

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 30 日現在

機関番号：11201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009 ～ 2012

課題番号：21740193

研究課題名（和文） 重力理論検証の視点での天文単位の永年変化問題の究明

研究課題名（英文） Investigation of secular increase in astronomical unit in terms of verification of gravitational theories

研究代表者

荒木田 英禎 (ARAKIDA HIDEYOSHI)

岩手大学・教育学部・特命研究科准教授

研究者番号：80413970

研究成果の概要（和文）：Krasinsky と Brumberg による惑星レーダーおよび惑星探査機の軌道解析データの解析に基づいて報告された 1 世紀あたり約 15 ± 4 メートルの天文単位の永年の変化問題を重力理論検証の視点で考察を行った。この問題解決のために、(a) 太陽系内ダークマター密度の時間変化を記述するアインシュタイン方程式の近似解を求めた、(b) 時間依存する時空内における光・信号の伝播を Synge の World function に基づく Time transfer function により計算する手法を示した、(c) 非一様宇宙モデルとして注目される LTB モデルに基づく惑星摂動力を求め、この惑星運動への効果を評価した、(d) 角運動量保存則に基づく天文単位の永年変化問題解決のシナリオを提案した。

研究成果の概要（英文）：We investigated the secular increase in astronomical unit reported by Krasinsky and Brumberg from the planetary radar and spacecraft orbital tracking data, 15 ± 4 m/century in terms of verification of gravitational theories. For this purpose, (a) we derived the approximate metric of Einstein's field equation which can describe the time variation of dark matter density in solar system, (b) we showed the method which can calculate the light/signal propagation in the time-dependent gravitational field by using the time transfer function based on Synge's world function, (c) we obtained the perturbation force due to inhomogeneous LTB model, and evaluated its effect on the planetary motion, and (d) based on the orbital angular momentum conservational law, we proposed new scenario to resolve the secular increase in astronomical unit.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合 計
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
2010 年度	800,000	240,000	1,040,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
2012 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
総 計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：位置天文学、天体暦、天文定数、重力理論、

1. 研究開始当初の背景

重力理論検証において太陽系内における高精度位置天文観測は重要な役割を果たし

ており、これまで行われてきた様々な検証実験によって一般相対論の正しさが示され、これまでのところ一般相対論が破れていると

いう事例は報告されていなかった。ところが近年、惑星レーダーや惑星探査機の軌道追跡データといった信号の往復時間の精密計測から「天文単位の永年的変化」という形で理論モデルと観測との間に有意な不一致が存在する事がロシアの Krasinsky と Brumberg (2004) によって報告された。ここでいう天文単位とは、太陽系内の惑星運動を表す際に用いられている天文単位系での長さの基本単位である 1 [AU] (大雑把には太陽と地球との平均距離) と通常我々が距離計測に用いている SI 単位系における長さの基本単位の 1 [m] との換算関係を与える天文定数の事である。この天文単位は定義定数ではなく観測から導かれる定数で、最新の値は $1 \text{ [AU]} = \text{AU [m]} = 1.495978706960 \times 10^{11} \pm 0.1 \text{ [m]}$ と 12 桁という精度にまで達している。

Krasinsky と Brumberg は月や惑星運動の暦(天体暦)と天文定数の精度改良を行なう過程で、データの組合せや推定すべきパラメータの種類をどのように選んだとしても、常に $d\text{AU}/dt > 0$ という天文単位が時間とともに変化するという結果となるという結論を得、最も妥当な推定値として $d\text{AU}/dt = 15 \pm 4 \text{ [m/世紀]}$ という値を得た。これが天文単位の永年的変化の発見である。これまで、この天文単位の永年的変化は様々な観点から説明が試みられたが、今のところ根本的な理由は全く分かっていない。だが、現在の天文単位の決定精度が 0.1 [m] である事を考えると $d\text{AU}/dt = 15 \pm 4 \text{ [m/世紀]}$ という値はこの決定制度のおおよそ 100 倍大きな値であり、何らかの重要な効果が見落とされている可能性が極めて高いと考えられ、特に重力の性質と何らかの関連性をもつ事が考えられる。

2. 研究の目的

これまでの多くの重力理論の検証実験ではアインシュタインの一般相対論と大きく矛盾する結果は得られていなかったが、天文単位の増加は現状の理論的枠組では説明できない明らかな理論と観測との有意な差であり、重力理論に関する深い示唆が現れている可能性がある。そこで本研究の目的は重力理論検証の視点からこの天文単位の永年的変化の要因を以下の観点で究明する事である：

- (1) 天文単位増加の問題は一般相対論(1 次のポスト・ニュートン近似)に基づく現在の観測モデルの定式化では説明が困難である可能性があり、何らかの一般相対論の破れに結び付いている可能性がある。したがって、より広範な重力理論に対する検証に結び付く可能性がある。よってこの問題を深く追求する事で、重力に対する我々の理解がさらに深まり、そ

の性質や本質にまた一歩近付く事が期待できる。

- (2) もし、一般相対論に対して修正を迫る結果が得られるならば、宇宙の加速膨張を引き起こしていると考えられるダークエネルギー/宇宙定数問題や、バリオンの約 6 倍は存在すると考えられているダークマター問題といった現代宇宙論における問題にも一石を投じる事が期待出来る。
- (3) 現在計画されている様々なスペースミッションによって期待されている超高精度観測データを正確に理解する上では、重力場内の信号伝播モデルの精密化はきわめて重要である。このような点から天文単位の永年的変化を説明し得る正確な信号伝播モデルの構築や計算技法の確立は今後の高精度天文観測データを正しく解釈する際の有益なツールを提供出来る。

3. 研究の方法

データ解析：数値積分コードと最小自乗法処理を含むデータ解析プログラムを構築し、ロシアの応用天文学研究所で開発された軌道決定プログラムである ERA-7 との精度検証を行い、データ解析環境を構築する。また、実際のパラメータ推定に用いるデータを収集し、統計処理や集約作業を完了する。そして、理論的に導出された信号伝播モデルに基づく光差方程式等をデータ独自の解析プログラムに組み込み、データタイプや観測時期によるデータ選別、推定するパラメータ数の調整等を行ない、天文単位の永年変化量の推定を行ない、どのような理論・効果が天文単位の増加を引き起こしているかを明らかにする。

理論：現在、国際天文学連合(IAU)が勧告している 1 次と 2 次のポスト・ニュートン近似に基づく DSX 形式での信号伝播モデルの構築を進め、観測的諸性質について考察する。そしてこの考察の結果を、構築したデータ解析プログラムに反映させる。また一般相対論の代替・拡張理論に対する考察を同時に進め、これら一般相対論の代替・拡張理論における光の伝播モデル系統的に詳しく調べ、観測的諸性質を明らかにするとともに、実際のデータ解析プログラムに順次組み込み、パラメータ推定に反映させ理論の検証を行なう。

4. 研究成果

- (1) ダークマターは今日の様々な観測から通常の物質(バリオン)の 6~7 倍の量が存在していると考えられている。しかし、その実体は今所明らかではない。もし、ダークマターが宇宙を構成する基本

要素であるならば、ダークマターは太陽系内にも存在すると考えるのが自然である。そして、この太陽系内のダークマター密度に時間変化が起これば、この密度変化にともなって重力も変化する事になるので、太陽系内の2点間を通過する光・信号の往復時間にゆっくりとした時間変化が生じると考えられる。したがって、ダークマター密度の時間変化は、今日観測から明らかになっている位置天文学的未解明現象の一つである「天文単位 of 永年変化問題」を説明出来る可能性がある。そこで、太陽系内ダークマターの密度変化によって天文単位 of 永年変化が説明できるかを考えるために、我々は太陽重力とダークマターが存在する場合のアインシュタイン方程式の近似解を導出した。その際、ダークマターの密度分布は時間と太陽からの距離の関数として球対称に分布すると仮定した。この近似メトリックに基づき、レーダー信号の時間遅れと信号の周波数シフトについて考察し、ダークマターが存在する場合の観測的な寄与を評価した。このダークマター密度の時間変化と天文単位 of 永年の変化との関係を調べた結果、惑星運動理論と矛盾しない現実的なダークマターの密度分布では、信号伝播への寄与は非常に小さく、報告された天文単位 of 永年の増加を説明できない事を示した。

- (2) 太陽系内の高精度位置天文観測データを解析する上で、重力場内の信号伝播モデルの精密化とその解析的計算技法の確立が必要である。通常は光のヌル測地線方程式を直接積分する事で解が求められるが、この方法では高次の相対論的效果をとり入れる場合や時空そのものが時間にあらわに依存する場合、ヌル測地線方程式を解く事は大変難しくなる。具体的には、時空のメトリックが時間に依存する場合、解くべき測地線方程式(微分方程式)の変数分離が困難なために解析的に解く事が出来ない。しかし最近、Le Poncin-Latte et al. (2004), Teyssandier and Le Poncin-Latte (2008) が Synge の World function を元にした Time transfer function に基づくアプローチを提案し、Schwarzschild 時空に応用する事で、通常用いられるヌル測地線方程式を直接計算する場合と比べ、特に2次以降の高次のポスト・ニュートン/ポスト・ミンコフスキー補正を含む場合の計算量が劇的に軽減される事を示した。彼らの定式化そのものはメトリックが時間に依存する場合を含めた一般的な表現が与えられてはいるも

の、実際に時間依存する場合の解を求めてはいない。我々はこの Time transfer function に基づく手法を時間依存する重力場内での光の伝播へ応用し、太陽系内の信号伝播において時間依存する宇宙論的效果による信号の時間遅れを正しく取り扱う事に成功した。時間依存する時空モデルとして Schwarzschild 時空と一様等方宇宙モデルである FLRW モデルを融合したような Robertson-McVittie モデルを採用し、この時空モデルと Time transfer function によるアプローチを用いて重力的束縛系における宇宙論的效果を考察した。特に、この時空内を伝播する光・信号の時間遅れに注目し、信号伝播における宇宙論的效果を正確に評価した。さらに、この結果を天文単位 of 永年変化へ応用し、宇宙膨張により引き起こされる時間遅れを正しく取り扱い、宇宙膨張による時間遅れは観測された天文単位 of 時間変化量 $dAU/dt = 15 \pm 4$ [m/世紀] に比べて約9桁小さい効果である事を示した。

- (3) 宇宙の加速膨張を説明する必要性から、重力に対する斥力的な効果を与えるダークエネルギーの存在が広く考えられているが、一方で、ダークエネルギーの導入なしに宇宙の加速膨張を説明しようという理論的な取り組みも行われている。その中で宇宙における物質分布の非一様性の立場に立つ事で説明できるとの指摘があり、その代表的なモデルに Lemaitre-Tolman-Bondi (LTB) 解がある。他方、極度に観測精度の高精度化が進んだ太陽系内においては Pioneer の異常加速問題を始めとして、天文単位 of 永年の変化等といった現在の標準的な理論的枠組みでは説明出来ない問題も浮上しており、これらの現象と宇宙論的效果との関連についても広く関心を集めている。そこで、非一様モデルである LTB 時空での粒子軌道を考察し、太陽系のように天体が重力的に束縛されている系においてこの LTB モデルに起因する宇宙論的效果の寄与やその観測可能性、天文単位 of 永年の変化を説明し得るかといった問題について、特に惑星軌道への影響に着目して調べた。その結果、LTB モデルにより得られるケプラー問題に対する摂動力は、一様等方モデルにより生じるよく知られた摂動力に加えて、非一様性により生じる新たな摂動力の存在を示した。しかし、この非一様性に起因する効果では天文単位 of 永年の変化は説明が困難であるとの結論に達した。
- (4) 我々は角運動量保存則に基づく地球・月

間の潮汐加速の理論を太陽・惑星系に適用する事で、天文単位の永年変化問題の1つの解決策を提案した。我々は太陽内部での何らかの潮汐相互作用の存在を仮定し、Krasinsky と Brumberg により報告された $dAU/dt = 15$ [m/世紀]の推定値を用いて、太陽の自転周期の変化を求めた。さらに、太陽の質量放出に伴う慣性モーメントの変化の寄与を調べ、特に、太陽系の内惑星領域のみで天文単位の増加が起きていると仮定した場合、これらの効果によって観測された天文単位の永年変化が説明可能である事を示した。天文単位は1 [m] と1 [AU] の間の距離の換算関係であるとともに、太陽の GM を特徴づける量と考える事も出来、これまでは太陽の GM は一定で変化しないという仮定で様々な天文定数が決定されてきた。しかし、我々の結論からは、今後の高精度観測データを考える場合、太陽の質量放出や慣性モーメントの変化の効果が観測的にも無視できない事を意味し、天文単位系のあり方や天体暦における寄与についても指摘した。

- (5) Ia 型超新星爆発の距離・光度関係の解析から、現在の宇宙が加速度的に膨張している事が明らかとなり、この加速膨張の原因として宇宙定数 Λ またはより一般的にダークエネルギーの存在が広く支持されているが、この宇宙定数またはダークエネルギーが一体どのようなものであるか、本当に宇宙に存在しているのかは明らかではなく、何らかの他の観測・実験によって検証する必要がある。最もナイブな方法は一般相対論の古典的検証実験である光の湾曲や天体軌道の近日点移動に対して宇宙定数 Λ がどのように寄与するかを調べる事である。しかしこれら一連の問題は古典的でありながらもまだ理論的な立場からも完全な決着に至っておらず、特に、光の湾曲への宇宙定数 Λ の寄与については、光に対する2階のヌル測地線方程式に Λ があらわに現れない事から、 Λ は光の曲がりには影響しないものと長らく考えられてきた。しかし最近になって、Rindler と Ishak (2007) による宇宙定数が光の湾曲に「寄与する」と主張する論文を皮切りに、それに続く多くの後続研究が Rindler たちの結果を支持する結論に達している。我々は宇宙定数 Λ の光の湾曲と宇宙論的なレンズ方程式への寄与を Schwarzschild-de Sitter (Kottler) 時空上におけるヌル測地線方程式を解くことによって再考察し、①宇宙定数 Λ は光の測地線方程式と光子軌道の双方に現れる事、②だが、 Λ の

寄与は impact parameter の定義に完全に吸収されるために、光の曲がり角の表式の形そのものはまったく変更されない事、さらに③重力レンズ効果において、 Λ の影響は angular diameter distance に完全に取り込まれるため、 Λ による宇宙論的レンズ方程式の表式の変更も生じない事を示した。

- (6) 宇宙定数 Λ の存在により誘発される近日点移動について再考察を行った。光に対する Λ の寄与と異なり、宇宙定数 Λ が近日点移動を引き起こす事は以前より知られていた。しかし、導かれる近日点移動量の公式が文献等によって2つ存在し、どちらの式が正当性のある式なのかははっきり決着がついていなかった。我々は Eddington や Rindler の教科書といった標準的なリテラチャーにおける導出には軌道を求める際の軌道離心率展開の扱いで不十分な点がある事を指摘すると共に、近年 Adkins and McDonnell (2007) や Ruggiero (2010) 等によって示された計算手法や結果が正しい事を指摘した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① H. Arakida (2013) Note on the perihelion/periastron advance due to cosmological constant, International Journal of Theoretical Physics, Vol. 52, 1408-1414, 査読有, DOI:10.1007/s10773-012-1458-2
- ② H. Arakida (2012), Effect of inhomogeneity of the Universe on a gravitationally bound local system: A no-go result for explaining the secular increase in the astronomical unit, Journal of Astrophysics and Astronomy, Vol. 33, 201-211, 査読有, DOI:10.1007/s12036-012-9142-8
- ③ H. Arakida, M. Kasai (2012), Effect of the cosmological constant on the bending of light and the cosmological lens equation, Physical Review D, Vol. 85, id 023006 (4 pages), 査読有, DOI:10.1103/PhysRevD.85.023006
- ④ H. Arakida (2011), Application of Time Transfer Function to McVittie Spacetime: Gravitational Time Delay and Secular Increase in Astronomical Unit, General Relativity and Gravitation, Vol. 43, 2127-2139, 査読有,

- DOI:10.1007/s10714-011-1170-1
- ⑤ H. Arakida (2010), Influence of dark matter on light propagation in solar system, *Advance in Space Research*, Vol. 45, 1007-1014, 査読有,
DOI:10.1016/j.asr.2009.11.012
- ⑥ T. Miura, H. Arakida, M. Kasai, S. Kuramata (2009), Secular Increase of the Astronomical Unit: a Possible Explanation in Terms of the Total Angular-Momentum Conservation Law, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol. 61, 1247-1250, 査読有,
<http://pasj.asj.or.jp/v61/n6/610607/610607a.html>

〔学会発表〕(計 11 件)

- ① 荒木田英禎, Note on the perihelion advance due to cosmological constant, 日本天文学会 2013 春季年年会, 埼玉大学(埼玉県), 2013 年 3 月 20 日-23 日
- ② H. Arakida, M. Kasai, Effect of the cosmological constant on the bending of light and the cosmological lens equation, *Resceu Symposium on General Relativity and Gravitation (JGRG22)*, Koshiba Hall, The University of Tokyo (東京都), 2012 年 11 月 12 日-16 日
- ③ 荒木田英禎, 葛西真寿, Λ で光は曲がるのか?: 光の湾曲とレンズ方程式に対する宇宙定数の影響, 日本物理学会 2012 年秋季大会, 京都産業大学(京都府), 2012 年 9 月 11 日-14 日
- ④ 荒木田英禎, 葛西真寿, Λ で光は曲がるのか?: 光の湾曲とレンズ方程式に対する宇宙定数の影響, 日本天文学会 2012 年春季年会, 龍谷大学(京都府), 2012 年 3 月 19 日-22 日
- ⑤ 荒木田英禎, 宇宙定数による光の湾曲, 第 24 回理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学の革新」, 国立天文台(東京都), 2011 年 11 月 5 日-7 日
- ⑥ H. Arakida, Effect of cosmological constant on light deflection, *The 21st Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan*, Tohoku University (宮城県), 2011 年 9 月 26 日-29 日
- ⑦ 荒木田英禎, 重力場内の光・信号の時間遅れ: Time Transfer Function によるアプローチ, 日本天文学会 2011 年秋季年会, 鹿児島大学(鹿児島県), 2011 年 9 月 19 日-22 日
- ⑧ 荒木田英禎, Time Transfer Function の Robertson-McVittie モデルへの応用, 京都大学基礎物理学研究所研究会/第 23

回理論懇シンポジウム「林忠四郎先生と天文学・宇宙物理学」, 京都大学 基礎物理学研究所(京都府), 2010 年 12 月 20 日-22 日

- ⑨ H. Arakida, Light propagation in time-dependent gravitational field, *The 20th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan*, YITP Kyoto University (京都府), 2010 年 9 月 21 日-25 日
- ⑩ 荒木田英禎, 時間依存する時空における光/信号伝播モデル 構築への試み, 日本天文学会 2010 年春季年会, 広島大学(広島県), 2010 年 3 月 24 日-27 日
- ⑪ H. Arakida, Cosmological Influence on Gravitationally Bound Local System: Case of Lemaitre - Tolman - Bondi Spacetime and its Application to Secular Increase of Astronomical Unit, *The 19th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan*, Rikkyo University(東京都), 2009 年 11 月 30 日-12 月 4 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

荒木田 英禎 (ARAKIDA HIDEYOSHI)
岩手大学・教育学部・特命研究科准教授
研究者番号: 80413970