

广义相对论时空结构再探讨

——星系碰撞中的暗物质与引力透镜效应原理分析

陈军利

西北工业大学电子信息学院, 陕西 西安

收稿日期: 2024年12月14日; 录用日期: 2025年1月7日; 发布日期: 2025年1月15日

摘要

本文首先回顾了“广义相对论”的时空观和引力透镜现象, 修正了“光线弯曲的同频互扰解释”推导过程, 然后提出了光线由光子传播、引力由引力子传播、光子与引力子基本不发生作用, 由此导致的“引力弯曲光线”在微观机理上无法解释的问题。最后列举了碰撞星系中的炙热气体与引力透镜反演的星系质量(暗物质)分布的分离现象的观测实例。传统的观点认为这些现象是暗物质存在的有力证据, 本文认为: 这些观测事实说明作为碰撞星系主要质量的不发光炙热气体, 并未对引力透镜现象做出贡献, 也就是说碰撞星系中的不发光炙热气体并未弯曲光线, 也就没有弯曲它周围的时空, 因此“广义相对论”中大质量物体引起其周围时空弯曲结论并不成立。本文认为碰撞星系中的暗物质是引力透镜中大质量发光星球发出的电磁波对可见光弯曲程度计算不足造成的, 光线的弯曲与星球质量无关。

关键词

广义相对论, 引力透镜, 时空弯曲, 暗物质

Re-Exploration of the Space-Time Structure of General Relativity

—Analysis of the Principle of Dark Matter and Gravitational Lens Effect in Galaxy Collisions

Junli Chen

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

Received: Dec. 14th, 2024; accepted: Jan. 7th, 2025; published: Jan. 15th, 2025

Abstract

This article first reviews the space-time view of “general relativity” and the phenomenon of gravitational lensing, corrects the derivation process of “the same-frequency mutual interference

文章引用: 陈军利. 广义相对论时空结构再探讨[J]. 天文与天体物理, 2025, 13(1): 1-10.

DOI: 10.12677/aas.2025.131001

explanation of light bending”, and then proposes that light is propagated by photons, gravity is propagated by gravitons; photons and gravitons have basically no interaction, and the resulting “gravitational bending of light” is a problem that cannot be explained in terms of microscopic mechanisms. Finally, an observational example of the separation phenomenon between the hot gas in colliding galaxies and the galaxy mass (dark matter) distribution inverted by gravitational lensing is listed. The traditional view is that these phenomena are strong evidence for the existence of dark matter. This article believes that these observational facts show that the non-luminous hot gas, which is the main mass of the colliding galaxy, does not contribute to the gravitational lensing phenomenon. In other words, the non-luminous gas in the colliding galaxy does not contribute to the gravitational lensing phenomenon. Hot gas does not bend light, nor does it bend the space-time around it. Therefore, the conclusion in the “General Theory of Relativity” that massive objects cause the space-time around them to bend does not hold. This article believes that the dark matter in colliding galaxies is caused by insufficient calculation of the degree of bending of visible light by electromagnetic waves emitted by massive luminous stars in gravitational lenses. The bending of light has nothing to do with the mass of the planet.

Keywords

General Relativity, Gravitational Lensing, Spacetime Curvature, Dark Matter

Copyright © 2025 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. 广义相对论的回顾

广义相对论[1]是描述物质间引力相互作用的理论。其基础由爱因斯坦于 1915 年完成, 1916 年正式发表。这一理论首次把引力场等效成时空的弯曲。在弯曲的时空中, 物体顺着最短距离(测地线)进行运动。广义相对论认为引力是时空区域几何性质的表现。简单地讲就是: 物质告诉时空怎样弯曲, 时空告诉物质怎样运动。

广义相对论的重要推论之一是: 光线在引力场中会发生弯曲[2]。1916 年爱因斯坦对光线在引力场中的弯曲计算的光线的偏角为: $\alpha = 1.75'' r/R_0$, 其中 r 为太阳半径, R_0 为光线到太阳中心的距离。图 1 是光线弯曲示意图。1919 年日全食期间, 由爱丁顿等人率领的两支观测队分赴西非几内亚湾的普林西比岛和巴西的索布腊儿尔两地观测。经过比较, 两地的观测结果分别为 1.61'' 和 1.98''。把当时测到的偏角数据跟爱因斯坦的理论预期比较, 基本相符。

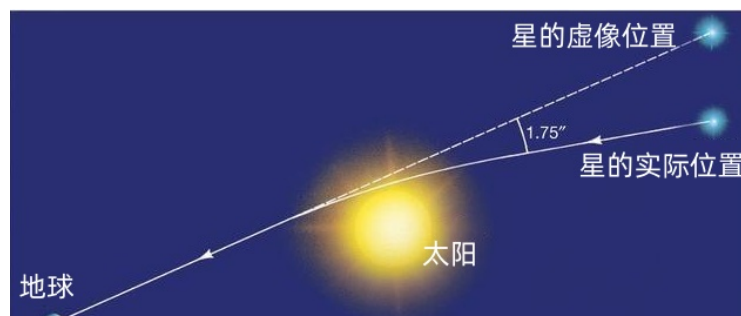


Figure 1. Schematic diagram of light bending

图 1. 光线弯曲示意图

广义相对论预言了光线经过大质量天体附近时会发生弯曲。如果在观测者到光源的直线上有一个大质量的天体(前置天体),则观测者会看到由于光线弯曲而形成的一个或多个像,这种现象称之为引力透镜现象[3]。图2是类星体的引力透镜的几何示意图。

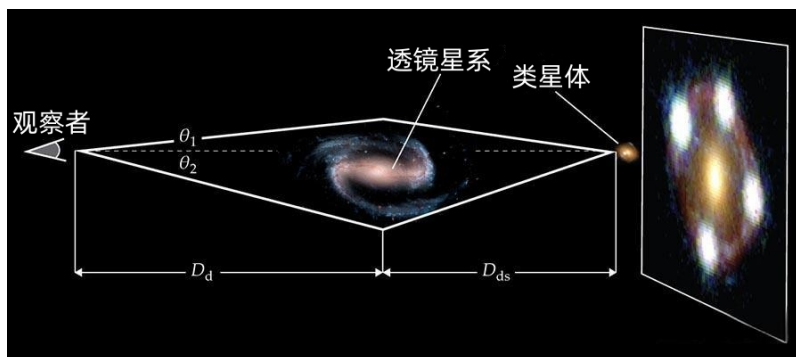


Figure 2. Schematic diagram of gravitational lens
图2. 引力透镜示意图

2. 光子散射(碰撞)、光线同频互扰对光线弯曲的解释

我们知道:引力是由引力子传播的,光是由光子传播的,引力子和光子基本不发生作用,因此引力不会弯曲光线。而光可以发生干涉、衍射、同频干扰现象,说明光子和光子可以发生作用,光子和光子散射(碰撞)可以改变光子的传播方向,一般情况下,这个改变太小,我们根本观察不到。当一系列可见光通过大质量发光星球旁边时,受大质量发光星球发出电磁波的连续作用,会形成绕大质量发光星球的圆弧[4],恰是“引力弯曲光线”,这是人们形成“引力弯曲光线”、“引力透镜”印象的原因。

传统的光子定义为 fh ,这里 f 为电磁波的频率, h 为普朗克常数,本文中我们把电磁波的一个波包看成一个光子,把光子散射(碰撞)看成两个完全弹性球的碰撞,光子与光子质量与动能等性质完全一样,因此光子与光子散射(碰撞)就相当于互换光子,互换后光子其他性质不变,只是光子传播方向会发生变化。详细分析光子与光子散射(碰撞)后方向的变化和偏转角度的平均大小,涉及各种碰撞情况的分析和概率,这里根据光线经过太阳旁边时发生弯曲的情况做(反推)分析。

图3是太阳弯曲光线示意图。可见光光线从无穷远处朝太阳而来。设可见光光线和太阳的最近距离为 R ,经过太阳后的偏折角为 γ 。以太阳为极点、以从太阳指向可见光距离天体最近处的射线为极轴,建立极坐标 (r, Φ) 。设光速为 c ,普朗克常量为 h 。

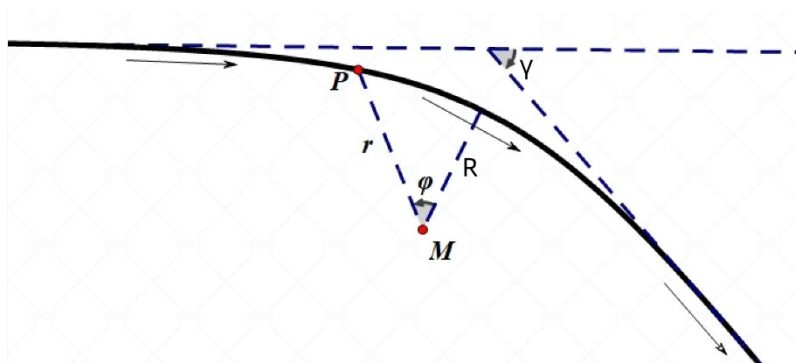


Figure 3. Schematic diagram of visible light bending by the sun
图3. 太阳弯曲可见光示意图

光线单位时间通过的光子数量与光通量有关，把光微粒当做有质量的粒子，设可见光单位时间通过的微粒等效质量为 m_0 ，可见光单位时间通过的光子数量为 N_0 ，这些光子携带的能量(动能)为 E_0 ，太阳光的亮度为 E_s ，单位时间通过可见光与太阳光相交处的光子数量为 N_{si} ，其太阳光光子携带的能量(动能)为 E_{si} ，显然：

$$E_0 = N_0 h \quad (1)$$

$$E_{si} = N_{si} h = \frac{N_s h}{r^2} = \frac{E_s}{r^2} \quad (2)$$

在可见光与太阳光相交时，相交处光子互相作用的力与相互作用的光子数量成正比：

$$F = k_1 N_0 N_{si} = \frac{k_1 N_0 N_s}{r^2} = k_2 E_0 E_{si} = \frac{k_2 E_0 E_s}{r^2} \quad (3)$$

上式中 k_1 为光子作用数量与作用力之间的系数、 k_2 为光子携带能量与作用力之间的系数。

牛顿第二定律指出，物体动量的变化率等于作用在物体上所有外力的合力，即

$$F = \frac{dp}{dt} \quad (4)$$

设垂直于光线传播方向的动量为 \overline{p}_\perp ，有

$$\frac{dp_\perp}{dt} = F_\perp = \frac{k_2 E_0 E_s}{r^2} \cos \phi \quad (5)$$

质点的角动量

$$L = r \times p = r \times mv = rmwr = mr^2 w \quad (6)$$

这里 w 为角速度。由于角动量 L 守恒，近似有

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{L}{m_0 r^2} \approx \frac{R \cdot m_0 c}{m_0 r^2} = \frac{cR}{r^2} \quad (7)$$

$$\frac{dp_\perp}{dt} = \frac{dp_\perp}{d\phi} \frac{d\phi}{dt} \approx \frac{cR}{r^2} \frac{dp_\perp}{d\phi} \quad (8)$$

联立(5) (8)式，并利用偏折角 γ 为小量，得

$$\frac{dp_\perp}{d\phi} \approx \frac{r^2}{cR} \frac{dp_\perp}{dt} \approx \frac{r^2}{cR} \frac{k_2 E_0 E_s}{r^2} \cos \phi \approx \frac{k_2 E_0 E_s}{cR} \cos \phi \quad (9)$$

而原动量

$$p = m_0 c \quad (10)$$

由爱因斯坦质能方程，有

$$E_0 = m_0 c^2 \quad (11)$$

得偏折角：

$$d\gamma \approx \frac{dp_\perp}{pd\phi} \approx \frac{k_2 E_0 E_s}{cR \cdot m_0 c} \cos \phi = \frac{k_2 m_0 c^2 E_s}{cR \cdot m_0 c} \cos \phi = \frac{k_2 E_s}{R} \cos \phi \quad (12)$$

在光从无穷远来在到无穷远去的过程中，积分有

$$\gamma \approx \frac{k_2 E_s}{R} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos \phi d\phi \approx \frac{2k_2 E_s}{R} = \frac{k_0 E_s}{R} \quad (13)$$

式中 γ 光线偏转角, k_0 与波长有关的系数, E_s 是太阳的亮度(发光强度), R 是光线从星球旁边经过时, 可见光与星球中心的最短距离。此结论可以推广到宇宙中的任意一个星球。由式可见影响光线弯曲程度的因素: (1) 可见光的波长, (2) 前置天体相应波长的发光强度, (3) 可见光与前置天体的距离。

太阳的总辐射[5]量(光度)约为 3.845×10^{26} 瓦(W)。亮度为单一方向的辐射量, 亮度 $E = \text{光度} / \text{球面积}$ $4\pi r^2$ 。太阳辐射能量在从宇宙线、X 射线到无限电波的整个电磁波谱区内, 99%以上在波长 0.15~4.0 微米之间。大约 50% 的太阳辐射能量在可见光谱区(波长 0.4~0.76 微米), 7% 在紫外光谱区(波长 < 0.4 微米), 43% 在红外光谱区(波长 > 0.76 微米), 最大能量在波长 0.475 微米处。太阳的半径为 6.955×10^5 km (就光球层言), 考虑到可见光与太阳的距离, R 取 697,000 km, 1919 年日全食期间, 由爱丁顿等人率领的两支观测队观测结果分别为 1.61" 和 1.98" 取平均值为 1.795"。1 瓦特 = 1 焦耳/秒 = 1 牛顿·米/秒, 由此可见光的系数为:

$$k_0(\lambda) = \frac{\gamma R}{E(\lambda)} = \frac{\gamma R}{\frac{L(\lambda)}{4\pi}} = \frac{4\pi\gamma R}{L(\lambda)} = \frac{4 \times 3.14 \times 1.795 \times 6.97 \times 10^8}{3.845 \times 10^{26} \times 50\%} = 8.178 \times 10^{-17} \text{ (} "m/W \text{)} \quad (14)$$

将(14)带入(13), 计算星球发光强度对可见光偏转的角度近似为:

$$\gamma \approx 8.178 \times 10^{-17} \frac{E(\lambda)}{R} \quad (15)$$

星球亮度 E (发光强度)单位: 瓦特(焦耳/秒), 距离 R 的单位: 米, γ 为光线偏转角, 单位: "。

3. 广义相对论时空观中的问题

广义相对论的时空观及其引力透镜原理存在如下问题:

3.1. 爱因斯坦发表广义相对论时并未对时空结构做详细的描述

爱因斯坦发表广义相对论时并未对时空结构做详细的描述, 更未对引力怎样弯曲时空作详细描述。因此爱因斯坦广义相对论的时空观, 只能作为一个假设。近年来对时空结构研究比较深入的是圈量子理论[6], 在此理论下, 时空被描述成呈背景独立, 由关系性循环织成的自旋网络铺成的时空几何。

3.2. 微观作用机理无法解释

对于有质量的物体, 引力会偏转物体的运动方向。但对于可见光来说, 光是由光子传播的, 光子无质量; 引力是由引力子传播的, 引力子和光子基本上不发生作用, 因此引力和光也不发生作用。引力弯曲光线从微观机理上无法解释。我们知道, 光线可以发生干涉、衍射, 同频干扰现象, 因此光线相交时会发生互相影响。“光线弯曲的同频互扰解释”[4]认为: 相交光线会互相作用, 影响光线的传播方向, 一般情况下, 光线偏转的程度太小, 我们观察不到, 只有光线从大质量发光星球旁边经过时, 可见光受发光星球发出的电磁波的连续作用, 会形成绕发光星球的圆弧, 这个圆弧恰似引力弯曲光线, 这是人们形成引力弯曲光线的原因。“光线弯曲的同频互扰解释”认为: 可见光从发光星球旁边经过时, 其光线弯曲程度与星球发光亮度成正比, 与该光线距离星球中心的距离平方成反比。

3.3. 碰撞星系中的不发光(可见光)炙热气体

广义相对论的好多结论都得到了验证。比如水星近日点进动等。但是不能回避的是, 引力弯曲光线从微观机理上无法解释, 但是大质量发光星球可以弯曲光线, 因此要找到引力弯曲光线从微观机理上无法解释的观测事实是困难的。还好碰撞星系中的不发光炙热气体为我们提供了证据。

宇宙中，星系间的相互碰撞和相互影响是非常常见的。一个星系大约由 1000 亿颗星球组成。因此一般会认为在一次星系间的正面冲击中，会发生无数次星球间的碰撞。事实上在这样的冲击中，两颗星球发生碰撞的概率近乎为零。这是因为尽管一个星系中有无数的星球，但由于星系的体积巨大，星球的密度其实很小。也就是说，星球的直径相对于星球间的平均距离而言是非常小的。这意味着两个星系发生碰撞时，各自星系中的星球将会穿过彼此而不对对方产生很大影响！然而一般的星系中星球间的空间并不是空无一物，而是充斥着气体和灰尘。这些物质会在星系碰撞过程中，在引力的作用下发生相互影响。碰撞中的星系会持续地划拉着对方星系中的气体和灰尘。这个过程中，气体间也会存在着摩擦力，产生冲击波。一般的这个过程将会持续数百万年，当我们赶上两个星系正好处于融合过程，我们可以抓拍到整个过程中某个阶段的一瞬间。在碰撞星系中，星系仅占星系团总质量的很小一部分，构成星系团总质量的主要成分是庞大的暗物质晕和炙热的气体云。气体云的热辐射可达数亿摄氏度，这使得它发出的 X 射线非常强。这些 X 射线可以通过专门的 X 射线望远镜观察到。对于可见光波段，大多数碰撞星系都存在透镜现象，传统的观点认为：根据引力透镜对源天体光线的弯曲程度，可以推算中间天体的质量分布。一般的，碰撞星系中，根据引力透镜反演的中间天体质量分布与通过 X 射线观测到的炙热气体分布是分离的。这说明引力透镜反演的天体质量并不包括炙热气体的质量，也就是说作为碰撞星系中主要质量的炙热气体对引力透镜的形成并未做出贡献，直白地说大量不发光的炙热气体(前置天体)并没有弯曲可见光，并没有弯曲它周围的时空。这与广义相对论时空观的猜想是矛盾的。合理的解释是：引力弯曲了物体的运动方向，光线从大质量发光星球旁边经过时，与大质量发光星球发出的电磁波连续作用，弯曲了光线。这样大量不发光的物质未弯曲光线才是合理地。

3.4. 大大缩小了远距离高亮度星球对光线弯曲的弯曲程度

天文观测显示：一般碰撞星系距离地球都比较远，我们之所以能观察到这些星系，是因为这些星系中的星球发光亮度比太阳的亮度大得多，对部分星球的统计显示：远距离星球的亮度/质量比是太阳亮度/质量比的上万倍。遥远星系的亮度比太阳亮 100 亿倍，这样从这些星球旁边经过的光线弯曲程度由光线互扰解释就相当于用“引力透镜”解释大了上万倍，遥远星系的更高，由弯曲光线反演的物质，光线互扰解释比用“引力透镜”解释少了上万倍，遥远星系的更少，这样在碰撞星系中就不存在由“引力透镜”原理反推出来的暗物质。远距离星系碰撞观测中光线互扰解释不会反演出暗物质，这符合天文观测的实际。多星系统的暗物质占比较低也说明了这个问题。

4. 常见碰撞星系实例

4.1. 子弹头星系



Figure 4. The collision of the Bullet Cluster (1E0657-558)
图 4. 子弹头星系团(1E0657-558)的互相碰撞

子弹头星系团(见图 4) (1E0657-56) [7]是两个星系团刚刚发生了高速对头碰撞形成的。图中蓝色代表通过引力透镜的方式测量到的物质(暗物质)分布, 红色展示的是通过钱德拉 X 射线空间望远镜测量的不发光的炙热气体的空间分布。可以明显看到引力透镜观察到的物质(暗物质)分布跟不发光的炙热气体物质分布明显不同, 证明不发光的炙热气体物质并未对引力透镜效应做出贡献。

4.2. MACS J0025.4-1222

MACS J 0025.4-1222 [8] (见图 5)是由两个星系团碰撞而成的星系团, 是大规模星系团调查(MACS)的一部分。所示图像是由哈勃空间望远镜 ACS 和 WFPC 2 探测器以及钱德拉 ACIS 探测器分别拍摄的。来自哈勃的可见光图像显示了引力透镜, 这使得天文学家可以推断出总质量(暗物质和正常物质)的分布(用蓝色表示)。在 X 射线中, 正常物质的分布主要以热气体的形式出现(粉红色)。它的分布是从钱德拉的数据中准确地映射出来的。从这些数据可以看出, 两个蓝色区域的大部分质量是暗物质。传统观点认为: 正常物质(粉红色)和暗物质(蓝色)之间的分离为暗物质提供了直接证据, 并支持暗物质粒子几乎完全通过重力相互作用的观点。本文认为: 炙热气体并未对引力透镜做出贡献, 也就是说不发光(可见光)并未弯曲时空。光线弯曲的同频互绕解释认为: 暗物质是引力透镜对光线弯曲的弯曲程度计算不足引起的。

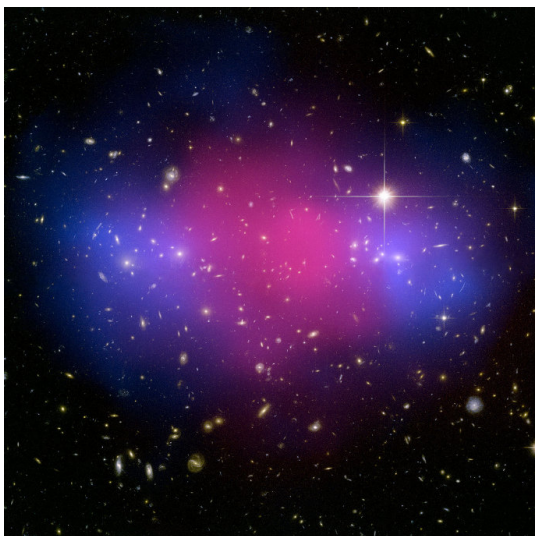


Figure 5. Collision between MACS J0025.4-1222

图 5. MACS J0025.4-1222 的互相碰撞

4.3. Abell 2744: 潘朵拉星系团

Abell 2744 [9] (见图 6)是潘朵拉星系团之一, 串联着星系, 星系团的炙热气体所发出的 X 射线(标示为红色)分布异于暗物质。利用重力透镜效应使得该影像背景星系失真的状况, 推论出暗物质(标示为蓝色)在这星系团占有 75%的质量。混乱起源于至少四个星系在过去数十亿年来缓慢地碰撞。这张影像一共结合了哈伯太空望远镜与超大望远镜的光学资料, 以及钱卓天文台的 X 射线影像。研究人员发现在可见光波段, 由甚大望远镜和哈勃空间望远镜观测的影像中的成员星系质量仅仅占据了阿贝尔-2744 星系总质量的 5%不到。其它大约 20%的质量是弥散的气体物质, 这些气体呈现高温状态, 发出强烈的 X 射线辐射, 因而能被钱德拉 X 射线望远镜观测到。剩下的是暗物质。研究人员表示, 在撞击过程中似乎造成了炙热气体和暗物质的分离, 因此它们两者暂时位于分开的位置上。撞击还导致这些物质和星系物质分离。靠

近星系群的中心位置可以观测到一个冲击激波区，这里是两个原始星系群的炙热气体相互高速撞击的区域。很明显暗物质在这次撞击中毫无影响地穿过去了。在这一星系群的其他位置，可以看到星系和暗物质，但是看不到热气体。这里的气体可能已经在撞击中被剥离了，留下的只是一些稀薄的痕迹。而在星系群的外部，还有更加特别的线索。这里存在大量的暗物质，但是可见物质很少。可见物质都被抛射出了更远的外缘位置，远离了均匀分布的地区。



Figure 6. Abell 2744: Pandora Galaxy Cluster

图 6. Abell 2744: 潘朵拉星系团

4.4. Abell 520 星系团

Abell 520 [10] (见图 7) 星系团的多波段合成图像，配色：绿，X 线(高温等离子体)；橙：光度分布(低温物质)；白，星系的可见光图像；蓝，暗物质分布。

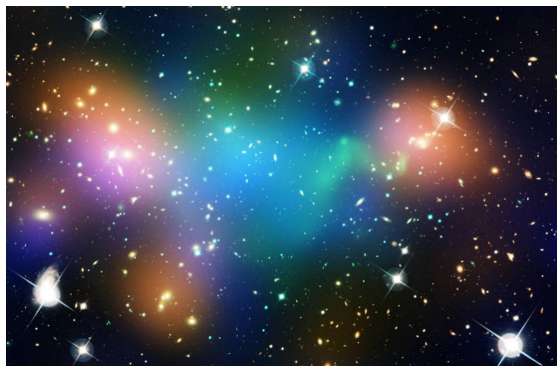


Figure 7. Abell 520 galaxy cluster

图 7. Abell 520 星系团

4.5. NGC 6338

利用 NASA 的钱德拉 X 射线天文台、ESA 的 XMM-Newton、巨型米波射电望远镜(GMRT)以及新墨西哥州阿帕奇点天文台的光学观测，一组天文学家发现两个星系群在惊人的速度，每小时约 400 万英里。这可能是两个星系群之间迄今为止最猛烈的碰撞。该系统称为 NGC 6338 [11] (见图 8)，距离地球约 3.8 亿光年。这张合成图像包含来自 Chandra 的 X 射线数据(显示为红色)，显示温度高达约 2000 万摄氏度的热气体，以及用 Chandra 和 XMM 检测到的更冷的气体(显示为蓝色)，它们也发射 X 射线。钱德拉数据

与斯隆数字巡天的光学数据相结合，以白色显示星系和恒星。研究人员估计，NGC 6338 中包含的总质量约为太阳质量的 100 万亿倍。这一显着的重量，大约 83% 是暗物质，16% 是热气体，1% 是恒星。



Figure 8. NGC 6338

图 8. NGC 6338

4.6. 小结

从上面这些观察图片可以看出，由 X 射线反映的炙热气体分布和引力透镜反演的物质质量分布都出现了分离现象。传统的观点认为这是暗物质的有力证据，本文认为：X 射线反映的炙热气体分布和引力透镜反演的物质质量分布的分离现象说明作为碰撞星系主要质量的炙热气体对引力透镜现象并未做出贡献，也就是说不发光的炙热气体并未弯曲周围时空。

5. 结论

1916 年爱因斯坦发表了广义相对论，在广义相对论中，爱因斯坦将引力等效为时空的弯曲，并由此推论出引力会弯曲光线和引力透镜现象。当时爱因斯坦并未对时空结构做出描述，也未对引力怎样弯曲时空做出说明，因此弯曲的时空结构只能说是一个假设。我们知道光线是由光子传播的，引力是由引力子传播的，光子和引力子基本不发生作用，因此引力弯曲光线从微观机理上无法解释。光线弯曲的同频互扰解释认为：光线可以发生干涉、衍射和同频干扰现象，因此光线弯曲是由可见光经过大质量发光星球旁边时，可见光与发光星球发出的电磁波连续作用的结果。碰撞星系的观测表明：在星系碰撞过程中存在大量不发光的炙热气体，同时可见光观测存在引力透镜现象，由引力透镜反演的星系质量分布与炙热气体的质量分布分离。传统的观点认为这是暗物质的有力证据。本文认为：不发光的炙热气体并未对引力透镜现象做出贡献，也就是说不发光的炙热气体并未弯曲可见光，也就是说不发光的炙热气体并未弯曲它周围的时空。这才会出现由引力透镜反演的星系质量分布与炙热气体的质量分布分离现象。此现象说明广义相对论的时空结构不存在。光线弯曲的同频互绕解释认为：光线的弯曲程度与发光星球的亮度成正比，与可见光与星球中心的距离成反比。一般的，高亮度星球的光质比远远大于太阳的光质比，高亮度发光星球对可见光的弯曲程度比太阳弯曲光线的弯曲程度大得多，碰撞星系中的暗物质是引力透镜对大质量发光星球对可见光弯曲光线的弯曲程度计算不足造成的。

参考文献

- [1] 赵峥. 爱因斯坦与广义相对论的诞生(续)——纪念广义相对论发表 100 周年[J]. 大学物理, 2015, 34(12): 1-5.
- [2] 杨晓松, 蹇继贵. 光线在高密度星体旁的引力弯曲[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 1996, 18(1): 99-101.
- [3] 傅莉萍, 束成钢. 引力透镜的基本原理及最新研究进展[J]. 天文学进展, 2005, 23(1): 56-69.
- [4] 陈军利. 光线弯曲的同频互扰解释——碰撞星系团中不存在“引力透镜”推演出的暗物质[J]. 天文与天体物理, 2024, 12(3): 44-55.
- [5] 百度百科. 太阳辐射[EB/OL].
https://baike.baidu.com/item/%E5%A4%AA%E9%98%B3%E8%BE%90%E5%B0%84/5211804?fr=ge_al, 2024-09-23.
- [6] 许霖. 环圈量子引力简介[J]. 物理通报, 2007, 28(3): 53-55.
- [7] Bradač, M., Clowe, D., Gonzalez, A.H., Marshall, P., Forman, W., Jones, C., *et al.* (2006) Strong and Weak Lensing United. III. Measuring the Mass Distribution of the Merging Galaxy Cluster 1ES 0657-558. *The Astrophysical Journal*, **652**, 937-947. <https://doi.org/10.1086/508601>
- [8] Bradač, M., Allen, S.W., Treu, T., Ebeling, H., Massey, R., Morris, R.G., *et al.* (2008) Revealing the Properties of Dark Matter in the Merging Cluster MACS J0025.4-1222. *The Astrophysical Journal*, **687**, 959-967. <https://doi.org/10.1086/591246>
- [9] Merten, J., Coe, D., Dupke, R., Massey, R., Zitrin, A., Cypriano, E.S., *et al.* (2011) Creation of Cosmic Structure in the Complex Galaxy Cluster Merger Abell 2744. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **417**, 333-347. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19266.x>
- [10] Hoang, D.N., Shimwell, T.W., van Weeren, R.J., Brunetti, G., Röttgering, H.J.A., Andrade-Santos, F., *et al.* (2019) Radio Observations of the Merging Galaxy Cluster Abell 520. *Astronomy & Astrophysics*, **622**, A20. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833900>
- [11] Wang, Y., Lui, F., Shen, Z., Wang, J., Hu, D. and Xu, H. (2019) Revealing a Head-On Major Merger in the Nearby NGC 6338 Group with Chandra and VLA Observations. *The Astrophysical Journal*, **870**, Article 132. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaf234>