



物质场理论

—— 狭义相对论中的引力场和电磁场

Material field theory

The gravitational field and electromagnetic field in special relativity

陈其翔 著



科学技术文献出版社
SCIENTIFIC AND TECHNICAL DOCUMENTATION PRESS

物质场理论

——狭义相对论中的引力场和电磁场

陈其翔 著



科学技术文献出版社
SCIENTIFIC AND TECHNICAL DOCUMENTATION PRESS

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

物质场理论: 狭义相对论中的引力场和电磁场/陈其翔著. —北京: 科学技术文献出版社, 2017. 1

ISBN 978-7-5189-2149-2

I. ①物… II. ①陈… III. ①引力场—研究 ②电磁场—研究 IV. ①O314
②O441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 289357 号

物质场理论——狭义相对论中的引力场和电磁场

策划编辑: 杨茜 责任编辑: 孙江莉 杨茜 责任校对: 赵媛 责任出版: 张志平

出 版 者 科学技术文献出版社
地 址 北京市复兴路 15 号 邮编 100038
编 务 部 (010) 58882938, 58882087 (传真)
发 行 部 (010) 58882868, 58882874 (传真)
邮 购 部 (010) 58882873
官 方 网 址 www.stdp.com.cn
发 行 者 科学技术文献出版社发行 全国各地新华书店经销
印 刷 者 虎彩印艺股份有限公司
版 次 2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷
开 本 850 × 1168 1/32
字 数 92 千
印 张 4.125
书 号 ISBN 978-7-5189-2149-2
定 价 28.00 元



版权所有 违法必究

购买本社图书, 凡字迹不清、缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换

序 言

狭义相对论是一个严密、完善、自洽、普适的理论。过去有不少学者，由于理解不透，以及受固于经典力学概念，对其还有很多保留和限制。例如，有人认为狭义相对论只适用于匀速运动，而加速运动要用广义相对论。大量的所谓佯谬出现在讨论狭义相对论的理论书、教科书和科普读物中。不少书中说，双生子佯谬中有加速运动，狭义相对论不能解决，要用广义相对论才能解决，等等。作者认为，对狭义相对论作的任何保留和限制都是没有根据的，任何所谓佯谬都是由于对狭义相对论理解不透，以及残留经典力学概念产生的。

特别是，狭义相对论的创建者，在引力问题上背离了它，而另寻其他途径。由于牛顿引力定律经洛伦兹变换后会改变其形式，他错误地认为，引力定律不符合狭义相对论，并由此建立了广义相对论作为狭义相对论的推广。把具有引力场的时空，表示成黎曼几何的弯曲时空，物体沿着弯曲时空的短程线运动。

物理学中，物质之间的相互作用通常是采用“场”

的概念，而不用时空的弯曲来描述。如果当时牛顿采用弯曲的三维空间和一维时间来描述引力，天体力学不可能发展得如此迅速。

对牛顿引力定律进行洛伦兹变换，方程的形式会发生改变。正是这种改变，可以从牛顿引力定律导出一条新的规律。当物质运动时，引力场并不是单一的三维矢量形式，在物质周围可产生一种类似于磁场的场，称为动引力场。引力场与动引力场形成一对场，二者互相关联，合起来称为引动场，构成四维反对称二阶张量形式。动引力场的力学效应类似于电学中的洛伦兹力，可对其他运动物体产生作用力。在天体运动中考虑到它的作用后，对牛顿引力是一种修正。

为什么磁场很早就被发现，而动引力场没有及早被发现呢？那是因为电磁场比引动场强得多，磁场容易被发现。又因为电荷运动的速度很快，产生的磁场较强。物体的运动较慢，动引力比静引力小 v^2/c^2 倍，因此动引力不易被发现。此外，在自然界存在铁磁性物质，磁力可加大很多倍，磁场容易被发现。

狭义相对论认为，惯性坐标系中的四维时空是平直的。当物质在惯性系中做匀速运动时，物质在四维时空中运动形成的世界线为直线。当物质的运动受到外力作用时，其运动速度不是匀速的，使世界线发生弯曲。当

物质在引力场作用下做变速运动时，四维时空仍是平直的，但世界线为曲线。引力场只是使物质粒子运动的世界线弯曲，而不是使时空弯曲。

多种因素都可使世界线的时空尺度改变：物质的运动速度可使时空尺度改变，物质受引力作用和带电物质受电磁场作用，也可使时空尺度改变。因此需要找出使世界线时空尺度发生改变的最本质的原因。

时空度规所描述的，不是弯曲时空的几何特性，而是物质在平直的时空中运动，形成弯曲世界线的几何特性。文中得出，有心引力作用下弯曲世界线的时空度规，它的弱场近似与史瓦西度规形式上一致。看来，史瓦西度规只适用于较弱的引力场，不能用于强引力场情况，更不能用来研究例如黑洞等问题。

德布罗意认为基本粒子可表示为有周期性振动的驻波，当粒子以一定速度运动时，运用洛伦兹变换，驻波变为相波即 ψ 波，其相速大于光速。 ψ 波的振幅不仅具有概率解释，而且具有实际的物理意义。驻波的振幅应该包含一个奇点，远离奇点处振幅要逐渐衰减。

所谓驻波是指，空间各点振动的相位只随时间作周期性变化，不随距离变化；而行波是指空间各点振动的相位既随时间，也随距离作周期性变化。过去认为，驻波是行波在一定的边界条件下形成的，如两端固定的弦

形成驻波。基本粒子的驻波并不是由行波在一定的边界下形成的。过去还有另一种观点，认为粒子是有一定大小的“波包”。它是由一组频率相近的行波叠加组合而成。“波包”在行进过程中会发散，不稳定，因而是错误的。量子力学的正统学派，只承认波函数的统计结果，不承认波函数有实质性的物理意义，为纯概率解释，这与德布罗意的本意相违背。

物质场理论是运用狭义相对论，对引力场和电磁场做深入研究的理论，电磁场和引动场总称为物质场。库仑定律与牛顿引力定律有极强的相似性。选用适当的单位制，并引入虚数引力荷，可消除二者之间的差别。电磁场与引动场可用统一的公式表达，建立统一的物质场理论。

物质场分为电磁场和引动场两大类，两者具有统一性。物质场理论认为，宇宙中的物质都是由物质场及其振动构成的行波和驻波。过去的麦克斯韦方程组，只适用于电磁场的静态、恒稳态和行波态，缺少驻波态。为了扩大研究，把物质场包括电磁场和引动场，分为两种状态。物质场第一种状态——静态、恒稳态和行波态，仍保留麦克斯韦方程组。物质场第二种状态——驻波态，除满足真空条件外，其微分方程组需改变麦克斯韦方程组中的一个符号。

按物质场第一种状态，可建立物质场的波动方程，并得出物质场行波。物质场行波对应于电磁场为电磁波，相应的粒子为光子，是电磁相互作用的媒介；对应于引力场为引力波，相应的粒子为引力子，是引力相互作用的媒介。物质场理论中，引力子的自旋与光子一样为1。物质场行波只有单一的相位关系，这说明光子和引力子是中性的，不存在正反两种粒子。两天体在引力相互作用下做旋转运动，可激发出四极辐射的引力波，其振动模式与上述的引力波并不相同。

按物质场第二种状态，可建立物质场的驻波方程，并得出物质场驻波。物质场理论认为，所有的基本粒子是由物质场的振动形成的驻波，各种基本粒子的存在方式，就是物质场驻波不同的振动模式。驻波解显示出德布罗意对基本粒子提出的驻波的特点。驻波指数函数的变量为复数，虚部为时间项，实部为空间项。相位只随时间作周期性变化，而不随空间坐标作周期性变化。时间项可区分出两种相位关系，对应正反两种基本粒子。空间项为负实数，表示振幅随空间距离增大而衰减，即离驻波源越远振幅越小。

存在一种以矢势纵向分量和标势构成的波，是一种驻波转变成的相波，称为矢势纵波。其矢势与波矢有同向和反向两种状态，对应正反两种粒子。没有物质场与

它相伴，静质量接近于零。有振动就有能量，粒子必然接近于光速运动。粒子之间的相互作用是依靠场来实现，因此这类粒子与其他粒子的相互作用很弱。可以联想到，这就是中微子。

对物质场和势的驻波方程在球坐标中求解，可得出场和势在驻波中的分布情况。驻波解中除了给出振动相位随时间作周期性变化以外，还给出振幅随空间距离的分布函数和衰减的信息，以及振幅随空间方位角的分布函数。

以上是作者对物质场理论所做的简要说明。

作者 谨识

2016 年 9 月

目 录

第一章 物质场理论概论	1
1-1 物质质量的属性	1
1-2 库仑定律经洛伦兹变换后可导出毕奥-萨伐尔定律	2
1-3 牛顿引力定律可纳入狭义相对论, 引力场与动引力场形成一对场	3
1-4 广义相对论的观点——三个等效原理和引力场方程的非线性	4
1-5 三个等效原理和引力场方程的非线性不能成立	5
引力质量与惯性质量的物理实质不同, 二者不相等	5
引力场不等效于加速度	6
引力场不等效于时空弯曲	6
引力场方程应是线性的	7
1-6 质点在外力作用下弯曲世界线的变换因子和时空度规	7
1-7 物质场的两种不同状态	8
1-8 电磁场和引力场的统一场论	10
1-9 物质场行波、驻波和矢势纵波	10
物质场行波	10
物质场驻波	11
矢势纵波	12

驻波方程的球坐标解	12
第二章 伽利略变换与牛顿力学	14
2-1 伽利略变换与牛顿力学概述	14
相对性原理与伽利略变换	14
牛顿力学的三大定律	14
牛顿力学的万有引力定律	15
2-2 有心力作用下质点的角动量和势能	16
2-3 地球卫星的运动和发射	17
2-4 有心力作用下质点的运动方程和轨道方程	19
2-5 用牛顿力学计算光的引力偏转	21
用牛顿第二定律直接计算	21
用有心力作用下的轨道方程求解	22
2-6 用牛顿力学推导弗里德曼方程	22
第三章 狭义相对论简介	24
3-1 洛伦兹变换与尺缩钟慢	24
3-2 时间和空间的四维形式	25
3-3 时空间隔及固有时间间隔	27
3-4 四维速度矢量和三维速度合成公式	30
3-5 四维动量和四维力矢量	31
3-6 四维角动量和四维力矩	33
3-7 运动粒子的作用量	35
第四章 狭义相对论中纳入引力场	37
4-1 电磁场的基本方程	37
4-2 牛顿引力定律直接纳入狭义相对论，引动场的基本方程	39

4-3 牛顿引力定律经洛伦兹变换导出引力场的证明	41
4-4 四维密度流矢量和四维势矢量	44
四维密度流矢量	44
四维势矢量	44
4-5 物质在引力场中的运动方程和角动量定律	45
物质在恒定均匀引力场中的运动	46
运用光在引力场中的运动方程计算光的引力偏转	48
4-6 引力场的第一种状态——静态、恒稳态和行波态	50
物质场的两种状态	50
引力场第一种状态的最小作用量原理	51
引力场第一种状态的引力场张量和四维张量方程	53
引力场第一种状态的微分方程组	54
引力场的行波	55
标势和矢势的行波	56
4-7 引力场的第二种状态——驻波态	57
引力场第二种状态的微分方程组	57
引力场第二种状态的最小作用量原理	58
引力场第二种状态的引力场张量和四维张量方程	59
引力场的驻波	60
驻波的洛伦兹变换	62
标势和矢势的驻波	63
矢势纵波对应于中微子	64
驻波方程在球坐标中用分离变量法求解	65
第五章 世界线的弯曲因子和时空度规	67
5-1 尺缩钟慢效应与弯曲世界线的弯曲因子	67

匀速运动形成平直世界线时空尺度的变换因子 γ	68
引力形成的世界线的弯曲因子 ζ	68
运动速度不会改变世界线的弯曲因子	70
5-2 物质在引力作用下弯曲世界线的时空度规	71
弯曲世界线的时空度规	71
有心引力作用下弯曲世界线的时空度规	72
弱场近似	73
5-3 物质在引力作用下弯曲世界线时空度规的应用	74
光的引力红移	74
物体在有心引力作用下的循环坐标和守恒量	74
水星近日点的进动	75
光的引力偏转	77
5-4 带电粒子在物质场作用下弯曲世界线的弯曲 因子和时空度规	79
带电粒子在有心电场作用下弯曲世界线的弯曲因子和 时空度规	79
带电粒子在电场和引力的共同作用下弯曲世界线的 弯曲因子和时空度规	80
用弯曲世界线的时空度规计算带电粒子在有心电场 中的运动	81
第六章 电磁场和引力场统一的物质场理论	84
6-1 为建立引力场与电磁场统一的理论采取的措施	84
选用适当的单位制	84
引入虚数引力荷	85
物质场的基本公式	85
6-2 四维荷密度流矢量和四维势矢量	87
四维荷密度流矢量	87

四维势矢量	88
6-3 物质场的第一种状态——静态、恒稳态和行波态 ...	89
物质场第一种状态的最小作用量原理	90
物质场第一种状态的物质场张量	92
物质场第一种状态的微分方程组和物质场方程的 四维形式	93
6-4 物质场行波	94
物质场的行波方程及其行波解	94
物质场行波的洛伦兹变换	96
物质场行波的矢势和标势	97
6-5 物质场的第二种状态——驻波态	98
物质场第二种状态的微分方程组	99
物质场第二种状态的最小作用量原理	99
物质场第二种状态的物质场张量和物质场方程的 四维形式	100
6-6 物质场驻波	102
物质场的驻波方程及其驻波解	102
物质场驻波的洛伦兹变换	104
标势和矢势的驻波	105
矢势纵波对应于中微子	106
6-7 驻波方程在球坐标中用分离变量法求解	107
附录	111
附录一 爱因斯坦杰出的贡献	111
附录二 相对性原理, 洛伦兹协变性和不变性	115

第一章 物质场理论概论

1-1 物质质量的属性

物质的质量 m 存在两大属性，一为引力属性，二为惯性属性。牛顿引力定律中，物体的质量可产生引力，也可接受引力。这个性质称为物质的引力属性，引力质量 m_g 是物质引力属性的度量。牛顿力学第二定律中，物体做加速运动时，产生的惯性力与质量成正比。这个性质称为物质的惯性属性，惯性质量 m_i 是物质惯性属性的度量。在牛顿力学中，由于物体在引力作用下运动规律与其质量无关，可得出引力质量等于惯性质量。当进行伽利略变换时，引力质量和惯性质量都是不变量，并保持相等。

在狭义相对论中，当物质静止时，惯性质量 $m_i = m$ ， m 是静止质量。当物质以速度 v 运动时，惯性质量随着物体运动而增大 $m_i = \gamma m$ ， $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ 。惯性质量对洛伦兹变换不是不变量。惯性质量还与物质内部包含的能量 E 成正比 $E = m_i c^2$ 。对于粒子的波粒二象性，惯性质量与波动频率成正比： $\omega \hbar = m_i c^2$ 。

在相对论中，引力质量是否与惯性质量仍严格相等？为回答这个问题，有人曾做过很多精确的实验。但这些实验所证实的，实际上是“引力作用下运动规律与其质量无关”，而不是“引力质量与惯性质量相等”。爱因斯坦在牛顿力学概念的误导下，错误地认为相对论中引力质量仍应与惯性质量严格相等。

实际上，“在引力作用下，运动规律与其质量无关”并不等

效于“引力质量与惯性质量相等”。物质场理论认为，引力质量并不等于惯性质量。设 m 是静质量，简称为质量。引力质量 $m_g = m$ 与电磁场理论中的电荷一样，是四维标量，是洛伦兹变换的不变量。而惯性质量 $m_i = \gamma m$ 与能量一样是三维标量，对洛伦兹变换不是不变量。

1-2 库仑定律经洛伦兹变换后可导出毕奥-萨伐尔定律

由于电磁场的波动方程经洛伦兹变换后不改变其形式，爱因斯坦错误地认为，任何物理规律经洛伦兹变换后都应该不改变其形式。其实，相对性原理，洛伦兹协变性和洛伦兹不变性是三个不同的概念。

相对性原理是指：所有惯性参考系等效，物理规律相同；即在所有惯性参考系中，可建立相同的物理方程。洛伦兹协变性是指：一个物理量，或物理方程进行洛伦兹变换的可行性，是判断与狭义相对论是否相容的判据。洛伦兹不变性是指：经洛伦兹变换后，物理量或方程的形式不变。关于相对性原理，洛伦兹协变性和不变性，见附录二。

经典的电磁场理论中，电磁场存在一对场：电场和磁场。库仑定律和毕奥-萨伐尔定律是两个完全独立的定律。狭义相对论在两个定律之间建立了联系。库仑定律具有洛伦兹协变性，是与狭义相对论相容的，但不具有洛伦兹不变性。当对库仑定律进行洛伦兹变换时，方程的形式发生改变。正是这种改变，可以从库仑定律导出毕奥-萨伐尔定律。当电荷运动时，在周围可产生磁场。电场和磁场互相关联，这是狭义相对论的必然结果。

1-3 牛顿引力定律可纳入狭义相对论，引力场与动引力场形成一对场

牛顿引力定律与库仑定律结构上完全一样，可对其进行洛伦兹变换，是与狭义相对论相容的，但变换后也会改变方程的形式。物质场理论认为，牛顿引力定律可以直接纳入狭义相对论，作为引力理论的出发点。

牛顿引力定律不具有洛伦兹不变性，当对牛顿引力定律进行洛伦兹变换时，方程的形式会发生改变。正是这种改变，可以从牛顿引力定律导出一条新的规律：“当物质运动时，在周围还可产生一种类似于磁场的场，可对其他运动物体产生作用力，称为动引力场”。引力场与动引力场形成一对场，合起来称为引力场。引力场与动引力场互相关联，这也是狭义相对论的必然结果。

为什么电磁场很早就被发现，而动引力场一直没有发现它的存在呢？那是因为电磁场比引力场强得多，容易被发现。又因为电荷运动的速度很快，产生的磁场较强。物体的运动较慢，动引力比静引力还小 v^2/c^2 倍，因此动引力不易被发现。此外，在自然界存在铁磁性物质，磁力可加大很多倍，磁场容易被发现。

既然牛顿万有引力定律可写成与库仑定律结构上完全一致的形式，为什么爱因斯坦可以在狭义相对论中接受库仑定律，但对牛顿引力定律不具有洛伦兹不变性横加指责，认为不符合狭义相对论，而不能接受呢？或者他并未察觉库仑定律不具有洛伦兹不变性；或者是因为他对电动力学的偏爱和信任。他认为引力具有更复杂的性质：三个等效原理和引力场的非线性，并由此建立了广义相对论。