

由修正引力公式导出的星系旋转速度与暗物质无关

陈军利

西北工业大学电子信息学院, 陕西 西安

收稿日期: 2023年12月10日; 录用日期: 2024年1月10日; 发布日期: 2024年1月19日

摘 要

物质由核子(质子和中子的统称)构成, 每个核子都发出大量的引力子, 星球内部核子发出的引力子被星球内部其他核子吸收, 形成星球内部的凝聚力, 星球壳层的核子发出的引力子有一部分发射到球外, 以引力能量波的形式传播形成引力场, 当引力能量波遇到引力场中其他星球的核子时, 与其发生共振形成能量转移, 此时引力子被其遇到的核子吸收形成引力。引力由星球壳层核子发射到球外的引力子多少决定, 而引力子多少与星球表面积成正比, 因此星球的引力与星球的表面积成正比, 万有引力公式中引力与星球质量成正比, 在星球和星系中只是一种近似。一般的星系都是盘状结构, 在星系旋转速度模拟中, 星系中的星球受到的引力与盘状结构的侧面积相关, 本文在此分析的基础上, 推导和计算了星系的旋转速度 $V = (0.5G\rho H)^{0.5}$, 说明星系的旋转速度与星系中星球距离星系中心的距离无关, 与星系盘的厚度相关, 对于特定的星系, 星系旋转速度是基本恒定的, 同时也说明了在星系旋转速度中不需要暗物质的参与。对于存在旋臂的螺旋星系和棒旋星系, 星系的旋转速度会随旋臂出现上下波动; 对于像太阳系这样的少星星系, 本文结论不适用。对于不同星系的旋转速度, 除与星系盘的厚度有关外, 应该还与星系物质密度有关。

关键词

引力子, 暗物质, 星系旋转速度, 引力公式

The Rotation Speed of Galaxies Derived from the Modified Gravity Formula Is Independent of Dark Matter

Junli Chen

School of Electronic and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi

Received: Dec. 10th, 2023; accepted: Jan. 10th, 2024; published: Jan. 19th, 2024

文章引用: 陈军利. 由修正引力公式导出的星系旋转速度与暗物质无关[J]. 天文与天体物理, 2023, 11(4): 41-55.
DOI: 10.12677/mp.2023.114004

Abstract

Matter is composed of nucleons (the collective name for protons and neutrons). Each nucleon emits a large number of gravitons. The gravitons emitted by the nucleons inside the planet are absorbed by other nucleons inside the planet, forming cohesion within the planet. The nucleons emitted by the planet's shell. Some of the gravitons are emitted outside the ball and propagate in the form of gravitational energy waves to form a gravitational field. When the gravitational energy waves encounter the nuclei of other planets in the gravitational field, they resonate with them to form energy transfer. At this time, the gravitons are encountered by them. The nucleon absorption forms the gravitational force. Gravity is determined by the number of gravitons emitted from the core of the planet's shell to the outside of the ball, and the number of gravitons is proportional to the surface area of the planet. Therefore, the gravity of the planet is proportional to the surface area of the planet. In the formula of universal gravitation, gravity is proportional to the mass of the planet. In the planet and Galaxy is only an approximation. Generally, galaxies have a disk-shaped structure. In the simulation of the rotation speed of the galaxy, the gravitational force exerted by the planets in the galaxy is related to the side area of the disk-shaped structure. Based on this analysis, this article deduces and calculates the rotation speed of the galaxy $V = (0.5G_D H)^{0.5}$, indicating that the rotation speed of a galaxy has nothing to do with the distance between the planets in the galaxy and the center of the galaxy, but is related to the thickness of the galaxy disk. For a specific galaxy, the rotation speed of the galaxy is basically constant. It also shows that dark matter does not need to be involved in the rotation speed of the galaxy. For spiral galaxies and barred spiral galaxies with spiral arms, the rotation speed of the galaxy will fluctuate up and down with the spiral arms; for galaxies with few stars like the solar system, the conclusion of this article does not apply. As for the rotation speed of different galaxies, in addition to being related to the thickness of the galactic disk, it should be related to the density of the galaxy's matter.

Keywords

Graviton, Darkmatter, Galaxyrotation Speed, Gravitational Formula

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 暗物质和牛顿修正动力学学说(MOND)

暗物质[1]是理论上提出的可能存在于宇宙中的一种不可见的物质。大量天文学观测中发现的疑似违反牛顿万有引力的现象可以在假设暗物质存在的前提下得到很好的解释。天文学家卡普坦于 1922 年提出可以通过星体系统的运动间接推断出星体周围可能存在的不可见物质。1933 年,天体物理学家兹威基利用光谱红移测量了后发座星系团中各个星系相对于星系团的运动速度。利用位力定理,他发现星系团中星系的速度弥散度太高,仅靠星系团中可见星系的质量产生的引力是无法将其束缚在星系团内的,因此星系团中应该存在大量的暗物质。史密斯在 1936 年对室女座星系团的观测也支持这一结论。1939 年,天文学家巴布科克通过仙女座大星云的光谱研究,显示星系外围的区域中星体的旋转运动速度远比通过开普勒定律预期的要大,对应于较大的质光比。1940 年奥尔特对星系外围区域星体运动速度的研究,指出其总质光比可达 250。1959 年凯恩和沃特研究了彼此吸引的仙女座大星云和银河系之间的相对运动,通过相互它们靠近的速度和彼此间的距离,推论出我们人类所处的本星系团中的暗物质比可见物质的质量约大十倍。1970 年鲁

宾和福特对仙女座大星云中星体旋转速度做了研究,利用高精度的光谱测量技术,他们可以探测到远离星系核区域的外围星体绕星系旋转速度和距离的关系。按照牛顿万有引力定律,如果星系的质量主要集中在星系核区的可见星体上,星系外围的星体的速度将随着距离而减小。但观测结果表明在相当大的范围内星系外围星体的速度是恒定的。1973 年罗伯兹和罗兹运用 21 厘米特征谱线观测技术探测仙女座大星云外围气体的速度分布,也从另一角度证实了这一结论。1980 年后,出现了一大批支持暗物质存在的新观测数据,包括观测背景星系团时的引力透镜效应,星系和星团中炽热气体的温度分布,以及宇宙微波背景辐射的各向异性等。星系旋转曲线描述了漩涡星系中可见天体的环绕速度和其距离星系中心距离的关系。根据对漩涡星系中可见天体质量分布的观测以及万有引力定律的计算,靠外围的天体绕星系中心旋转的运动速度应当比靠中心的天体更慢。然而对大量漩涡星系旋转曲线的测量表明,外围天体的运行速度与内部天体近乎相同,远高于预期。这暗示着这些星系中存在着质量巨大的不可见的物质。结合位力定理,可以通过星系中可见天体的弥散速度分布计算出星系中的物质分布。这种方法同样适用于测量椭圆星系和球状星团的物质分布。结果表明,除个别以外,大部分星系和星团的物质分布都与观测到的可见物质的分布不符。通过暗物质的提出历史可以看出暗物质的实质是星系的旋转速度与万有定律计算的结果不符,按照经典万有定律推算,距离星系的中心越远,星系的旋转速度应该越慢,而观测结果显示星系旋转速度基本是恒定的,现在对形成这个现象的主流解释是宇宙空间存在大量的暗物质。

暗物质研究的最直接办法就是探测暗物质粒子[2] [3] [4] [5],欧洲大型强子对撞机和所有的加速器实验还没有发现暗物质粒子的迹象。地下直接探测实验国际上已进行了数十年。中意合作 DAMA 实验发现了时间调制现象,该现象可以解释地球绕太阳公转的原因。2009 年 12 月 18 日,CDMS 地下实验项目组宣布,所发现的 2 个事件可能与暗物质粒子有关。CDMS 所用的探测器被埋在美国明尼苏达深达 700 米的地下,周围的岩石、塑料、铅、铜和其他物质被用来阻止除了暗物质之外的正常微粒到达探测器,这样可能与暗物质相混淆的宇宙射线和其他粒子就被排除在外了。目前国际上大约有几十个科学小组在设计实验以期发现暗物质接近普通物质原子的那一刻产生的信号,其中 XENON100 的实验是灵敏度最高的,但公布的最新观测结果是没有发现暗物质粒子存在的迹象。最新空间间接探测试验结果主要来自于 FERMI 伽马射线望远镜, PAMELA 空间探测器,ATIC 南极气球实验等。2009 年 3 月 FERMI 卫星公布其一年半的观测数据,经伽马射线谱线探测,背景分布方面没有探测到任何明显信号与暗物质粒子有关。另外在电子观测方面 ATIC、PAMELA、FERMI、HESS 几个探测器发现电子观测数据与理论模型相比都存在“超”,但“超”的大小并不一致。反质子观测方面, PAMELA 上天 3 年,观测到的反质子能谱基本与宇宙线次级能谱吻合很好,没有探测到异常特征。自上世纪 80 年代以来,人们进行了许多暗物质探测实验,但迄今还未能探测到暗物质。

天文学家对观测到的与牛顿定律不符的另一个解释是牛顿修正动力学学说(MOND) [6] [7] [8], 1983 年由米尔格龙提出的经修改的牛顿动力学是在微小的加速度尺度——大约为 10^{-10} m/s^2 上巧妙地修改了牛顿定律。他假定当万有引力的强度(重力加速度的大小)比较大时,物体受到的引力可以用牛顿万有引力的公式描述,但是当其减弱到一定程度时,则偏离标准的牛顿动力学。具体地说,我们所熟悉的物体运动定律是牛顿第二运动定律 $F = ma$, 即物体加速度乘以质量等于力。他把这一定律改为

$$F = m\mu(a/a_0)a \quad (1)$$

这里 a_0 是一个理论中的新常数,修正因子 $\mu(a/a_0)$ 是 a/a_0 的一个函数,满足 $\mu(x \gg 1) \approx 1$, $\mu(x \ll 1) \approx x$ 。也就是说,在较大的重力加速度下这个修正因子趋于一个常数,与平常的牛顿定律一致。但当重力加速度减小到一定程度时,加速度与力之间就有一个更复杂的关系。有了这一修正因子,就可以得到

$$a^2 \approx a_N a_0 \approx \frac{GMa_0}{r^2} \quad (2)$$

这里 a_N 是按牛顿万有引力公式算出的引力加速度, 而 a 则是米尔格罗姆理论给出的加速度。代入圆周运动的加速度为 $a = v^2/r$, 就得到

$$v^2 = ra \approx (GMa_0)^{1/2} \text{ 或 } v^4 \approx GMa_0 \quad (3)$$

即在远离中心处旋转速度趋于常数。根据对星系的观测, 可得到上式中加速度常数的数值约为 $a_0 \approx 1.2 \times 10^{-8} \text{ cm s}^{-2}$ 。2002 年, 另一位以色列物理学家贝肯斯坦构造出了一种既满足相对论、又能产生 MOND 行为的理论。在广义相对论中, 描写时空弯曲的是所谓度规张量, 而在这一理论中, 引入了一个新的张量场、一个矢量场、一个标量场, 以及一个辅助(非动力)标量场, 通常的时空度规张量则由这几个量共同决定, 因此被简称为张量-矢量-标量(TeVeS)理论, 但是这个理论由于引入了多种场, 其复杂程度超过一般的暗物质模型。后来, 两位捷克科学院的理论物理学家康斯坦丁斯·斯科迪斯和汤姆·兹沃什尼克, 在 TeVeS 的基础上, 又构造了一种新的理论, 称之为相对论 MOND(RMOND)理论。这一理论中引入了一个具有复杂的相互作用的矢量场和两个辅助标量场。还有学者提出牛顿修正动力学理论(MOND)的模型则假设来自于其他星系的引力作用会对星系外围的恒星产生干扰, 改变其惯性质量, 这就导致了它们比理论上的公转速度要快得多。目前的各种牛顿修正动力学学说(MOND), 都还存在各种问题, 不能成为一个理想的引力理论。

2. 星系旋转速度和星系的模型

星系[9][10]是构成宇宙的基本单位, 它包含恒星、气体、宇宙尘埃和暗物质, 并且受到重力的束缚。典型的星系如图 1, 从只有数千万颗恒星的矮星系, 到有上兆颗恒星的椭圆星系都有, 它们都环绕着一个质量中心运转。除了单独的恒星和稀薄的星际物质之外, 大部分的星系都有数量庞大的多星系统、星团以及各种不同的星云。在可观测宇宙中, 星系的总数可能达到一千亿个(10^{11})以上。大部分星系直径介于 1,000 至 10,000 秒差距, 彼此之间距离则是百万秒差距的数量级。星系大小差异很大。椭圆星系直径在 3300 光年到 49 万光年之间; 漩涡星系直径在 1.6 万光年到 16 万光年之间; 不规则星系直径大约在 6500 光年到 2.9 万光年之间。星系的质量一般在太阳质量的 100 万到 1 兆倍之间。星系内部的恒星在运动, 而星系本身也在自转, 整个星系也在空间运动。最普通的是椭圆星系: 它们有着椭圆形状的明亮外观; 漩涡星系是圆盘形状加上弯曲的旋涡臂; 不规则星系, 通常都是受到邻近的其它星系影响的结果。星系的结构可以分为三个主要部分: 中心区域、盘状结构和外围区域。中心区域通常被称为星系核, 它是星系中最亮的区域, 包含了大量的恒星和黑洞。核心区域的形态多样, 有些星系核呈现出明亮而紧凑的核球状结构, 而另一些则呈现出扁平的盘状结构。盘状结构是星系中最显著的特征之一, 它由大量的恒星、气体和尘埃组成。盘状结构通常呈现出旋转对称的形态, 类似于一个扁平的圆盘。盘状结构可以进一步



Figure 1. Disc-shaped galaxy

图 1. 盘状星系

分为两个部分：星盘和气体盘。星盘主要由恒星组成，而气体盘则主要由气体和尘埃组成。气体盘中的气体和尘埃会通过引力作用逐渐聚集形成新的恒星。

星系旋转速度曲线[11]-[16]是描述星系内部物质运动的曲线，它展示了星系中不同半径处物质的旋转速度。通过测量星系内不同区域的气体或恒星的旋转速度分布，我们可以绘制出星系的旋转速度曲线。上世纪 70 年代，人们观测了银河系和很多其它星系的旋转曲线如图 2，图 3，也就是到星系中心不同距离处的恒星或气体的旋转速度值。根据传统的牛顿引力理论，恒星或气体的旋转速度应该与它们受到的引力有关，星系中心的恒星密度较高，而越到边缘其恒星密度越低，再加上离中心距离更远，因此距离中心越远处受到引力应该越低，那么其旋转速度也应该越慢。但是，实际观测的结果并非如此，星系旋转曲线大多趋于一个常数，这就是所谓的“平坦旋转曲线”。甚至，人们使用射电望远镜还可以观看星系的旋转气体，在星系中这些气体的分布范围比恒星所形成的盘要大不少，因此可以看到这些气体所处的边缘已经几乎没有恒星了，而且这些气体本身的量也不多，按理说这里的引力应该下降了，但是这些气体的转速仍然未见下降。

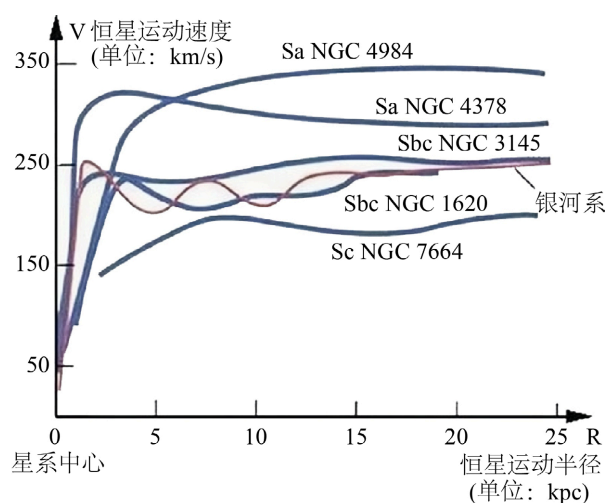


Figure 2. Rotation velocity curve of neighboring galaxies 1

图 2. 临近星系的旋转速度曲线 1

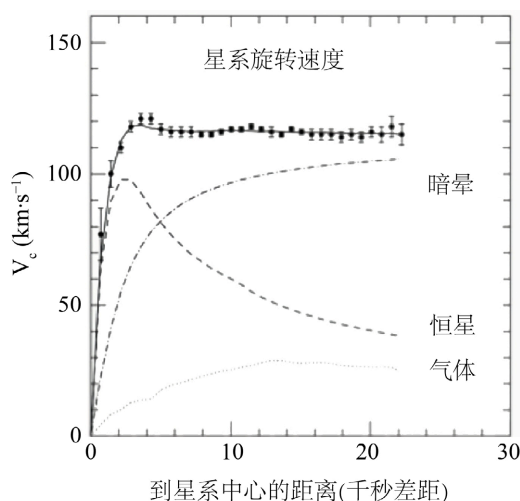


Figure 3. Rotation velocity curve of neighboring galaxies 2

图 3. 临近星系的旋转速度曲线 2

3. 偏转引力理论和修正引力公式下的星系旋转速度

3.1. 偏转引力理论简介

偏转引力理论[17] [18] [19]认为质量的基本单位为核子(质子、中子的统称), 每个核子单位时间都发出大量引力子, 对于星球, 星球内部的核子发出的引力子与星球内部其它核子发生作用, 形成星球内部的凝聚力, 星球外层的核子发出的引力子, 部分发往球外并分散在星际空间, 引力子在空间以引力能量波的形式传播形成引力场, 当引力能量波中的引力子遇到其它星球的核子时, 与其发生共振, 引力子被其它核子吸收, 形成引力。每个引力子都携带能量 h (普朗克常数)。

偏转引力理论根据共振原理推断, 引力能量波的波长 λ 等于核子的直径(半径为 r_0)。

$$\lambda = 2r_0 = 1.6 \times 10^{-15} \text{ m} \quad (4)$$

引力能量波在空间的传输速度为光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ m}$, 则引力能量波的频率为:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8}{1.6 \times 10^{-15}} = 1.875 \times 10^{23} \text{ hz} \quad (5)$$

周期为

$$T = \frac{1}{f} = 5.33 \times 10^{-24} \text{ s} \quad (6)$$

偏转引力理论认为引力能量波每个波包携带的能量为普朗克常数 h , 相邻两核子交换的能量就是核子的结合能[20], 计算两核子单位时间交换的能量, 可以确定核子单位时间 1 s 内发出的引力子数量为:

$$n_{ng} = 6.318 \times 10^{21} \quad (7)$$

通过对球外引力子数量的计算[21], 说明能够发射到球外的核子壳层厚度为:

$$r_{so} = \frac{k_{s\rho}}{\rho_s} \quad (8)$$

$$k_{s\rho} = 22956 \quad (9)$$

星球发射到球外的引力子数为:

$$n_{go} = k_{sr} r_s^2 \quad (10)$$

$$k_{sr} = 2.514 \times 10^{54} \quad (11)$$

偏转引力理论认为, 星球之间的引力与星球之间交换引力子的数量成正比, 而球外引力子数量与星球表面积成正比, 因此, 星球之间的引力应该与星球的表面积成正比。对于球状星体 1 与球状星体 2 相距 R 时, 球状星体 2 单位面积接收的球状星体 1 引力子数量为 $1/4\pi R^2$, 因此牛顿万有定律应该修改为:

$$F = G_s \frac{S_1 S_2}{R^2} \quad (12)$$

设星球 1 的半径为 r_1 , 星球 2 的半径为 r_2 , 引力公式也可以表示为:

$$F = G_r \frac{r_1^2 r_2^2}{R^2} \quad (13)$$

3.2. 星系和星系中星球的引力和旋转速度

我们计算星系的旋转速度, 是计算星系中可视星球的旋转速度, 图 4 中, 星球 S_2 为我们计算速度

的可视星球，其质量为 m_2 ，半径为 r_2 。星系一般都是扁平盘装结构，我们将星球 S_2 以内的星系 G_1 等效为一个高度很小的柱体，柱体的半径 r_1 就是星系的半径，柱体的高度 H 就是星系的厚度。星球 S_2 与星系中心 G_1 的距离为 R 。

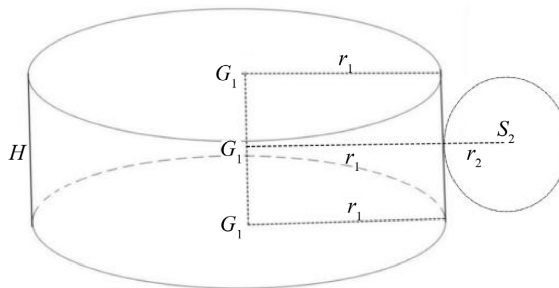


Figure 4. Schematic diagram of gravitational action in the galaxy 1

图 4. 星系引力作用示意图 1

对于盘状星系，可以将星系看成一个厚度为 H (盘面厚度) 的圆柱，相对于星系中的星球 2，它的引力作用面为：

$$S_1 = 2\pi r_1 H \quad (14)$$

星系中我们要计算速度的球状星体 2，相对于星系来说，可以看成小星球，这里我们继续用其质量 m_2 计算引力，这样

星球 S_2 受到星系 G_1 之间的引力为：

$$F_2 = G_s \frac{2\pi r_1 H \cdot m_2}{4\pi R^2} = G_s \frac{r_1 H \cdot m_2}{2R^2} \quad (15)$$

星球之间的引力提供了星球绕星系旋转的向心力：

$$F_2 = m_2 \frac{v_2^2}{R} \quad (16)$$

$$v_2 = \sqrt{G_s \frac{r_1 H \cdot m_2}{2R^2} \frac{R}{m_2}} = \sqrt{G_s \frac{r_1 H}{2R}} \quad (17)$$

当 R 为 0 时，星系的半径 r_1 为 0，星系的盘面高度 H 也为 0，当 R 增加时，由于 $r_1 = R - r_2$ ， r_1 也增加，盘面厚度 H 增加，当 R 增加到一定程度后，盘面厚度达到标准盘面厚度 $H_{\max}$ ，随后 H 不在增加成为恒定值，在 R 增加过程中，一般的 $r_1 \gg r_2$ ， $r_1 \approx R$ ，此时星系的旋转速度为恒定值：

$$v_2 = \sqrt{0.5 G_s H} \quad (18)$$

星系盘面由 0 过渡到 $H_{\max}$ 可以用公式表示：

$$H = H_{\max} \left(1 - e^{-\frac{r_1}{\sigma}} \right) \quad (19)$$

H 带入为：

$$v_2 = \sqrt{0.5 G_s H_{\max} \left(1 - e^{-\frac{r_1}{\sigma}} \right)} \quad (20)$$

公式中 e 为自然函数, σ 为达到近似峰值的距离。

由此看出, 星球的旋转速度与星系的盘面高度有关, 与距离星系中心的距离无关。

3.3. 影响星系旋转速度的其他因素

3.3.1. 星系互绕的影响

星系 G_1 对星球 S_2 的引力使 S_2 绕星系 G_1 的中心旋转, 同时星球 2 对星系 1 也会产生引力, 使得星系 G_1 绕星球 S_2 旋转, 只是这个力要小的多。

星系 G_1 为圆柱面, 它单位面积占星球 S_2 距离 R 的面的比例为 $1/2\pi R$,

$$F_1 = G_s \frac{S_1 m_2}{2\pi R} = G_s \frac{2\pi r_1 H \cdot m_2}{2\pi R} = G_s \frac{r_1 H \cdot m_2}{R} \quad (21)$$

星系 G_1 受星球 S_2 影响产生的速度为:

$$v_1 = \sqrt{\frac{F_1 R}{m_2}} = \sqrt{G_s \frac{r_1 H \cdot m_2}{R} \frac{R}{m_1}} = \sqrt{G_s \frac{r_1 H \cdot m_2}{m_1}} \quad (22)$$

3.3.2. 星系剩余质量的影响

星系的质量一般服从正太分布:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (23)$$

这里 x 为星系 G_1 的半径 r_1 , σ 为方差, 取星系的最大半径为 3σ , 正太分布在 3σ 以内的质量为总质量的 99%。将星系不同半径的剩余质量作为外围星系的质量, 对于星球 S_2 , 其后面的外围星系会对 S_2 产生影响, 不在 S_2 后面的其余的剩余质量对 S_2 没有影响, 图 5、图 6 中, 将星球 S_2 后面的星系剩余质量等效为一个圆柱形星球, 可以计算星球 S_2 以外物质对星球 S_2 旋转速度的影响。

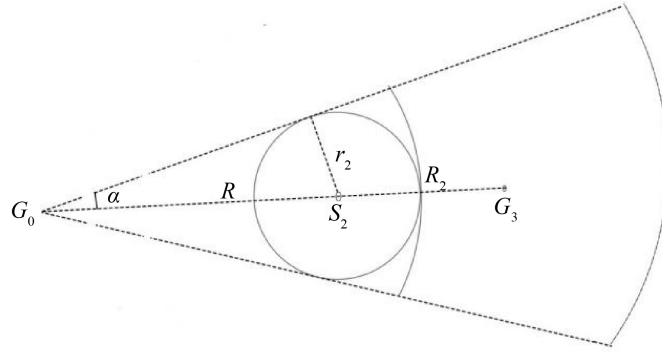


Figure 5. Schematic diagram of residual mass equivalence of galaxies

图 5. 星系剩余质量等效示意图

$$\sin \alpha = \frac{r_2}{R} \quad (24)$$

$$m_3 = \frac{2\alpha}{2\pi} (m - m_1 - m_2) \quad (25)$$

$$R_2 \approx \frac{1}{3} (R_{\max} - R - r_2) \quad (26)$$

$$\pi r_3^2 \rho = m_3 \quad (27)$$

$$r_3 = \sqrt{\frac{m_3}{\pi \rho}} \quad (28)$$

$$F_3 = G_s \frac{S_2 S_3}{4\pi R_2^2} = G_s \frac{m_2 \cdot 2\pi r_3 H}{4\pi R_2^2} = G_s \frac{m_2 \cdot r_3 H}{2R_2^2} \quad (29)$$

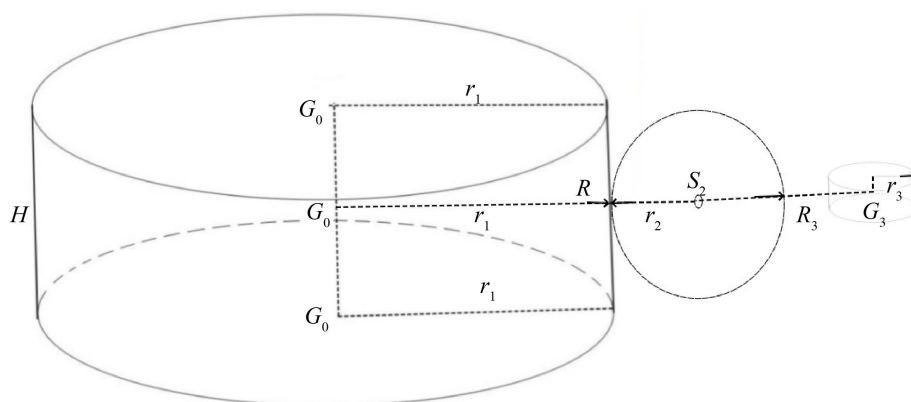


Figure 6. Schematic diagram of the gravitational effect of the galaxy 2
图 6. 星系引力作用示意图 2

3.4. 星系旋转速度及其影响因素的数据模拟

星系旋转速度数据模拟见表 1。这里选取了一部分表格，整体表格有一万行，读者在这个表格上续行就行。表中第一列为一些常数， $r_{\max}$ 为星系的最大半径 $R_{\max}$ 减去星系中需要计算速度的星球半径 r_2 后的最大值，近似的 $r_{\max} = R_{\max}$ ，由图 2 和图 3 可以看出，星系盘的边沿在 20~25 千秒差距(kpc)之间，这里取 24 千秒差距，1 秒差距(pc) = 3.086×10^{16} m，24 千秒差距 = 7.405×10^{20} m。 n 为 $r_{\max}$ 的等分数，这里取 10000。 Δr 为每等份宽度， m_0 为核子质量， r_0 为核子半径， $\rho_{\max}$ 为星球最大密度，可以认为星系中心的密度最大值就是中子星的物质密度，这里它就是核子的物质密度 $\rho_{\max} = m_0 / (4/3\pi r_0^3)$ ，星系的物质分布一般服从正太分布，这里正太分布的 y 轴就是星系的中心 G_0 ， σ 为正太分布的方差，这里取星系半径的最大值 $R_{\max}$ ($r_{\max}$) 为 3σ ，可以认为星系 99% 的物质都包括在星系最大值 $R_{\max}$ 之内了。 m_2 为星系内需要计算速度的星球，这里选这个星球的质量 m_2 与太阳的质量相等为 1.989×10^{30} kg，选这个星球的半径 r_2 与太阳的半径相等为 6.955×10^8 m，这个星球的密度为 ρ_2 与太阳的密度相等为 1408 kg/m³， G_s 为引力公式中的系数，相当于牛顿万有定律中的引力常数 G 。 $H_{\max}$ 为盘面形成后的厚度。不同星系的星系盘的厚度不一样，银河系盘面的厚度为 1000 光年，这里取星系盘的厚度与银河系星系盘厚度相等也为 1000 光年，1 光年为 9.4607×10^{15} m，1000 光年为 9.4607×10^{18} m。星系盘总质量为正太分布 3σ 以内的质量/0.99。盘高拐点为星系盘高度基本达到正常高度时对应的星系半径 r_1 的值。

表中第 2 列为星系半径 R ，初值为每等份宽度 Δr + 星球 2 的半径 r_2 ，然后每增加一行，半径 R + 宽度 Δr 。表中第 3 列为星系等效半径 r_1 ，其值为 $R - r_2$ ，第 4 列为星系盘厚度，在星系盘半径为 0 时，星系盘厚度也为 0，星系盘半径达到星系盘厚度拐点时，星系盘厚度达到正常厚度，其值符合公式 19，第 5 列为星系相应半径下的物质密度，此值符合正太分布，由公式 23 乘以物质最大密度 $\rho_{\max}$ 给出。第 6 列为不同密度层的物质质量，起始值为 $\pi C_2(r_1)^2 H \rho$ ，第二行起不同密度环的质量，其值为 $\pi(C_3^2 - C_2^2) H \rho$ ，第 7 列为质量和，表示不同星系半径以内物质质量的总量，此列最后一行为 3σ 以内星系的总质量，占整个星

系质量的 99%。第 8 列为星系等效柱体侧面积，为不同星系半径下与星球 S_2 的引力作用面积，第 9 列为星球 S_2 受到星系 G_1 的引力，星系 G_1 使用引力作用面积，星球 S_2 使用质量。第 10 列为星球在 S_2 在星系 G_1 引力场中的旋转速度。

第 11-13 列说明星系 G_1 受到星球 S_2 作用力对星球 S_2 旋转速度的影响。第 11 列为星系 G_1 受到星球 S_2 的作用力，由于星系 G_1 在 S_2 引力场中以圆柱侧面为引力作用面，这里只与距离 R 的一次方成反比，第 12 列为星系 G_1 受到星球 S_2 的引力形成的旋转速度，第 13 列为星球 S_2 和星系 G_1 运行的速度和。由第 10 列星球 S_2 的速度 v_2 和第 12 列星系 G_1 受星球 S_2 影响产生的反向速度 V_1 可以看出， $V_2 \gg V_1$ ，星系 G_1 受星球 S_2 影响产生的反向速度 V_1 可以忽略。

第 14~19 列说明星系不同半径下的星系剩余质量对星系旋转速度的影响。第 14 列为星球 S_2 后面等效柱状星球 G_3 对星球 S_2 的作用距离，考虑到 $r_{\max}$ 为星系 3σ 的作用范围，星系的边沿取 $4/3r_{\max}$ ，取星系剩余距离的 $1/3$ 处为剩余质量的作用点，则 $R_3 = r + 1/3(4/3r_{\max} - R)$ ，第 15 列为在星球 S_2 后面的剩余质量，由公式 25 计算。第 16 列为剩余质量的等效圆柱半径，这里物质密度取 1408 kg/m^3 ，第 17 列为星系剩余质量对星球 S_2 的引力，由上式 29 计算，第 18 列为星球 S_2 受到 G_1 和 G_3 力的合力，这里为两力只差，第 19 列星球 S_2 受到 F_1 和 F_3 合力影响后的旋转速度，第 20 列为星球 S_2 受到星系 G_1 ，星系剩余质量等效球 G_3 和星球 S_2 对 G_1 影响作用， S_2 的速度和。由第 9 列 F_2 和 17 列 F_3 可以看出，星系 G_1 对星球 S_2 的引力 $F_2 \gg$ 星系剩余质量等效球 G_3 对星球 S_2 的引力 F_3 ，星系剩余质量等效球 G_3 对星球 S_2 的引力 F_3 可以忽略。

Table 1. Digital simulation table of galaxy rotation speed
表 1. 星系旋转速度数字模拟表

(a)									
$r_{\max}$ (m)	R (m)	r_1 (m)	H (m)	ρ (kg/m ³)	m_1 (kg)	质量和(kg)	S_1 (m ²)	F_2 (N)	v_2 (m/s)
7.405E+20	7.405E+16	7.405E+16	1.701E+16	1.262E-03	2.057E+50	2.057E+50	7.916E+33	2.871E+21	1.034E+04
n	1.481E+17	1.481E+17	3.399E+16	1.262E-03	6.171E+50	8.228E+50	3.163E+34	2.868E+21	1.461E+04
10000	2.222E+17	2.222E+17	5.094E+16	1.262E-03	1.029E+51	1.851E+51	7.111E+34	2.866E+21	1.789E+04
Δr (m)	2.962E+17	2.962E+17	6.787E+16	1.262E-03	1.440E+51	3.291E+51	1.263E+35	2.863E+21	2.065E+04
7.40544E+16	3.703E+17	3.703E+17	8.476E+16	1.262E-03	1.851E+51	5.143E+51	1.972E+35	2.861E+21	2.308E+04
m_0 (kg)	4.443E+17	4.443E+17	1.016E+17	1.262E-03	2.263E+51	7.406E+51	2.837E+35	2.858E+21	2.527E+04
1.6748E-27	5.184E+17	5.184E+17	1.184E+17	1.262E-03	2.674E+51	1.008E+52	3.858E+35	2.855E+21	2.728E+04
r_0 (m)	5.924E+17	5.924E+17	1.352E+17	1.262E-03	3.086E+51	1.317E+52	5.034E+35	2.853E+21	2.915E+04
8E-16	6.665E+17	6.665E+17	1.520E+17	1.262E-03	3.497E+51	1.666E+52	6.366E+35	2.850E+21	3.091E+04
$\rho_{\max}$ (kg/m ³)	7.405E+17	7.405E+17	1.688E+17	1.262E-03	3.909E+51	2.057E+52	7.852E+35	2.848E+21	3.256E+04
7.809E+17	8.146E+17	8.146E+17	1.855E+17	1.262E-03	4.320E+51	2.489E+52	9.492E+35	2.845E+21	3.414E+04
σ (m)	8.887E+17	8.887E+17	2.021E+17	1.262E-03	4.731E+51	2.962E+52	1.129E+36	2.843E+21	3.564E+04
2.468E+20	9.627E+17	9.627E+17	2.188E+17	1.262E-03	5.143E+51	3.477E+52	1.323E+36	2.840E+21	3.708E+04
m_2 (kg)	1.037E+18	1.037E+18	2.354E+17	1.262E-03	5.554E+51	4.032E+52	1.533E+36	2.838E+21	3.846E+04
1.989E+30	1.111E+18	1.111E+18	2.520E+17	1.262E-03	5.966E+51	4.628E+52	1.759E+36	2.835E+21	3.979E+04
r_2 (m)	1.185E+18	1.185E+18	2.686E+17	1.262E-03	6.377E+51	5.266E+52	1.999E+36	2.833E+21	4.108E+04
6.955E+08	1.259E+18	1.259E+18	2.851E+17	1.262E-03	6.788E+51	5.945E+52	2.255E+36	2.830E+21	4.232E+04

续表

ρ_2 (kg/m ³)	1.333E+18	1.333E+18	3.016E+17	1.262E-03	7.200E+51	6.665E+52	2.526E+36	2.827E+21	4.353E+04
1408	1.407E+18	1.407E+18	3.181E+17	1.262E-03	7.611E+51	7.426E+52	2.812E+36	2.825E+21	4.470E+04
G_D	1.481E+18	1.481E+18	3.345E+17	1.262E-03	8.023E+51	8.228E+52	3.113E+36	2.822E+21	4.584E+04
1.000E-09	1.555E+18	1.555E+18	3.509E+17	1.262E-03	8.434E+51	9.072E+52	3.429E+36	2.820E+21	4.696E+04
$H_{\max}$ (m)	1.629E+18	1.629E+18	3.673E+17	1.262E-03	8.845E+51	9.956E+52	3.760E+36	2.817E+21	4.804E+04
9.4607E+18	1.703E+18	1.703E+18	3.836E+17	1.262E-03	9.257E+51	1.088E+53	4.106E+36	2.815E+21	4.910E+04
总质量 (kg)	1.777E+18	1.777E+18	4.000E+17	1.262E-03	9.668E+51	1.185E+53	4.466E+36	2.812E+21	5.013E+04
4.56586E+57	1.851E+18	1.851E+18	4.163E+17	1.262E-03	1.008E+52	1.286E+53	4.842E+36	2.810E+21	5.114E+04
盘高拐点(m)	1.925E+18	1.925E+18	4.325E+17	1.262E-03	1.049E+52	1.391E+53	5.232E+36	2.807E+21	5.213E+04
1.23424E+20	1.999E+18	1.999E+18	4.488E+17	1.262E-03	1.090E+52	1.500E+53	5.638E+36	2.805E+21	5.310E+04
e	2.074E+18	2.074E+18	4.650E+17	1.262E-03	1.131E+52	1.613E+53	6.058E+36	2.802E+21	5.405E+04
2.718	2.148E+18	2.148E+18	4.811E+17	1.262E-03	1.173E+52	1.730E+53	6.492E+36	2.800E+21	5.498E+04
	2.222E+18	2.222E+18	4.973E+17	1.262E-03	1.214E+52	1.851E+53	6.941E+36	2.797E+21	5.590E+04
	2.296E+18	2.296E+18	5.134E+17	1.262E-03	1.255E+52	1.977E+53	7.405E+36	2.795E+21	5.680E+04
	2.370E+18	2.370E+18	5.295E+17	1.262E-03	1.296E+52	2.106E+53	7.884E+36	2.792E+21	5.768E+04
	2.444E+18	2.444E+18	5.455E+17	1.262E-03	1.337E+52	2.240E+53	8.377E+36	2.790E+21	5.855E+04
	2.518E+18	2.518E+18	5.616E+17	1.262E-03	1.378E+52	2.378E+53	8.884E+36	2.787E+21	5.940E+04
	2.592E+18	2.592E+18	5.776E+17	1.262E-03	1.419E+52	2.520E+53	9.406E+36	2.785E+21	6.024E+04
	2.666E+18	2.666E+18	5.936E+17	1.262E-03	1.460E+52	2.666E+53	9.942E+36	2.782E+21	6.107E+04
	2.740E+18	2.740E+18	6.095E+17	1.262E-03	1.502E+52	2.816E+53	1.049E+37	2.780E+21	6.188E+04
	2.814E+18	2.814E+18	6.254E+17	1.262E-03	1.543E+52	2.970E+53	1.106E+37	2.777E+21	6.269E+04
	2.888E+18	2.888E+18	6.413E+17	1.262E-03	1.584E+52	3.129E+53	1.164E+37	2.775E+21	6.348E+04
	2.962E+18	2.962E+18	6.572E+17	1.262E-03	1.625E+52	3.291E+53	1.223E+37	2.773E+21	6.426E+04
	3.036E+18	3.036E+18	6.730E+17	1.262E-03	1.666E+52	3.458E+53	1.284E+37	2.770E+21	6.503E+04
	3.110E+18	3.110E+18	6.888E+17	1.262E-03	1.707E+52	3.629E+53	1.346E+37	2.768E+21	6.579E+04
	3.184E+18	3.184E+18	7.046E+17	1.262E-03	1.748E+52	3.803E+53	1.410E+37	2.765E+21	6.654E+04
	3.258E+18	3.258E+18	7.203E+17	1.262E-03	1.790E+52	3.982E+53	1.475E+37	2.763E+21	6.727E+04
(b)									
F_1 (N)	v_1 (m/s)	v_2+v_1 (m/s)	R_3 (m)	m_3 (kg)	r_3 (m)	F_3 (N)	$F_1 - F_3$ (N)	v_3 (m/s)	$v_3 + v_2$ (m/s)
2.126E+38	2.767E+02	1.062E+04	3.258E+20	1.365E+49	4.259E+14	6.788E+10	2.871E+21	1.034E+04	1.062E+04
4.248E+38	2.765E+02	1.489E+04	3.258E+20	6.825E+48	2.130E+14	6.786E+10	2.868E+21	1.461E+04	1.489E+04
6.367E+38	2.764E+02	1.817E+04	3.258E+20	4.550E+48	1.421E+14	6.784E+10	2.866E+21	1.789E+04	1.817E+04
8.481E+38	2.763E+02	2.093E+04	3.257E+20	3.412E+48	1.066E+14	6.782E+10	2.863E+21	2.065E+04	2.093E+04
1.059E+39	2.762E+02	2.335E+04	3.257E+20	2.730E+48	8.533E+13	6.780E+10	2.861E+21	2.308E+04	2.335E+04
1.270E+39	2.760E+02	2.554E+04	3.257E+20	2.275E+48	7.114E+13	6.778E+10	2.858E+21	2.527E+04	2.554E+04
1.480E+39	2.759E+02	2.756E+04	3.257E+20	1.950E+48	6.101E+13	6.776E+10	2.855E+21	2.728E+04	2.756E+04

续表

1.690E+39	2.758E+02	2.943E+04	3.256E+20	1.706E+48	5.340E+13	6.774E+10	2.853E+21	2.915E+04	2.943E+04
1.900E+39	2.757E+02	3.118E+04	3.256E+20	1.517E+48	4.749E+13	6.772E+10	2.850E+21	3.091E+04	3.118E+04
2.109E+39	2.755E+02	3.284E+04	3.256E+20	1.365E+48	4.276E+13	6.769E+10	2.848E+21	3.256E+04	3.284E+04
2.318E+39	2.754E+02	3.441E+04	3.256E+20	1.241E+48	3.889E+13	6.767E+10	2.845E+21	3.414E+04	3.441E+04
2.526E+39	2.753E+02	3.591E+04	3.255E+20	1.137E+48	3.567E+13	6.765E+10	2.843E+21	3.564E+04	3.591E+04
2.734E+39	2.752E+02	3.735E+04	3.255E+20	1.050E+48	3.294E+13	6.763E+10	2.840E+21	3.708E+04	3.735E+04
2.942E+39	2.750E+02	3.873E+04	3.255E+20	9.750E+47	3.060E+13	6.761E+10	2.838E+21	3.846E+04	3.873E+04
3.149E+39	2.749E+02	4.007E+04	3.255E+20	9.100E+47	2.857E+13	6.759E+10	2.835E+21	3.979E+04	4.007E+04
3.356E+39	2.748E+02	4.135E+04	3.254E+20	8.531E+47	2.680E+13	6.757E+10	2.833E+21	4.108E+04	4.135E+04
3.563E+39	2.747E+02	4.260E+04	3.254E+20	8.029E+47	2.523E+13	6.755E+10	2.830E+21	4.232E+04	4.260E+04
3.769E+39	2.746E+02	4.381E+04	3.254E+20	7.583E+47	2.384E+13	6.753E+10	2.827E+21	4.353E+04	4.381E+04
3.975E+39	2.744E+02	4.498E+04	3.254E+20	7.184E+47	2.260E+13	6.751E+10	2.825E+21	4.470E+04	4.498E+04
4.180E+39	2.743E+02	4.612E+04	3.254E+20	6.825E+47	2.148E+13	6.749E+10	2.822E+21	4.584E+04	4.612E+04
4.385E+39	2.742E+02	4.723E+04	3.253E+20	6.500E+47	2.046E+13	6.747E+10	2.820E+21	4.696E+04	4.723E+04
4.590E+39	2.741E+02	4.831E+04	3.253E+20	6.204E+47	1.954E+13	6.745E+10	2.817E+21	4.804E+04	4.831E+04
4.794E+39	2.739E+02	4.937E+04	3.253E+20	5.934E+47	1.870E+13	6.743E+10	2.815E+21	4.910E+04	4.937E+04
4.998E+39	2.738E+02	5.040E+04	3.253E+20	5.687E+47	1.793E+13	6.741E+10	2.812E+21	5.013E+04	5.040E+04
5.202E+39	2.737E+02	5.141E+04	3.252E+20	5.460E+47	1.722E+13	6.739E+10	2.810E+21	5.114E+04	5.141E+04
5.405E+39	2.736E+02	5.240E+04	3.252E+20	5.250E+47	1.656E+13	6.737E+10	2.807E+21	5.213E+04	5.240E+04
5.608E+39	2.734E+02	5.337E+04	3.252E+20	5.055E+47	1.596E+13	6.735E+10	2.805E+21	5.310E+04	5.337E+04
5.811E+39	2.733E+02	5.432E+04	3.252E+20	4.875E+47	1.540E+13	6.733E+10	2.802E+21	5.405E+04	5.432E+04
6.013E+39	2.732E+02	5.526E+04	3.251E+20	4.707E+47	1.487E+13	6.731E+10	2.800E+21	5.498E+04	5.526E+04
6.215E+39	2.731E+02	5.617E+04	3.251E+20	4.550E+47	1.438E+13	6.729E+10	2.797E+21	5.590E+04	5.617E+04
6.416E+39	2.730E+02	5.707E+04	3.251E+20	4.403E+47	1.392E+13	6.727E+10	2.795E+21	5.680E+04	5.707E+04
6.617E+39	2.728E+02	5.795E+04	3.251E+20	4.265E+47	1.349E+13	6.725E+10	2.792E+21	5.768E+04	5.795E+04
6.818E+39	2.727E+02	5.882E+04	3.250E+20	4.136E+47	1.309E+13	6.723E+10	2.790E+21	5.855E+04	5.882E+04
7.018E+39	2.726E+02	5.967E+04	3.250E+20	4.014E+47	1.271E+13	6.721E+10	2.787E+21	5.940E+04	5.967E+04
7.218E+39	2.725E+02	6.051E+04	3.250E+20	3.900E+47	1.235E+13	6.719E+10	2.785E+21	6.024E+04	6.051E+04
7.418E+39	2.724E+02	6.134E+04	3.250E+20	3.791E+47	1.202E+13	6.717E+10	2.782E+21	6.107E+04	6.134E+04
7.617E+39	2.722E+02	6.216E+04	3.249E+20	3.689E+47	1.170E+13	6.715E+10	2.780E+21	6.188E+04	6.216E+04
7.816E+39	2.721E+02	6.296E+04	3.249E+20	3.592E+47	1.139E+13	6.713E+10	2.777E+21	6.269E+04	6.296E+04
8.015E+39	2.720E+02	6.375E+04	3.249E+20	3.500E+47	1.111E+13	6.711E+10	2.775E+21	6.348E+04	6.375E+04
8.213E+39	2.719E+02	6.453E+04	3.249E+20	3.412E+47	1.083E+13	6.709E+10	2.773E+21	6.426E+04	6.453E+04
8.411E+39	2.718E+02	6.530E+04	3.248E+20	3.329E+47	1.057E+13	6.707E+10	2.770E+21	6.503E+04	6.530E+04
8.608E+39	2.716E+02	6.606E+04	3.248E+20	3.250E+47	1.033E+13	6.705E+10	2.768E+21	6.579E+04	6.606E+04
8.805E+39	2.715E+02	6.681E+04	3.248E+20	3.174E+47	1.009E+13	6.703E+10	2.765E+21	6.654E+04	6.681E+04
9.002E+39	2.714E+02	6.755E+04	3.248E+20	3.102E+47	9.867E+12	6.701E+10	2.763E+21	6.727E+04	6.755E+04

综上所述,星系的旋转速度主要由星系中测量星球受到测量星球以内的星系引力形成。图7是星系旋转速度的模拟效果图(V_2)。

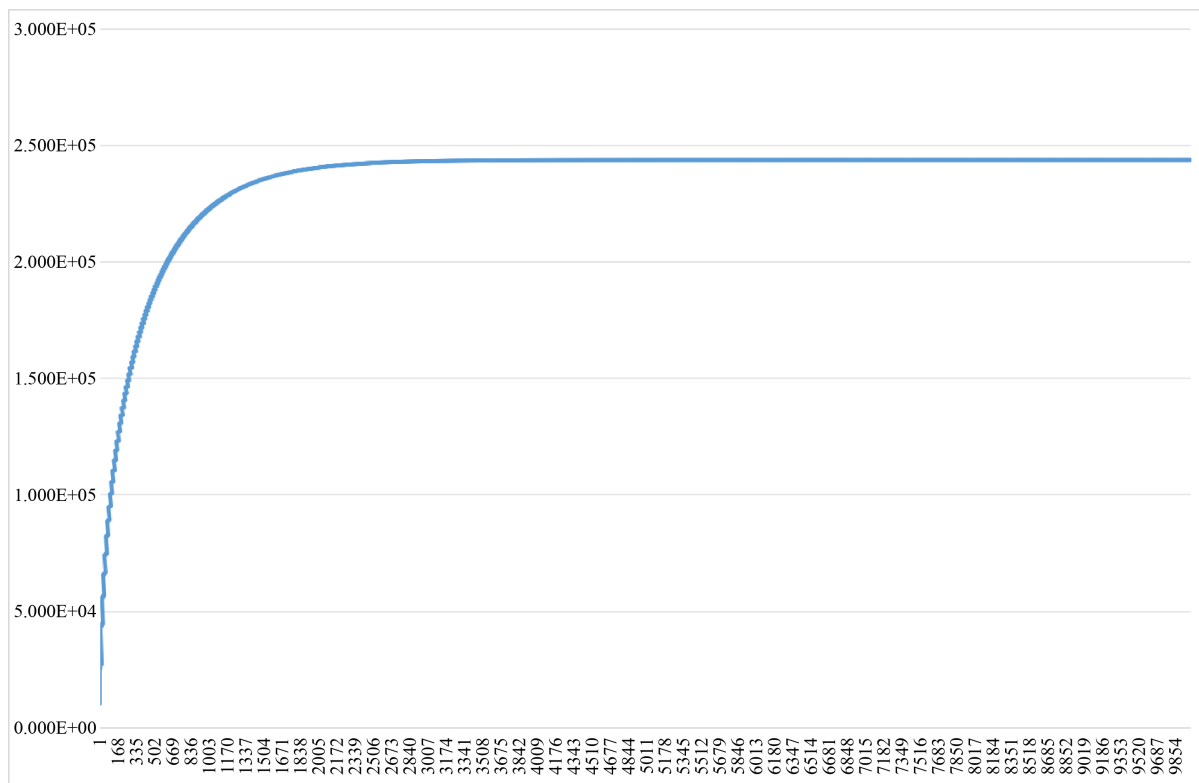


Figure 7. Simulation effect of galaxy rotation speed

图7. 星系旋转速度模拟效果图

4. 讨论

星系的结构是复杂的,上面的结论只适用于富星且星系盘 360° 分布基本均匀的椭圆星系;对于存在旋臂的螺旋星系和棒旋星系,星系的旋转速度会随旋臂出现上下波动;对于透镜状星系和不规则星系应进行具体分析;对于像太阳系这样的少星星系,上面结论不适用。对于星球,由星球表面积发出的引力子趋于饱和,所以引力与星球表面积成正比,对于星系,由星系侧表面积发出的引力子远未趋于饱和,不同星系的物质密度不一样,由星系侧表面积发出的引力子饱和程度不一样,所以不同星系对物体的引力不一样,不同星系中物体的旋转速度也不一样,星系的旋转速度,除与星系盘的厚度有关外,应该与星系物质密度有关,星系盘厚度相同的星系,物质密度越大,星系的旋转速度越大;星系盘密度相同的星系,星系盘越厚,星系的旋转速度越大。星系一般都有一个球形星系核,随着球形星系核大小的不同,星系中心厚度过渡到星系盘正常厚度的情况不一样,星系旋转速度开始曲线也会不一样,这些细节有待进一步研究。本文的结论,希望广大天文工作者验证。

5. 结论

物质由核子(质子和中子的统称)构成,每个核子都发出大量的引力子,星球内部核子发出的引力子被星球内部其他核子吸收,形成星球内部的凝聚力,星球壳层的核子发出的引力子有一部分发射到球外以引力能量波的形式传播形成引力场,当引力能量波遇到引力场中其他星球的核子时,与其发生共振形

成能量转移, 引力子被其它核子吸收形成引力。引力由星球壳层核子发出的引力子多少决定, 这个引力子多少与星球表面积成正比, 因此星球的引力与星球的表面积成正比, 万有引力公式中与星球质量成正比, 只是一种近似。一般的星系都是盘状结构, 在星系旋转速度计算中, 星系中的星球受到的引力与盘状结构的侧面积相关, 由修正后的引力公式和向心力公式可以得到星系的旋转速度与星系盘的厚度相关, 与星系的半径无关。

$$v = \sqrt{0.5G_S H_{\max} \left(1 - e^{-\frac{r}{\sigma}}\right)}$$

式中 G_S 为引力常数, $H_{\max}$ 为星系盘厚度, e 为自然函数, σ 为星系盘厚度达到近似峰值时的星系半径, r 为测量点与星系中心的距离。经本文数据模拟, 星球对星系的引力对星系旋转速度的影响可以忽略, 测量点以外星系剩余质量对星系的旋转速度影响也可以忽略。经本文分析, 对于特定的星系, 星系旋转速度是恒定的, 星系旋转速度计算中不需要暗物质的参与。

参考文献

- [1] 百度百科. 暗物质[EB/OL].
https://baike.baidu.com/item/%E6%9A%97%E7%89%A9%E8%B4%A8/8666?fr=ge_al, 2023-11-20.
- [2] 张新民. 粒子物理和宇宙学中的两片乌云——谈暗物质和暗能量[J]. 物理, 2011, 40(1): 8-12.
- [3] 许霖. 暗物质与暗能量[J]. 物理通报, 2004(2): 1-3.
- [4] 常进. 暗物质粒子探测: 意义、方法、进展及展望[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2010, 2(2): 95-99.
<https://doi.org/10.3724/SP.J.1224.2010.00095>
- [5] 袁强. 宇宙中的幽灵——暗物质[J]. 现代物理知识, 2008, 20(5): 3-6.
- [6] 陈学雷. 一对竞争的科学理论: 暗物质与修改引力理论[EB/OL].
<https://mp.weixin.qq.com/s/VP7rg8uRDL5a8ckuLVaQYA>, 2023-11-20.
- [7] 邓雪梅. 修正牛顿定律? [J]. 世界科学, 2008(2): 18-19.
- [8] Seshavatharam, U.V.S. and Lakshminarayana, S. (2014) On Galaxy Rotation Curves & Galactic Radial Distances in Black Hole Cosmology. *Prespacetime Journal*, 5, 815-828.
- [9] Hartnett, J.G. (2005) The Carmeli Metric Correctly Describes Spiral Galaxy Rotation Curves. *International Journal of Theoretical Physics*, 44, 349-362. <https://doi.org/10.1007/s10773-005-3366-1>
- [10] 百度百科. 银河系[EB/OL].
https://baike.baidu.com/item/%E9%93%B6%E6%B2%B3%E7%B3%BB/189795?fr=ge_al, 2023-11-20.
- [11] 苏宜. 天文学新概论[M]. 第五版. 北京: 科学出版社, 2019: 206-210.
- [12] 杨梦. 星系的旋转曲线及动力学性质[D]: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2016.
- [13] 陈俊意. 旋转星系速度平坦的数学原理[J]. 科学咨询, 2019(33): 41-43
- [14] Grand, R.J.J., Kawata, D. and Cropper, M. (2012) Dynamics of Stars around Spiral Arms in an N-bodySPH Simulated Barred-Spiral Galaxy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 426, 167-180.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21733.x>
- [15] 淞茗茗. 星系旋转曲线与质量分布的探索: 解密星系内部的引力之谜[EB/OL].
<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1771086781607918406&wfr=spider&for=pc>, 2023-07-11.
- [16] 刘天天. 首发于天体物理, 不存在的暗物质(简明篇)——研究银河系旋转曲线[EB/OL].
<https://zhuanlan.zhihu.com/p/450903858>, 2023-11-20.
- [17] 陈军利, 康耀辉. 引力、引力场和引力子——关于引力能量波频率的推断[J]. 天文与天体物理, 2022, 10(1): 1-10.
<https://doi.org/10.12677/AAS.2022.101001>
- [18] 陈军利. 引力是如何产生的?——引力线在偏转物体的运动方向[J]. 天文与天体物理, 2022, 10(2): 11-24.
<https://doi.org/10.12677/AAS.2022.102002>
- [19] 陈军利. 引力线在偏转物体运动方向分析[EB/OL]. 中文科技期刊数据库(全文版)自然科学, 2023: 52-57.

-
- <http://cqvip.com/QK/72191X/202308/epub1000003854924.html>, 2023-11-20.
- [20] 陈军利. 论核力是引力在微观距离上的表现[J]. 现代物理, 2023, 13(5): 113-124.
<https://doi.org/10.12677/MP.2023.135012>
- [21] 陈军利, 康耀辉. 由星球发射到球外引力子的比例修正万有引力公式的尝试——偏转引力理论之球外引力子比例[J]. 天文与天体物理, 2023, 11(3): 27-39. <https://doi.org/10.12677/AAS.2023.113003>