
 - ■始生代の地球にいた紅色細菌は検出できるか?
- Sanroma et al. arXiv:1311.1145

紅色細菌 (purple bacteria) 光合成細菌のうち酸素を発生せず、カロテノイドの 蓄積により赤色ないし褐色を呈するものの総称



各成分の反射スペクトル



Sanroma et al. arXiv:1311.1145

紅色細菌の反射スペクトル



大陸分布

陸地の大域的 分布、特にその 非一様性の度合 ジ いは、自転にと もなう反射光の 時間変化を観測 する系外惑星リ モートセンシング において、重要 な意味を持つ



カンブリア後期(5億年前) の大陸分布



Sanroma et al. arXiv:1311.1145

過去と現在の地球の反射光スペクトル (大陸分布は5億年前のモデルを仮定) 雲を無視した場合 50%が雲に覆われている場合



1.5

Wavelength (μ m)

2.0

2.5

0.0

1.0



Sanroma et al. arXiv:1311.1145

系外地球における酸素、水、クロロフィルの検出可能性: パラメトリックモデル

- 系外地球の表面反射光スペクトルを近似 的にモデル化
 - 雲+分子の吸収線+レッドエッジ
 - ■将来の衛星観測での検出可能性
 - Fujii et al. (2010,2011)の「第二の地球の色」
 の分光バージョン
- "Prospects for detecting oxygen, water and chlorophyll in an exo-earth" T.D.Brandt & D.S.Spiegel: arXiv:1404.5337

地球型惑星スペクトルモデル(0.5-1.0µm)

$$\tau_{\lambda} = \sum_{\text{mol}} \tau_{\lambda,\text{mol}}$$
 (光学的厚さ:酸素、オゾン、水蒸気)
Rayleigh scattering above cloud scattering by clouds
 $\frac{F_{\text{refl}}}{F_{\star}} \approx \frac{\mathcal{R}_{\lambda}}{2} f_c e^{-\tau/4} + \left(1 - \frac{\mathcal{R}_{\lambda}}{2}\right) f_c c_{\lambda} e^{-\tau/2}$

 $+ \mathcal{R}_{\lambda} \left(1 - f_{c}\right) e^{-\tau/2} + \left(1 - \mathcal{R}_{\lambda}\right) \left(1 - f_{c}\right) \alpha_{\lambda} e^{-\tau}$

Rayleigh scattering above surface

scattering by surface

 $\begin{array}{ll} F_{refl}: reflected flux, & F_*: incident stellar flux\\ R_{\lambda}: Rayleigh scattering optical depth\\ f_c: cloud fraction, & c_{\lambda}: cloud albedo, & \alpha_{\lambda}: surface albedo\\ & Rayleigh scattering assumed to occur below\\ & half the available atmosphere \end{array}$

パラメトリックモデルスペクトル

Absorption lines



Rayleigh scattering terms

Red-edge due to chlorophyll (softened Heaviside)

$$H(\lambda) = [1 + \exp(80(0.72 - \lambda/\mu m))]^{-1}$$

R=1000でのベストフィットモデルの例



酸素、水、クロロフィルの検出確率



将来の衛星観測を用いた第二の地球の バイオマーカー検出可能性

■水は検出可能

■ 波長分解能 R>40 かつ各波長ビンでのS/N>5
 ■ 酸素の検出はより難しい

■ 波長分解能 R>150 かつ各波長ビンでのS/N>6

レッドエッジ検出は極めて困難

■ 雲が我々の地球に比べてはるかに少ない、あるいは植物に覆われている面積がはるかに大きい必要がある

太陽系外惑星: そのさきにあるもの "天文学から宇宙生物学へ"



 地球型ハビタブル惑星の発見
 水が液体として存在する地球型惑星
 バイオマーカーの提案と検出
 酸素、水、オゾン、植物、核爆発、、
 リモートセンシングの成否が鍵!
 惑星の放射・反射・吸収スペクトル を中心星から分離する

直接見に行くことができない系外惑星の表面組成・分布
 を天文観測だけでどこまで推定できるか
 レッドエッジは宇宙生物学に至る一つの道か?

予想もできない展開が待っているはず

■最初に起こるのはどれだろう

- ■地球外生物の痕跡の天文学的検出
- ■実験室での人工生物の誕生
- ■地球外文明からの交信の検出
- 地球文明の破滅(いったん発達した文明は、疫病、核戦争、資源の枯渇などの要因で不安定)

交信できるレベルまで安定に持続した 地球外文明の有無を知ることは、我々 の未来を知ることに等しい