

# 三种情形下引力质量与惯性质量等价关系的探讨

苑新喜

中国地质大学(武汉)数学与物理学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2024年4月23日; 录用日期: 2024年5月23日; 发布日期: 2024年5月31日

## 摘要

从“狭义相对论意义上的静质量是引力源”这一论点出发, 分别对三种情形探讨了引力质量与惯性质量这二者的等价关系。第一种情形是微观世界的基本粒子, 诸如电子和质子这些粒子的引力质量与惯性质量明显不等价, 这主要由于它们自身的电磁质量; 第二种情形是宏观世界的中性物体, 这些物体的引力质量与惯性质量几乎相等, 这主要由于原子核的结合能; 最后一种情形是宇宙世界中的恒星(如太阳), 这些恒星的引力质量与惯性质量不等价, 这主要因为它们自身的核燃烧。对于宇宙整体而言, 宇宙总的引力质量在不断减少而总的惯性质量却保持不变, 宇宙加速膨胀在某种程度上可能与此有关。

## 关键词

引力质量, 惯性质量, 电磁质量, 结合能, 核燃烧

## Discussing Equality of Gravitational and Inertial Masses in the Three Cases

Xinxi Yuan

School of Mathematics and Physics, China University of Geosciences, Wuhan Hubei

Received: Apr. 23<sup>rd</sup>, 2024; accepted: May 23<sup>rd</sup>, 2024; published: May 31<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

From the viewpoint of “rest mass in terms of special relativity is the source of gravity”, the equality of inertial and gravitational masses is discussed in the three cases. In the first case of elementary particles in the microscopic world, the inertial and gravitational masses of particles such as electrons and protons are obviously not equal mainly due to their electromagnetic masses; In the

second case of uncharged objects in the macroscopic world, the inertial and gravitational masses of the objects are nearly equal mainly due to bound energies of atomic nucleus. In the last case of fixed stars (like the Sun) in the cosmological world, the inertial and gravitational masses of the stars are not equal mainly due to nuclear burning. As to the whole universe, the total gravitational mass of the universe is reducing while the total inertial mass of it maintains constant, and then accelerated expansion of the universe might be to some extent related to this situation.

## Keywords

Gravitational Mass, Inertial Mass, Electromagnetic Mass, Bound Energy, Nuclear Burning

Copyright © 2024 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. 引言

质量是物理学的最基本概念之一。最初由牛顿第二定律和牛顿万有引力定律分别引出了惯性质量与引力质量的概念[1] [2] [3], 后来由爱因斯坦的狭义相对论及其著名的质能关系(即  $E = mc^2$ )又引出了静质量、运动质量和电磁质量等概念[4] [5]。然而至今鲜有作者结合静质量、运动质量和电磁质量等概念来探讨引力质量与惯性质量的等价关系, 这或许因为爱因斯坦的广义相对论认为场质量(如引力场质量)也具有引力效应的论点使人们失去了对此研究的兴趣。进一步, 人们对惯性质量与引力质量等价关系的实验验证也仅仅局限于宏观中性物体, 从而形成了一种思维定势, 因此鲜有作者探讨微观基本粒子(如电子质子)和宇观恒星(如太阳)等情形下引力质量与惯性质量的等价关系。本文突破了上述两种思维界限, 明确指出微观基本粒子和宇观恒星的引力质量与惯性质量不等价, 并且给出了一定的理据。

## 2. 基本的理论研究基础

根据爱因斯坦创立的狭义相对论, 一个静质量  $m_0$  为的物体以速度  $v$  运动时, 其运动质量为  $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ 。  $m_0$  具有相对论不变性, 类比电荷的相对论不变性, 本文作者在 2011 年提出了“狭义相对论意义上的静质量  $m_0$  是引力源”的论点[6], (这即意味着不是所有形式的质量都具有引力效应), 从而自然地引出了一组引力场的麦克斯韦方程组[7]及其改动[8]。随后, 本文作者明确指出: 由动能贡献的那部分运动质量(即  $m - m_0$ )和场质量(如相对论的电磁场质量)都不具有引力效应[8]。这里必须指出的是, 麦克斯韦不仅是经典电磁场理论的集大成者, 也是引力场与电磁场的类比(简称为质电类比)研究的一位先行者。自麦克斯韦提出质电类比思想以来, 历史上大同小异的引力场的麦克斯韦方程组又被其他研究者数次提出。作者的独创之处就在于将牛顿的万有引力定律中引力质量限定于爱因斯坦狭义相对论的静质量  $m_0$ , 从而给引力源(即引力荷)赋予了相对协变性。又经过近十年的努力, 2022 年作者又通过质电类比, 以引力荷(引力质量)的量子化很巧妙地化解了麦克斯韦提出的已悬疑了近一百六十年之久的引力场负能量问题[9]。引力场负能量问题的澄清进一步加强了质电类比这一物理思想和“狭义相对论意义上的静质量  $m_0$  是引力源”的这一论点的理论基础。

狭义相对论除了引出了“静质量”的概念, 还引出了“电磁质量”的概念。电磁场具有一定的能量。根据狭义相对论的质能关系, 电磁场的能量对应一定的质量, 该质量称为带电体的电磁质量。十余年来, 作者发现(宏观)电磁场运动时的能量(电磁质量)及动量, 不仅与运动速率有关, 还与电磁场的空间分布形

状、运动方向[10] [11]、介电常数、磁导率[12] [13]、波模和波矢[14]等有关。但是具有静质量  $m_0$  的物体运动时，其运动质量  $m$  及其动量只与运动速率有关！再加上“4/3 problem” [15]等问题，这表明电磁质量与静质量  $m_0$  或许有着完全不同的物理本质。这为作者前面提及的相对论电磁质量不具有引力效应的说法提供了有力的理论依据。就此相关问题作者在文献[15]中已有详细讨论，此不赘述。

### 3. 微观粒子的情形

物质世界中构成分子原子的实物粒子是电子、质子和中子这三种微观基本粒子。其中，电子是第一个被发现的基本粒子，也是目前应用相对最多和认知相对最清楚的基本粒子，具有相当的代表性，因而我们在此重点讨论电子的引力质量与惯性质量。

电子的引力质量与惯性质量的等价关系必然涉及电子的电磁质量。电子带有一个基本元电荷，这个元电荷所激发的电磁场就是电子自身的固有电磁场。根据质量能量关系，电子这个固有电磁场的能量对应着一定的质量，这个质量称为电子的电磁质量。通常认为，电子的质量至少由非电磁起源质量和源自于电磁场能量的电磁质量这两部分组成。但是，电子的电磁质量至今仍是物理学中一个悬而未决的基础问题[4] [5]。基于电磁质量与静质量  $m_0$  有着完全不同的物理本质的认知，我们认为电子的电磁质量不是电子已知的静质量  $m_0 = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$  (0.511 MeV)的组成部分， $m_0$  只对应着电子的非电磁起源质量。因此，电子的物理质量  $m$  是  $m_0$  再加上另外的电磁质量  $m_{EM0}$  构成，即  $m = m_0 + m_{EM0}$ 。基于这种认知，我们通过对康普顿散射[16]、Bertozzi 电子加速[17]、电子对湮灭[18]和戴维孙 - 革末电子衍射(已录用)等实验数据的分析，就电子的电磁质量给出了一个定量参考结果，即电子的电磁质量  $m_{EM0}$  与其已知的静质量  $m_0$  比值在 5% 左右，折合  $m_{EM0}$  约为 0.026 MeV。因为现有实验数据有限，目前也不能排除这个比值高达 8% 的可能。考虑到分子原子中的质子和中子的质量都比电子大一千八百多倍，因此即使这个比值高达 8%，对分子原子的质量的影响也很小。

这里我们需要明确指出，目前人们对电子静质量  $m_0 = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$  的认知基本全部根源于电磁作用，如荷质比实验和均匀磁场电子运动等，还没有一个根源于引力作用的独立的实验认知。若能用引力效应测量电子的质量则能消除这一认知盲区。进一步，电子是实验技术上最容易被操控的微观粒子，以目前的科技发展水平，电子的电磁质量是否具有引力效应这一论点其实可以不需要大科学装置就能验明。对电子的电磁质量的实验测量也是如此[19]。

阐明了电子的电磁质量  $m_{EM0}$  与其静质量  $m_0$  的关系后，电子的引力质量与惯性质量的等价关系就自然清晰了。静质量  $m_0$  同时具有引力效应与惯性效应，对引力质量与惯性质量具有同等贡献，但是电磁质量  $m_{EM0}$  只具有惯性效应，不具有引力效应，因而其只对惯性质量都有贡献而对引力质量无贡献。如此看来，电子的引力质量与惯性质量完全不等价，且惯性质量要大于引力质量。进一步，就目前的实验数据看来，微观世界中电子的引力质量与惯性质量完不等价关系是明显的。

质子和电子一样也带有一个基元电荷，同样具有一定电磁质量。同样由于电磁质量只具有惯性效应而不具有引力效应，质子的引力质量与惯性质量在理论上也完全不等价，惯性质量大于引力质量。相对于电子的情况，目前我们对于质子的电磁质量了解得更少，但是由于质子的静质量远大于电子，质子的电磁质量与其静质量的比值应该比电子更小。可以估算一下这个比值小到 0.5% 时，对应的电磁质量也高约 5 MeV，远大于电子的静质量，大约与原子核中一般核子的平均结合能(比结合能) [20]相当。同样，以目前的科技水平应用非电磁效应(或引力效应)测出质子的引力质量与惯性质量不等价程度不是不可能的。进一步，考虑到质子内部可能的结构及其影响，质子的引力质量与惯性质量不等价程度实验测量是很值得一试的。

最后，尽管中子不具有电荷，但中子的磁矩不为零，说明其内部也有一定的电磁结构，也应具有一

定的电磁质量。因此中子的引力质量与惯性质量在理论上也完全不等价，惯性质量大于引力质量。至于中子的引力质量与惯性质量不等价程度，现在不便妄言。可以估算，若中子的电磁质量与其静质量的比值是 0.05%，中子的电磁质量约为 0.5 MeV，近乎一倍于电子的静质量。

电子、质子和中子都有静质量，也激发引力场。类比电磁场的电磁质量，我们认为这个引力场的场质量也仅仅具有惯性效应而不具有引力效应，这在理论上也影响着这三种粒子的引力质量与惯性质量的等价关系，只不过因为微观粒子的引力作用比起它们的电磁作用太微弱，这个影响在此可以忽略不计。同时，我们认为上面对质子和中子的电磁质量的数值估算对于相关问题的思考具有一定的参考性。

#### 4. 宏观物体的情形

现在已知，中性宏观物体的引力质量与惯性质量在实验测量中以很高的精度等价，这是爱因斯坦广义相对论最重要的实验基础。但我们认为这个实验基础存在两点不足，一是还没有从已知的物质结构组成的理论角度去说明这种高精度的等价关系；二是实验中所用的等价测量物质常常局限于常温下的固体材料如铜铁类，缺乏气体材料如氢氦类，因此实验材料种类不够全面，代表性不足。对于以上这两点不足，我们下面给出详细的论述。

首先，从物质结构组成上看，宏观物体由分子原子构成，分子原子又由电子、质子和中子这三种实物粒子的组成。当电子、质子和中子这三种微观基本粒子结合成分子原子时，分子原子的质量不是电子、质子和中子这三种粒子的质量的简单相加，存在着因结合能而引起的“质量亏损”[20]。我们认为，质量亏损正是基本粒子引力质量与惯性质量不等价而中性宏观物体的引力质量与惯性质量却在实验测量上高精度等价的原因。

质量亏损最显著地表现于由质子和中子生成原子核的过程中。由原子核的质量亏损反推出的一般原子核中质子和中子的平均结合能高达 8 MeV [21]。这么高的结合能包含着库仑能、核的体积能和核的表面能等[22]，可知结合能来源不是单一，既有电磁作用，也有核力作用和其他作用。因此，一般原子核里质子和中子的平均结合能是不同来源的能量的最后的净余能量。我们认为，与这些结合能对应的亏损质量都具有惯性效应，但不可能所有的亏损质量都具有引力效应，仅仅其中部分亏损质量具有引力效应。也就是说，尽管处于独立自由状态时，质子和中子总的惯性质量大于引力质量，两种质量不等价；但组成原子核后，由于质量亏损，质子和中子总的引力质量与惯性质量都减少了，但惯性质量比引力质量减少得更多，使得原子核的惯性质量与引力质量趋于等价。我们认为，这就是宏观物体的引力质量与惯性质量在现有实验测量中以很高的精度等价的根本原因。目前，人们在自然界物质结构组成方面已经积累了足够丰富的认知，这些认知或许可以为高精度等价的实验结果提供了一种理论解释，本文是一个初步的尝试。

每种原子核对应的平均结合能不同，结合能中具有引力效应的能量占比也会不同。核力的本质是强作用，是一种短程作用(介子的静质量不为零)，这与长程的电磁作用完全不同(介子的静质量为零)，因此核力作用场的场质量在多大程度上具有引力效应目前难以判定，所以目前我们无法给出这个占比的一个具体量值，但是这个占比关联着质子和中子引力质量与惯性质量不等价的程度，因此它应有一个较大的理论探讨空间。反之，引力质量与惯性质量高精度等价的实验结果实际上限定了质子和中子引力质量与惯性质量不等价的程度，即一个质子和一个中子总的引力质量与惯性质量的差值不会超过铜核或铁核对应的平均结合能(比结合能)的两倍。

其次，我们注意到，正氢原子只有质子而无中子，其引力质量与惯性质量等价状况基本上与质子无异，也是不等价的，这是因为正氢原子只包含一个质子和电子，质子的质量约是电子的一千八百多倍，在考虑氢原子的质量时，电子的质量基本上可以忽略不计。另外，氦原子核与氢原子核的质子和中子的



平均结合能在 3 MeV 以下[23], 远低于一般原子核的平均结合能。据此我们认为, 氢原子(分子)和氦原子(分子)这些具有极轻核的原子(分子)不同于其它的具有重核的原子(分子), 在引力质量与惯性质量等价关系上具有很大的特异性, 会表现出明显的不等价。目前恰恰缺少以氢氦类物质作为测量对象的引力质量与惯性质量等价实验。这说明目前已有的引力质量与惯性质量等价实验还不够全面, 这可以看成是等价实验的一个不足之处。

对氢氦类物质进行引力质量与惯性质量等价实验测量和验证是有意义的。设想如果氢原子的引力质量与惯性质量不等价, 考虑到地球上海水分布的不均匀性, 这个不等价会引起地球的引力质量中心与惯性质量中心不重合等一系列衍生问题, 其中就有可能涉及地球的自转问题。

除了上述原子核形成时的结合能, 由微观基本粒子电子、质子和中子形成宏观物体的过程中, 还存在着另外三种根源于电磁作用的结合能。一是原子内部的核外电子与原子核的结合能, 二是分子内部的原子与原子之间的结合能, 三是分子之间的结合能。这三种结合能同原子核的结合能相比太小, 可以暂时忽略, 在此就不展开讨论了。对于与这三种结合能对应的微观粒子间引力作用能也是如此。

## 5. 宇观恒星的情形

宇观中的恒星是高度稳定的天体, 在宇宙的演化中扮演着非常重要的角色。恒星在其自身演化过程中会有不同的形态, 我们这里所讨论的恒星是太阳一类的恒星, 即宇宙中的光明所在, 我们认为这类恒星的惯性质量与引力质量不等价。

从物质存在形态上看, 恒星(如太阳)与一般宏观物体的一个显著的区别在于恒星一直处于核燃烧(即热核反应[24]或热核燃烧[25])状态。因此可形象地把恒星(如太阳)比喻成一个“大火球”, 在这种状态下恒星蕴含着巨量的光能与热能(动能), 而光能与热能(动能)在我们看来都只具有惯性效应而不具备引力效应, 这是恒星的惯性质量与引力质量不等价的一大原因。准确一点说, 恒星的惯性质量大于引力质量。

从物质化学组分上看, 氢是恒星中含量最多的元素[24] [25], 前面已说过氢元素的惯性质量与引力质量是不等价的。氦是恒星中含量第二多的元素[24] [25], 在我们看来, 氦的惯性质量与引力质量也不会等价。这是恒星的惯性质量与引力质量不等价且惯性质量大于引力质量的另一大原因。

恒星(如太阳)核燃烧中的质量亏损是恒星的主要能量来源, 质量亏损约占其静质量的千分之一[24]。这个质量亏损从宏观上看似乎很小, 但在微观上若平摊到每个质子和中子上则是相当可观的。由于静质量具有引力效应, 恒星因此处于一个自身引力质量不断减少的状态中。恒星这部分亏损的静质量实际上释放成宇宙中只具有惯性效应而不具有引力效应的物质(物体)运动的动能(或运动质量)。因此, 放眼整个宇宙来说, 宇宙总的引力质量在不断减少而总的惯性质量却保持不变, (如同每个气体分子若其内部的仅极小部分能量(如 1 eV)转化为气体分子无规则热运动的动能则必导致体系的压强明显增加一样), 宇宙加速膨胀在某种程度上可能与此有关。

## 6. 结论

本文从微观、宏观和宇观等三个尺度上探讨了引力质量与惯性质量的关系。在微观尺度上, 电磁能量对基本粒子的引力质量与惯性质量的等价关系扮演着重要角色, 十分必要用非电磁方法(引力方法)对基本粒子的质量进行测量。在宏观尺度上, 原子核内中子和质子的平均结合能是宏观物体的引力质量与惯性质量的实验测量上高精度等价的关键因素, 对于氢氦类物质的引力质量与惯性质量的等价关系测量是必要的。在宇观尺度上, 核燃烧是导致恒星(如太阳)的引力质量与惯性质量的不等价一个重要因素, 总体上宇宙引力质量与惯性质量的不等价或许是宇宙加速膨胀的一个原因。我们认为, 引力作用作为自然界中最基本和最广泛的作用, 在原子核物理与高能物理中完全忽略引力作用是不妥当的, 这或许延缓物理

大统一理论的发展。

总之, 引力质量与惯性质量的等价关系是物理学的一个基本问题, 对引力质量与惯性质量的等价关系的探讨可以为我们的研究微观粒子、核力和宇宙演化等问题提供一个独立的视角。

## 参考文献

- [1] 刘辽, 赵峥. 广义相对论[M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2004: 4.
- [2] 俞允强. 广义相对论引论[M]. 第2版. 北京: 北京大学出版社, 1997: 40-41.
- [3] 陈斌. 广义相对论[M]. 北京: 北京大学出版社, 2018: 82.
- [4] 郭硕鸿. 电动力学[M]. 第3版. 北京: 高等教育出版社, 2008: 226, 259.
- [5] 蔡圣善, 朱耘, 徐建军. 电动力学[M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2002: 294, 394.
- [6] 苑新喜. 对脉冲双星 PSR1913+16 引力辐射计算的一个注解[J]. 中国基础科学, 2011, 13(6): 12-13.
- [7] 苑新喜. 关于引力理论的一点探讨性思考[J]. 中国基础科学, 2012, 14(3): 22-24.
- [8] 苑新喜. 对引力红移的一种探索性解释[J]. 中国基础科学, 2012, 15(2): 11-13.
- [9] 苑新喜. 由电荷的量子性看静电场的能量计算[J]. 物理通报, 2022(9): 25-28.
- [10] 苑新喜. 带电体低速运动时的电磁场能量和动量[J]. 物理通报, 2014(10): 24-26.
- [11] 苑新喜. 光学谐振腔运动时电磁场的能量和动量[J]. 激光杂志, 2015, 36(11): 110-112.
- [12] 苑新喜. 电容器和螺绕环运动时电磁场的能量[J]. 空间电子技术, 2016, 13(1): 20-23.
- [13] 苑新喜. 电容器和螺绕环运动时电磁场的动量[J]. 电气电子教学学报, 2019, 41(1): 65-68.
- [14] 苑新喜. 微波谐振腔运动时电磁场的能量和动量[J]. 雷达科学与技术, 2016, 14(2): 198-201.
- [15] 苑新喜. 关于电子电磁质量问题的一点探讨[J]. 甘肃科技纵横, 2016, 45(11): 70-74.
- [16] 苑新喜. 应用康普顿散射研究电子的电磁质量[J]. 甘肃科技纵横, 2015, 44(5): 39-41, 66.
- [17] 苑新喜. 应用 Bertozzi 实验研究电子的电磁质量[J]. 实验科学与技术, 2016, 14(2): 4-7.
- [18] 苑新喜. 电子对湮灭第一个实验数据的启示[J]. 电子技术, 2021, 50(3): 46-48.
- [19] 苑新喜. 应用光电效应研究电子电磁质量的试验设计[J]. 电子测试, 2018(3): 74-76.
- [20] 崔宏滨. 原子物理学[M]. 第2版. 合肥: 中国科技大学出版社, 2012: 370, 372.
- [21] 朱林繁, 彭新华. 原子物理学[M]. 第2版. 合肥: 中国科技大学出版社, 2017: 362.
- [22] 杨福家. 原子物理学[M]. 第5版. 北京: 高等教育出版社, 2019: 276.
- [23] 过惠平. 原子核物理导论[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2017: 22.
- [24] 李宗伟, 肖兴华. 天体物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 10, 156.
- [25] 刘润乾. 恒星物理[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2006: 279.