

地球の公転周期に基づく太陽系近傍のダークマター密度への制限

長尾 桂子^{1,2)*}・谷川 諒¹⁾

1) 岡山理科大学理学部物理学科・応用物理学科

2) 岡山理科大学理工学研究科

(2024年10月31日受付、2024年11月20日受理)

概要

本研究では、地球の公転周期に基づいて、太陽系近傍のダークマター密度に対する制限を導出した。地球近傍のダークマター密度は、観測データやシミュレーションから $0.2 - 0.6 \text{ GeV/cm}^3$ と推定されている。しかし、局所的にダークマター密度が高いダークマターサブハローが太陽系近傍に存在する可能性もあると考えられ、その場合は重質量のダークマターによって、地球の公転周期が影響を受ける。我々は古典的な力学方程式に太陽系近傍のダークマターの影響を取り入れて計算し、現在の地球の公転周期から太陽系近傍のダークマター密度に $\rho_{DM}^{local} < 10^{15} \text{ GeV/cm}^3$ という制限が与えられることを示した。また、過去 6000 年間にわたって公転周期が不変であることから、太陽系がその間に通過した約 1.4 pc の範囲内には、ダークマター密度が $\rho_{DM}^{local} > 10^{15} \text{ GeV/cm}^3$ であるような高密度領域は存在しなかったことも明らかにした。これらの制限は、観測データやシミュレーションから推定されている太陽系近傍の暗黒物質密度に比べてはるかに高密度な場合に対するものではあるが、これらとは独立に地球の公転周期から与えられる制限である。

1. はじめに

さまざまな宇宙観測によって、宇宙全体のエネルギー密度の約 27% は、バリオンではなくダークマター（暗黒物質）と呼ばれる物質によって占められていることが明らかになった [1]。ダークマターが存在する証拠は重力的な効果を通じて示されているが、その正体は不明なままであり、素粒子論的、天文学的な多くの候補が存在する。また、宇宙論的シミュレーションの発展によって、宇宙の大規模構造の形成に暗黒物質が主要な役割を果たしたことも明らかになっている。

地球近傍の暗黒物質の存在量は、暗黒物質の直接検出実験の結果の評価に影響するという点でも重要である。暗黒物質は自ら光っておらず、直接観測することができない。そのため、地球周辺の暗黒物質の密度 ρ_{local} を観測データから動力学的に推定する手法や、宇宙論的シミュレーションによって評価する手法が広く研究されてきた。近年の推定では、観測からは $\rho_{local} = 0.2 - 0.6 \text{ GeV/cm}^3$ [2,3,4]、宇宙論的シミュレーションからは $\rho_{local} = 0.2 - 0.4 \text{ GeV/cm}^3$ [5,6] 程度と見積もられる。一方で、宇宙論的シミュレーションからは、ダークマターサブハローやストリーム、デブリフローなどの小規模なサブ構造の存在が示唆されている。このようなサブ構造が太陽系に存在する場合には、ダークマター密度や速度分布が周囲に比べて局所的に変わると考えられる。本研究では、特に地球周辺の局所的なダークマター密度について、地球の公転周期から得られる制限を考察する。

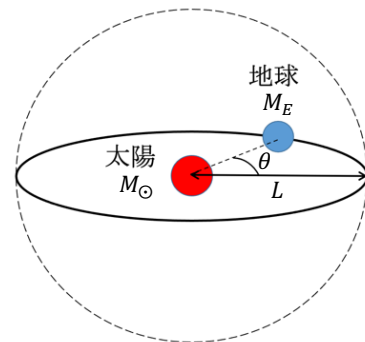


図 1: 地球の公転

1-1 地球の公転周期

地球は太陽の周りを公転しているため、地球の公転周期から太陽の質量を推定することができる。まず、太陽系に存在する暗黒物質の質量密度が、太陽や地球などの天体と比べて無視できるほど小さい場合を考え

よう．簡単のため，地球の公転は円運動で近似できるとする．太陽から地球への力は，円運動の向心力または万有引力で表すことができるため，

$$M_E L \dot{\theta}^2 = G \frac{M_\odot M_E}{L^2} \quad (1)$$

という関係が成り立つ．ただし， M_E は地球の質量， L は太陽と地球の距離， $\dot{\theta}$ は地球の公転の角速度， G は万有引力定数， M_\odot は太陽の質量である．式(1)より，地球の公転周期 T は太陽質量 M_\odot を用いて

$$T = \sqrt{\frac{4\pi^2 L^3}{G M_\odot}} \quad (2)$$

と表せる．また同様に，式(1)より，太陽質量 M_\odot は地球の公転周期 T を用いて

$$M_\odot = \frac{4\pi^2 L^3}{G T^2} \quad (3)$$

と表すことができる．(3)に $L = 1.496 \times 10^{11} \text{ m}$ ， $G = 6.6726 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg} \cdot \text{s}^2$ ， $T = 365.25636 \text{ 日}$ [7,8]を代入すると， $M_\odot = 1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$ と太陽の質量を求めることができる．以下では，太陽系近傍でダークマターの影響が無視できる場合の太陽質量を $M_{\odot 0} = 1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$ とおく．

実際には，太陽系には銀河系に付随するダークマターハローが存在する．簡単のため，太陽系近傍のダークマターは密度 ρ_{DM}^{local} で一様に分布しているとする．地球の公転軌道より内側に存在するダークマターの質量 \bar{M} は，

$$\bar{M} = \frac{4}{3} \pi L^3 \rho_{DM}^{local} \quad (4)$$

と表せる．地球の公転軌道より内側に存在する全ダークマターが，公転軌道の中心にある質量 \bar{M} の質点と近似できるとすると，式(1)は以下のように書き換えられる．

$$M_E L \dot{\theta}^2 = G \frac{(M_\odot + \bar{M}) M_E}{L^2} \quad (5)$$

このことから，太陽系近傍のダークマターの寄与を考慮すると，式(2)と式(3)は以下のように表せる．

$$T = \sqrt{\frac{4\pi^2 L^3}{G \left(M_\odot + \frac{4}{3} \pi L^3 \rho_{DM}^{local} \right)}} \quad (6)$$

$$M_\odot = \frac{4\pi^2 L^3}{G T^2} - \frac{4}{3} \pi L^3 \rho_{DM}^{local} \quad (7)$$

1-2 地球の公転周期

現在知られている地球の公転周期は，365.25日である．1年間が約365日であることは，紀元前4000年頃からいくつかの古代文明で知られていた．表1に，代表的な古代文明での1年間の長さについての記録を示す．これらの記録から，少なくとも紀元前4000年から現在までの約6000年間は地球の公転周期は約365日で，ほぼ一定であったと考えられる．地球近傍のダークマターの密度が非常に高い場合には公転周期に影響するため，最近6000年間は，公転周期に影響を及ぼすほどダークマター密度が高い領域を地球が通過することはなかったといえる．この具体的な制限については，3章で詳述する．

表1: 古代文明の記録に記された，1年間の時間についての記録

地域	時代	暦	1年間の長さ	文献
メソポタミア	紀元前4000年頃	太陰太陽暦	360日または390日	[9]
エジプト	紀元前3000年頃	太陽暦	365日	[10]
古代中国	紀元前1600年頃	太陰太陽暦	354日	[9]

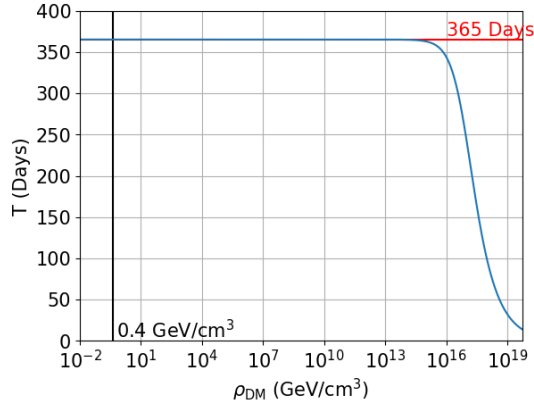


図 2: 地球の公転周期と太陽系近傍のダークマター密度

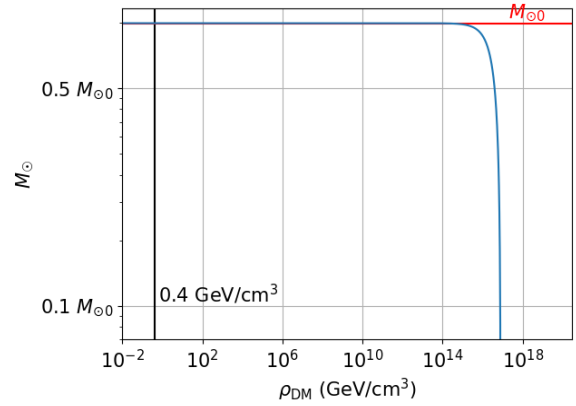


図 3: 太陽質量と太陽系近傍のダークマター密度

2. 地球の公転周期によるダークマター密度への制限の導出

式(6)と式(7)から、公転周期と太陽質量へのダークマターサブハローの影響を評価する。式(6)から求めた、太陽系近傍のダークマター密度と地球の公転周期の関係を図 2 に示す。観測データやシミュレーションから得られている太陽系近傍のダークマター密度 $\rho_{DM}^{local} = 0.2 - 0.6 \text{ GeV/cm}^3$ の場合には、太陽系内のダークマターが地球の公転周期に及ぼす影響は無視できることがわかる。また、地球の公転周期が 365.25 日であることから、現在の太陽系近傍の暗黒物質密度に対して $\rho_{DM}^{local} < 10^{15} \text{ GeV/cm}^3$ という制限を与えることができる。式(7)から、太陽質量と地球の公転周期の関係が図 3 のように示される。公転周期と同様に、 $\rho_{DM}^{local} = 0.2 - 0.6 \text{ GeV/cm}^3$ の場合には、太陽質量の見積もりにダークマター質量は影響しない。また上記のように、太陽系近傍の暗黒物質密度は $\rho_{DM}^{local} < 10^{15} \text{ GeV/cm}^3$ であるため、太陽質量の評価が M_{\odot} から大きくずれることはない。

さらに、1 年の長さに関する過去の記録から、太陽系の軌道における暗黒物質密度への制限を導出することができる。表 1 から、過去 6000 年間は地球の公転周期はほぼ不変であったことがわかる。太陽系は銀河系内を約 230 km/s の速度で運動している [11] ため、6000 年間で太陽系は約 1.4 pc 移動している。この間、少なくとも太陽系が通過した約 1.4 pc の範囲の近傍のダークマター密度は 10^{15} GeV/cm^3 より十分小さかったと考えられる。

3. 結論と考察

本研究では、太陽系近傍のダークマター密度による地球の公転周期や太陽質量の評価への影響を考察した。古典的な力学方程式からダークマターによる影響を見積もった結果、観測およびシミュレーションから推定される太陽系近傍のダークマター密度 $\rho_{DM}^{local} = 0.2 - 0.6 \text{ GeV/cm}^3$ 程では、地球の公転周期への影響は無視できることを示した。また、地球の公転周期から、現在太陽系が局地的に高密度のダークマターサブハロー内に存在するとしても、その密度は $\rho_{DM}^{local} < 10^{15} \text{ GeV/cm}^3$ でなければならないことも明らかにした。さらに、約 6000 年間にわたって公転周期が一定であることから、少なくともこの期間、太陽系は $\rho_{DM}^{local} > 10^{15} \text{ GeV/cm}^3$ であるような高密度のダークマター領域を通過していないと考えられる。宇宙論的シミュレーションから示唆されるサブハローのダークマター密度は、サブハローのサイズが 100 pc 以内では $\rho_{DM}^{local} = 15.19 - 94.92 \text{ GeV/cm}^3$ 、10 pc 以内では $\rho_{DM}^{local} = 2.7 \times 10^2 - 1.7 \times 10^3 \text{ GeV/cm}^3$ 程度である [12]。本研究で得られた高密度ダークマターサブハローに対する制限はこれらよりもはるかに高い密度のサブハローに対する制限であるものの、観測やシミュレーションとは独立に太陽系近傍のダークマター密度に与えられる制限を示した。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 21K03562, 21K03583, 24K07061, 24H02244 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] N. Aghanim et al. [Planck], “Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters,” *Astron. Astrophys.* **641**, A6 (2020), doi:10.1051/0004-6361/201833910, [arXiv:1807.06209 [astro-ph.CO]].
- [2] R. Catena and P. Ullio, “*A novel determination of the local dark matter density*,” *JCAP* **08**, 004 (2010), doi:10.1088/1475-7516/2010/08/004, [arXiv:0907.0018 [astro-ph.CO]].
- [3] P. F. de Salas and A. Widmark, “*Dark matter local density determination: recent observations and future prospects*,” *Rept. Prog. Phys.* **84**, no.10, 104901 (2021), doi:10.1088/1361-6633/ac24e7, [arXiv:2012.11477 [astro-ph.GA]].
- [4] J. I. Read, “*The Local Dark Matter Density*,” *J. Phys. G* **41**, 063101 (2014), doi:10.1088/0954-3899/41/6/063101, [arXiv:1404.1938 [astro-ph.GA]].
- [5] M. Zemp, J. Diemand, M. Kuhlen, P. Madau, B. Moore, D. Potter, J. Stadel and L. Widrow, “*The Graininess of Dark Matter Haloes*,” *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **394**, 641-659 (2009), doi:10.1111/j.1365-2966.2008.14361.x, [arXiv:0812.2033 [astro-ph]].
- [6] Markus Weber, Wim de Boer, “*Determination of the Local Dark Matter Density in our Galaxy*,” *Astron. Astrophys.* 509:A25, (2010), arXiv:0910.4272
- [7] 国立天文台 (編), 理科年表 2021 机上版 (第 94 冊), 丸善出版 (2020)
- [8] Peter Duffett-Smith, “*Practical Astronomy with Your Calculator*,” Cambridge University Press (1979)
- [9] J. M. Steele, “*Living with a Lunar Calendar in Mesopotamia and China*,” *Living the Lunar Calendar*, (2012) 373-387
- [10] B. C. Martin, “*A HISTORICAL REVIEW OF THE EGYPTIAN CALENDARS: THE DEVELOPMENT OF TIME MEASUREMENT IN ANCIENT EGYPT FROM NABTA PLAYA TO THE PTOLEMIES*,” *Scientific Culture* **1** (2015) 3
- [11] R. A. Burns, Y. Yamaguchi, T. Handa, T. Omodaka, T. Nagayama, A. Nakagawa, M. Hayashi, T. Kamezaki, J. O. Chibueze, M. Shizugami, and M. Nakano, “*VLBI observations of H₂O maser annual parallax and proper motion in IRAS 20143+3634: Reflection on the Galactic constants*,” *PASJ* **66** (2014) 6
- [12] J. Diemand, M. Kuhlen, P. Madau, M. Zemp, B. Moore, D. Potter, and J. Stadel, “*Clumps and streams in the local dark matter distribution*,” *Nature* **454** (2008) 7205, [arXiv:0805.1244v2[astro-ph]].

Constraints on Local Dark Matter Density Based on Orbital Period of Earth

Keiko I. Nagao^{1,2)*}, and Ryo Tanigawa²⁾

*1) Department of Applied Physics, Faculty of Science,
Okayama University of Science,*

1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama 700-0005, Japan

*2) Graduate School of Science and Engineering,
Okayama University of Science,*

1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama 700-0005, Japan

(Received October 31, 2024; accepted November 20, 2024)

We derive constraints on the local dark matter density based on the Earth's orbital period. The local dark matter density is estimated to be $0.2 - 0.6 \text{ GeV/cm}^3$ from observational data and simulations. However, dark matter subhaloes with locally high density can exist near the solar system, in which case the Earth's orbital period would be affected. We estimate the effect of dark matter in the solar system with the classical dynamical equations and show that the current orbital period of the Earth places a constraint on the local dark matter density $\rho_{DM}^{local} < 10^{15} \text{ GeV/cm}^3$. In addition, since the orbital period has been almost constant for the past 6000 years, we conclude that there was no high-density region with a dark matter density $\rho_{DM}^{local} > 10^{15} \text{ GeV/cm}^3$ within about 1.4 pc that the solar system has passed through during that period. These constraints are for much denser cases than the dark matter density estimated from observations and simulations, however, it is an independent constraint from them.

Keywords: dark matter; Earth's revolution; dark matter density; Solar mass.