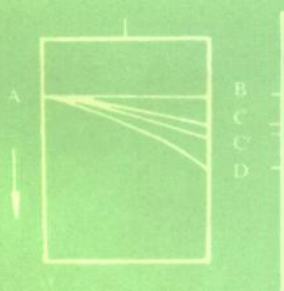


愛因斯坦的等效原理

洪 呂 著

Einstein's principle of equivalence???



0412-1

山东大学出版社

鲁新登字 09 号

爱因斯坦的等效原理

洪 吕 著

*

山东大学出版社出版

山东省新华书店发行

山东师范大学印刷厂印刷

*

850×1168 毫米 大 32 开本 3½印张 89 千字

1992 年 3 月第 1 版 1992 年 3 月第 1 次印刷

印 数 0001—1000

ISBN 7-5607-0681-9/O·40

定价：2.80 元

DZ 77 / 21
内 容 简 介 20

本书对爱因斯坦提出的等效原理进行了全面的分析。等效原理是广义相对论的一条最基本的原理，是爱因斯坦引力学说的出发基础，性质是假设。以往，对这条原理有过质疑。但是，这条原理是否存在理论反证，却是一个从未被提出和认真研究的问题。作者在此书中提出了数种对爱因斯坦等效原理的理论反证，并对反证的正确性进行了认真的讨论。相对论的现有理论无法解释等效原理反证得来的结果。作者又从“本征力”这一基本概念出发进行理论推导，在闵氏四维空间的基础上建立起一个引力模型，使等效原理反证的结果得到了合理的理论解释。本书在叙述上力求深入浅出，不仅可供专业的研究者们研究，也可供有关的教学人员、大学学生和对爱因斯坦的相对论理论感兴趣的广大业余读者们阅读、参考。

正是理论决定了我们所能观测的东西。

——A. 爱因斯坦

当一些古老而困难的问题终于用复杂的方法获得解决的时候，更为简单的解决办法很快就变得明显起来。

——W. 伦德勒

前言

爱因斯坦在建立狭义相对论(1905年)后曾试图在狭义相对论即平直空间认识的基础上解决对引力现象的描述问题,但未成功,便把这“当作不合适的东西而抛弃了”^①。后来,他采用了“弯曲空间”的认识,建立起广义相对论(1916年)。于是,相对论分成了两大理论,分别建立在两种完全不同的空间认识的基础上。狭义相对论只能解决对电磁作用的描述问题,广义相对论只能解决对引力作用的描述问题,但无法将这两种物理现象的描述统一在一种共同的空间认识的基础上。

然而,客观物体之间的相互作用并非如此。两个带电物体之间存在的电磁作用力和引力,事实是同时存在的。它们共同决定了带电物体的运动状态。这说明:这两种力的现象应能在一个共同的空间认识的基础上得到描述。

爱因斯坦很快意识到这是相对论理论中的一个极不令人满意的根本性问题,所以,在广义相对论建立后就着手解决它。在这两种不同的空间认识中,自然只有一种正确。爱因斯坦认为“弯曲空间”的认识是正确的。他想建立一个统一的场论,把电磁作用和万有引力作用等物理现象的描述都统一在其中。他为此孜孜不倦,耗尽了几十年的余生,几度宣称已取得成功,但后来又发现问题,于是再重新开始。如此反复,直到他去世(1955年),也未能达到目的。

这不能不令人怀疑:是不是有些根本性的认识问题还未解决?是不是应该反过来,先解决在平直空间认识的基础上对引力现象的描述问题,然后再谋求统一场论的最终解决?然而,在平直空间认识的基础上解决对引力现象的描述问题被认为是不可能的。时至今日,相对论中这两大门理论在空间的认识上仍处于分

裂的状态。

这是个非常需要得到解决的重要问题。作者经长期思考后得出的看法是：这一问题在解决上存在的障碍，主要并不是在数学问题的复杂性上，而是在某些根本性的认识问题上。有两个问题特别值得认真考虑：一个是等效原理的是非问题；一个是对相对论中力这样概念的理解问题。现在，作者就将自己在这两个方面的思考结果提出来，供探讨。

爱因斯坦说过一段意义极为深刻的话。他说：“为什么必须把自然科学思想中的基本观念从柏拉图的奥林巴斯天界上拖下来并设法把它们世俗血统揭发出来呢？答曰为了使这些观念摆脱与世隔绝的禁令，从而能够在构成观念或概念方面获得更大的自由”^②。作者通过自己的工作对爱因斯坦的这一论述逐步有了理解。作者相信，爱因斯坦这段精僻的见解也将会引导人们最终地完全解决爱因斯坦的遗留问题。

自1988年起，作者陆续写过些文章，但深感许多根本性的认识问题相互牵连，错综复杂，以至任何一篇短文都无可避免地要顾此失彼。只有将它们贯串起来进行全面的分析，才能将有关的问题讨论清楚。这便是此书写作的缘起。

过去，对爱因斯坦的等效原理有过一些质疑。然而，爱因斯坦的等效原理是否存在理论反证，是个从来没有人提出过的问题；但这却是个非常值得提出的重要问题。由于等效原理是非的查明是解开整个问题的钥匙，所以，此书的叙述是以这条原理及其反证为中心来展开的，并把重点放在有关的基本概念和认识问题的分析和阐明上，所用的数学工具是基本的和最为必要的。这样做是为了能使物理观念明晰，推理过程清楚，对错易于辨别。由于与等效原理有关的材料在过去只是散见于各有关相对论的论著中，没有一本专门讨论这条原理的书，所以，为了此书自身的系统性和读者在阅读上的方便，对某些有关的基本性材料也作了

必要的引述。同时，为了照顾到读者面，希望能引起更多的人对这方面问题进行研究的兴趣，作者在叙述上力求做到深入浅出，简明易懂。因此，只要具备了相对论的基本知识，阅读和理解此书的内容是不会有困难的。

不少人为解决爱因斯坦的遗留问题作出了艰巨的努力，许多工作并未达到预期的效果。莱辛(Lessing)说过：“为寻求真理的努力所付出的代价，总是比不担风险地占有它要高昂得多”。爱因斯坦在他的自述中引用了这段话，并称之为“鼓舞人心的言词”^①。因此，作者提出的问题和所作的思考，如果对解决爱因斯坦遗留问题的探索能有一点参考的价值，便是作者最大的快慰。

作者水平有限，若有疏误之处，尚请识者不吝指教。

作 者

1991年11月

注：

①《爱因斯坦文集》第一卷，第320页，商务印书馆，1976年。

②爱因斯坦：《狭义与广义相对论浅说》，第113页，上海科学技术出版社，1964年。

③《爱因斯坦文集》第一卷，第50页，商务印书馆，1976年。

目 录

第一章	爱因斯坦的等效原理	1
	一、等效原理的叙述	1
	二、与等效原理有关的几个问题	4
	三、等效原理的必然推论	7
第二章	引力质量和惯性质量相等问题	9
	一、静止物体的引力质量和惯性质量间的关系	9
	二、运动物体的引力质量和惯性质量间的关系	12
第三章	对等效原理的质疑	19
	一、过去提出的对等效原理的质疑	19
	二、等效原理难以解决的几个问题	20
第四章	等效原理的反证	25
	一、两位观察者在光弯曲问题上的争论	25
	二、等效原理的反证	27
	三、对等效原理反证的讨论	31
第五章	等效原理问题剖析	46
	一、等效原理问题的实质	46
	二、等效原理和广义相对论	50
第六章	与等效原理有关的论断	56
第七章	等效原理的实验检验及反证对错的判定问题	60
	一、等效原理的实验检验	60
	二、等效原理反证对错的判定	64
第八章	对等效原理反证结果的理论解释——相对论中力概念的研究	66
	一、引述	66
	二、定义在两个互作相对运动的参考系中的本	

征力	69
三、物体受本征力作用时的基本运动方程	73
四、理想力场	76
五、物体在理想力场中的受力运动方程	78
六、本征力的物理意义	81
七、对等效原理反证结果的理论解释	86
八、对几个有关问题的讨论	89
第九章 结语——我们面对的几个最根本的认识问题	97
参考文献	101

第一章 爱因斯坦的等效原理

一、等效原理的叙述

爱因斯坦 1907 年在《关于相对性原理和由此得出的结论》一文中提出：

“我们考察两个参照系 Σ_1 和 Σ_2 。 Σ_1 在它的 X 轴方向加速运动； γ 是这个加速度的值（不因时间而变）。 Σ_2 是静止的，但是它处在一个均匀的引力场中，这个引力场赋予一切物体在 X 轴方向这样一个加速度—— γ 。

就我们所知，无法把参照于 Σ_1 的物理定律同参照于 Σ_2 的物理定律区别开来；这是由于一切物体在引力场中都同样地加速。因此，在我们的经验的现代水平的情况下，我们没有理由假设，参照系 Σ_1 和参照系 Σ_2 在某一方面彼此是有差别的，所以我们在下面将假设：引力场同参照系的相当的加速度在物理上完全等价”^[1]。

随后，1911 年他在论文《关于引力对光传播的影响》中说：“当我们假定了这一点，我们就得到了这样一条原理，如果它真是真实的，它就具有很大的启发意义”^[2]。在《相对论的意义》一书中，爱因斯坦说：“坐标系 K 和 K' 在物理上完全等效的假设称为‘等效原理’”^[3]。（注：K 相当于以上引文中的 Σ_2 ，而 K' 相当于 Σ_1 ）。这就是等效原理的简要诞生过程。

爱因斯坦对这条原理的作用评价很高。他说：“从理论上考察那些相对于一个均匀加速的坐标系而发生的过程，我们就获得了关于均匀引力场中各种过程的全部历程的信息”^[2]。

爱因斯坦提出这条原理主要是为了在理论上对“物体的引力

质量和惯性质量相等”这条经验定律作出解释，以建立相对论引力理论的基础。他通过了一个理想实验来说明他的推理过程^[4]。

爱因斯坦设想在“一无所有的空间”中有一个相当大的部分，距离众星及其他可以感知的质量非常遥远，因此近似地有了满足伽利略基本定律的条件。设想把一个象一间房子大小的箱子当作参考物体，在里面安置一位配备了仪器的观察者。对这位观察者而言，引力当然是没有的。

设想在箱子盖的外面安装了一个钩子，钩子上系着缆索。又设想有一“生物”开始以恒力拉这根缆索。于是，箱子连同观察者就要开始“作匀加速运动‘上升’”。经过一段时间，它们的速度将会达到前所未闻的高值”。

箱子里的人会如何看待这个过程呢？“他站立在箱子里实际上与站立在地球上的一个房间里完全一样”。如果他放开原来拿在手里的一個物体，这个物体就必然作相对的加速运动而落到箱子的地板上。“观察者将会进一步断定：物体朝向箱子的地板的加速度总是有相同的量值，不论他碰巧用来做实验的物体如何”。所以，“箱子里的人将会得出这样一个结论：他自己以及箱子是处在一个引力场中，而且该引力场对于时间而言是恒定不变的”。他“一时感到迷惑不解为什么箱子在这个引力场中并不降落。但是正在这个时候他发现箱盖的当中有一个钩子，钩子上系着缆索；因此他就得出结论，箱子是静止地悬在引力场中的”。

爱因斯坦说：“我们是否应该讥笑这个人，说他的结论错了呢？如果我们要保持前后一致的话，我认为我们不应该这样说他；我们反而必须承认，他的思想方法既不违反理性，也不违反已知的力学定律”。

假定箱子里的人在箱子盖的里面系了一根绳子，然后在绳子的自由端拴上一个物体。结果绳子受到伸张，“竖直地”悬垂着该物体。爱因斯坦说：“如果我们问一下绳子上产生张力的原因，箱

子里的人就会说：‘悬垂着的物体在引力场中受到一向下的力，此力为绳子的张力所平衡；决定绳子张力的的大小的是悬垂着的物体的引力质量’。另一方面，自由地稳定在空中的观察者将会这样解释这个情况：‘绳子势必参与箱子的加速运动，并将此运动传给栓在绳子上的物体。绳子的张力的的大小恰好足以引起物体的加速度。决定绳子的张力的的大小的是物体的惯性质量’”。

于是，爱因斯坦得出结论：“我们从这个例子看到，我们对相对性原理的推广隐含着惯性质量和引力质量相等这一定律的必然性。这样我们就得到了这个定律的一个物理解释”。

爱因斯坦通过建立等效原理要达到的两个具体目的则是：

- (1) 将均匀引力场与匀加速参考系视为同一；
- (2) 将惯性参考系与非惯性参考系视为同一。

在相对论的各有关论著中，对等效原理的表述形式甚多。为了我们讨论上的方便，要先明确等效原理的代表性叙述。

爱因斯坦的等效原理是说：均匀性的引力空间(场)中的一个静止的参考系和无引力的空间(惯性空间)中的一个匀加速参考系在物理上完全等效。(以下简称为等效原理的叙述 A)。

对于现实的非均匀引力场，等效原理只对引力场中可看成是均匀的局域才成立。在此情况下，等效原理表述为：

对引力场中每一个可视为均匀的局域(或“一点邻域”)，总可找到一加速参考系，在其中可将该局域内的引力效应完全消除。(以下简称为等效原理的叙述 B)。

爱因斯坦特别提醒读者要注意均匀引力场和非均匀引力场在等效原理适用问题上的区别。他说：“我们可能会轻易地假定，引力场的存在永远只是一种表观的存在。我们也可能认为，不论存在着什么样的引力场，我们总是能够这样选取另外一个参考物体，使得对于该参考物体而言没有引力场存在。这绝对不是对于所有的引力场都是真实的，这仅仅是对于那些具有十分特殊的形

式的引力场才是真实的。例如，我们不可能这样选取一个参考物体，使得由该参考物体来判断地球的引力场(就其整体而言)会等于零”^[4]。爱因斯坦在这里说的“具有十分特殊的形式”的引力场”，指的就是均匀的引力场。

对于不均匀的引力场，可区分出“局域”和“整体”的不同；局域是均匀的，整体是不均匀的。但对均匀的引力场，就区分不出“局域”和“整体”。所以，对于均匀的引力场，等效原理不提也无需提“局域”。

二、与等效原理有关的几个问题

1. 惯性参考系

惯性参考系常成为一个争议的问题。虽然这一参考系是爱因斯坦建立狭义相对论的基础，但爱因斯坦在狭义相对论中却未给出它的定义。

我们称有引力存在的空间为引力空间，称无引力存在的空间为惯性空间，称在惯性空间内静止或作等速运动的参考系为惯性参考系。

这个对惯性参考系的理解不会导致在惯性参考系定义上的“逻辑循环”或“同义反复”，如果承认引力的存在具有绝对意义的话。

但要指出，爱因斯坦并不承认引力的存在具有绝对意义。因为，等效原理将引力的存在与不存在视为不可分。既然如此，引力的存在就失去了绝对的意义。由于惯性参考系必须要以它与非惯性参考系的区分来定义，引力的存在也必须要以它与引力的不存在相对比来识别，因此，在惯性参考系和非惯性参考系被视为同一、引力场和惯性力场被视为同一的情况下，惯性参考系定义上的“逻辑循环”或“同义反复”问题也就无法避免。当认为根本无

法判断出一个物体是否处于受力的状态时，“无引力存在”这一说法的确切性就会成为问题。随之，惯性参考系无法定义。爱因斯坦解决这个问题的方法是具体找出一个符合要求的惯性参考系。这就是在均匀引力场中自由降落的一个参考系，或是在非均匀引力场中自由降落的一个局域性的参考系。然而，能够这样做的前提是要等效原理能成立。如果等效原理不成立，这样来解决问题就办不到了。

因此，在惯性参考系定义上的整个问题就是：等效原理成立，惯性参考系和非惯性参考系不可区分，惯性参考系本身无需专门定义。不然，就要承认引力的存在具有一定的绝对意义；否则，惯性参考系将无法定义。

因为等效原理在性质上只是个假设，所以不能认为（至少在问题未查明前不能认为）根据等效原理解决惯性参考系的定义问题是可靠的。所以，我们将有、无引力存在作为判断是否是惯性参考系的基本标志。这个判断标志是和等效原理相冲突的。然而，目前我们只能这样做。惯性参考系定义问题的解决，最终要依靠等效原理是非问题的真正查明。

对于惯性参考系的“特殊地位”，爱因斯坦有一种特别的反感，力图摒弃它。所以，他说：“广义相对论使物理没有必要引进‘惯性系’（不论是一个或者不止一个惯性系），这是它的根本成就”^[5]。然而，正如 W. Rindler 指出的那样：在现实世界中，“事实表明惯性参照系是非常真实的”^[6]。对此，只要举出狭义相对论的例子就足以说明了。无数事实可证明爱因斯坦的狭义相对论是正确的，迄今未发现过有违背狭义相对论的实验结果，而狭义相对论又是建立在惯性参考系的基础上。如果惯性参考系在客观现实中没有一点真实性，那么，狭义相对论能取得如此的成功就是一件不可思议的事了。

但即使对惯性参考系作出了如上的定义，也不解决惯性参考

系的另一个问题，即在客观现实里找不到一个严格的惯性参考系。因为，引力不存在意味着物质不存在，而不存在任何物质的空间是没有的。

然而，我们认为并无需为此而烦恼，因为这是理论研究。对此，我们赞成现代的观点，即认为：在理论研究中，研究的对象只是客观现实的一个抽象的数学模型。它和现实世界之间的关系只是它的一个子集和现实世界中的一个子集之间的对应，并非严格的全同。理论模型出于抽象，它不可能与现实世界完全吻合，但确实是后者纯化了的代表。因此，不能因客观世界中找不到一个完全严格的惯性参考就否定它的现实意义。

但要注意，只有在无引力的惯性空间内静止或作等速运动的参考系才可称为惯性参考系，而在引力场中静止的参考系不能称为惯性参考系。因此，不应将等效原理叙述为“可以找到的非惯性系，它与引力场内的惯性系等效”。因为，和在惯性空间不同，在引力场中作等速运动的参考系和在引力场中静止的参考系并不是等价的（见本书第八章中的有关讨论）。

2. 等效和等同

等效并不是等同。等效的双方，它们的某些基本性质可以不同。例如，引力是有场源的，也存在反作用力；而惯性力则是无场源的，不存在反作用力，等等。即使这些都考虑不到，但只要想一想就能明白：如果等效的两个参考系本来就完全相同，也就没有必要再由爱因斯坦提出什么等效原理了。爱因斯坦只是说，这两种性质不同的参考系可以相互置代并且效果相同，如此而已。

既然两个不同参考系间的“完全等效”是没有的，所以必须规定出“等效”的具体内容。爱因斯坦对等效原理“等效”的规定是“在物理上完全等效”。现在，通常将这一“等效”限制在“动力学效应”方面，或限制于“仅就与引力有关的现象而言”。这样限制后的等

效原理有时被称为“弱等原理”^{*}。

3. 在力的基础上对等效原理的叙述

等效原理常被叙述为“引力与惯性力等效”。但是，在相对论的范畴，力对物体的作用效果(物体因力的作用而得到的加速度)要与物体的运动速度有关。因此，只有当这两种力在这种关系上的表达式(即物体受力的基本运动方程)完全一致时，“等效”的要求才能达到。这是一个很高的要求。在我们尚未弄清不同性质的力在相对论范畴的具体行为特征时，就无法在这个问题上作出准确的判断。但参考系不同；无论在经典力学或在相对论的范畴，参考系都是个明确的概念。因此，在有关问题未完全弄清前，等效原理的叙述不宜采用以力的概念为基础。

三、等效原理的必然推论

根据等效原理，在均匀引力场(空间)中的一位静止的观察者 A 所观测到的物理现象和在惯性空间内作匀加速运动的一个(子)空间中一位静止的观察者 B 所观测到的物理现象是完全相同的。那末，令观察者 A 和观察者 B 在各自的空间中作地位上的相应变动，即令观察者 A 进入在均匀引力场(空间)内自由降落的一个(子)空间中，而观察者 B 则由原来所在的(子)空间出来，静止于惯性空间，则两个观察者所观测到的结果也应相同。因此，等效原理也可叙述为：

附着于在引力场中自由下落的一个物体上的参考系和惯性参考系在物理上等效(以下简称为等效原理的叙述 C)。

这个结果是可以理解的。因为，相对于原来的观察者 B，惯性空间就是相对他所体验到的“引力场”在作匀加速“下落”的空间，

* 注：对等效原理“强”、“弱”的解释，各有关论著中并不一致。

而这正是观察者 A 后来所在空间的情况。

等效原理的叙述 C 直接导致结论：

在均匀引力场中自由下落的一个空间内，引力的效应完全消失(以下简称为断言 E)。

相对论的研究者们在相对论的论著中往往对等效原理的叙述 A 有不同的看法，提出许多其他方式的表述来代替它，然而对断言 E 却从无异议。但是，断言 E 也就是等效原理的叙述 C，而等效原理的叙述 C 又只不过是换了一种方式来表述等效原理的叙述 A。这两种对等效原理的叙述只是“同一个铜币的两个面”，它们是完全等价的。若承认了断言 E 正确，就等于承认了等效原理叙述 A 正确。因此，认为等效原理的叙述 A 不能代表等效原理而同时又认为断言 E 正确，这是矛盾的。

这一点，可从爱因斯坦对等效原理的一贯态度得到证明。自从爱因斯坦于 1907 年正式提出等效原理后，一直到 1955 年他去世，广义相对论中的数学推导形式发展和现在已无大差别了，但从未见爱因斯坦本人对他原来提出的等原理(即叙述 A)在表述上作任何实质性的修改，或另立一条“广义相对论的等效原理”。爱因斯坦对等效原理(即叙述 A)和断言 E 之间关系的认识，从来是一致的。

可见，等效原理的问题并不是在如何改变它的表述，而是在断言 E。如果断言 E 成立，等效原理就对了；如果断言 E 不成立，等效原理就错了。断言 E 为等效原理提供了一个最为明确不过的检验方法。因此，等效原理对错问题的核心就是断言 E。

结 论

等效原理的含意是明确的，爱因斯坦曾不止一次作了阐明。等效原理的问题并不在它的不同表述，而是在断言“在均匀性引力场中自由下落的一个空间内，引力效应完全消失”是否正确。