

# 引力波理论研究进路的演进

罗 栋

(华南理工大学 马克思主义学院, 广东 广州 510641)

**摘 要:**自爱因斯坦于1916年给出关于引力波的预测后,引力波的理论研究主要围绕引力波是否存在展开,研究进路经历了多个阶段,直至毕拉尼1957年引入的方法使得引力波是否存在的争论尘埃落定。从研究方法来看,经历了从通过分析引力波解的属性来考察引力波解是否表征真实的物理的波,到通过分析引力波波源是否能量衰减来考察引力波是否为真实的物理的波,到通过分析引力波对探测粒子的影响来考察引力波是否真实存在。相应的研究问题经历了,从是否存在与电磁辐射类似的引力辐射,到线性近似方法所获得的引力波是否表征真实的波,再到波源是否会因为辐射引力波而损失能量,最后到引力波是否有可能被探测到的演变。

**关键词:**引力波;研究进路;爱因斯坦;爱丁顿;朗道 & 利夫希茨;毕拉尼

中图分类号:N031

文献标识码:A

文章编号:1008-7699(2021)05-0009-06

引力波是求解爱因斯坦方程的结果。自爱因斯坦于1916年2月给出关于引力波的理论预测至1957年1月在北卡罗来纳大学教堂山分校举办的“引力在物理学中的作用研讨会”(The Conference on the Role of Gravitation in Physics)的近四十年间,包括爱因斯坦本人在内的物理学家们对求解引力波的理论方法、引力波的属性等进行了激烈的争论。争论的不同阶段涉及到不同的研究进路。本文通过分析引力波理论研究的几个主要历史阶段中研究方法和研究问题的演变,来展现引力波理论研究进路的演进。

## 一、引力波简介

爱因斯坦于1915年11月给出了广义相对论的引力场方程——爱因斯坦方程。爱因斯坦方程 $G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$ ,是由10个非线性方程所构成的方程组。其中: $G_{\mu\nu}$ 描述的是时空的几何结构,由时空度规 $g_{\mu\nu}$ 确定; $T_{\mu\nu}$ 描述的是时空中的物质能量分布; $\kappa$ 为常量。时空的几何结构和时空中的物质能量分布是互相确定的关系,即所谓的“[时空的]几何告诉[时空中的]物质如何移动,[时空中的]物质告诉[时空的]几何如何弯曲”。<sup>[1]</sup>当没有物质能量分布时,时空的几何结构便与狭义相对论中闵可夫斯基时空的结构相同。

有多种求解引力波的方法,比如后牛顿(post-Newtonian)近似、后闵可夫斯基(post-Minkowskian)近似等。<sup>[2-3]</sup>这些方法的基本思路多是在特定条件下将非线性的爱因斯坦方程向线性方程近似。以后闵可夫斯基近似为例,其基本思路如下。在弱引力场条件下,时空可近似被视为狭义相对论的闵可夫斯基时空的微扰。此时,广义相对论的时空度规 $g_{\mu\nu}$ 可被视为狭义相对论中的闵可夫斯基时空度规存在一定微扰的结果,即 $g_{\mu\nu} = g_{\mu\nu}^{(0)} + g_{\mu\nu}^{(1)}$ 。其中, $g_{\mu\nu}^{(0)}$ 为闵可夫斯基时空度规,为弱引力场下的时空度规展开后的常量项,而 $g_{\mu\nu}^{(1)}$ 则为展开后的一阶项。将展开后的时空度规代入爱因斯坦方程,可以获得线性爱因斯坦方程 $G^{(1)}_{\mu\nu} = \kappa T^{(1)}_{\mu\nu}$ 。通过求解线性爱因斯坦方程,可以获得线性近似后的引力场波动方程,进而获得引力波近似解。<sup>[4]</sup>

线性近似方法面临一系列问题。除近似方法的精确性问题外,以后闵可夫斯基近似方法为例,由于

收稿日期:2020-12-14

基金项目:国家社会科学基金青年项目(18CZX012);教育部人文社会科学研究青年基金项目(17YJC720018)

作者简介:罗 栋(1986—),男,湖北仙桃人,华南理工大学马克思主义学院副教授。

产生强到足以被探测到的引力波的波源是处于极强的引力场下的,而后闵可夫斯基近似是在弱引力场条件下对爱因斯坦方程的近似求解,这意味着该方法求解的结果并不直接地反映波源信息。

引力波的求解方法及其所引发的问题在很大程度上导致了人们对于引力波是否存在的争论,推进着引力波理论研究的发展及其研究进路的演进。

## 二、爱因斯坦 1916—1918 年的引力波研究及其进路

### (一) 爱因斯坦 1916—1918 年的引力波研究

广义相对论与电磁理论有诸多相似之处。比如,爱因斯坦方程 $G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$ 等号左边的 $G_{\mu\nu}$ 描述了引力场的数学结构,等号右边的 $T_{\mu\nu}$ 则反映了引力场的场源信息(即时空中的物质能量分布);而电磁学中静电场的泊松方程 $\nabla^2 \varphi = 4\pi\rho$ 的等号左边反映了静电场的数学结构,等号右边则反映了场源(即电荷)的分布信息。<sup>[5]</sup>正因此,爱因斯坦在提出广义相对论后不久便开始考虑引力场能否产生引力波的问题,并尝试寻找类似于电磁波的引力波。

电磁波是偶极子辐射。因此,爱因斯坦最初的目标是求解引力场中的偶极子辐射。在未能找到引力场的偶极子辐射后,他在 1916 年 2 月 19 日与荷兰天文学家卡尔·史瓦西(Karl Schwarzschild)的通信中告诉后者:“不存在偶极子[不存在引力波]”。<sup>[6]265-266</sup>

但在仅仅数月之后的 1916 年 6 月 22 日发表的论文中,爱因斯坦便转变立场,认为存在引力波。在该文中,爱因斯坦用后闵可夫斯基近似方法,获得了三个波动解。这三种类型的波后来被外尔(Hermann Weyl)分别称为“纵纵波”(longitudinal-longitudinal waves)、“纵横波”(longitudinal-transverse waves)以及“横横波”(transverse-transverse waves)。<sup>[7]</sup>其中,只有“横横波”的传播速度与坐标系的选取无关,即这三种波中只有“横横波”无法通过坐标系变换这样的数学操作被消去。爱因斯坦因此认为,引力波是存在的,并且由“横横波”表示。<sup>[8]201-210</sup>

在爱因斯坦与芬兰物理学家贡纳尔·努德斯特伦(Gunnar Nordström)1917 年 9 月 22 日—28 日间以及 10 月 23 日的通信中,后者指出了爱因斯坦 1916 年论文中的计算错误。<sup>[8]notes 16-18, [6]385-386, 516-524</sup>爱因斯坦在 1917 年 12 月 29 日向德国物理学家古斯塔夫·米(Gustav Mie)提到他计划要修正该错误。<sup>[6]587-588</sup>1918 年 2 月 21 日,爱因斯坦发表了修正后的引力波表达式,<sup>[9]</sup>并维持了 1916 年论文中引力波存在的结论。

### (二) 爱因斯坦 1916—1918 年的引力波研究进路

爱因斯坦 1916—1918 年的引力波研究进路从研究目标和研究方法上来看都经历了转变,也正是这些转变导致了他关于引力波是否存在的结论的改变。

从研究目标上来看,爱因斯坦 1916 年的引力波求解经历了从旨在寻找类似于电磁辐射的偶极子辐射,到旨在寻找不同于电磁学理论的四极子辐射的转变。从研究方法上来看,1916—1918 年间,爱因斯坦求解引力波时经历了近似方法选取上的转变。有研究者推测,爱因斯坦在 1916 年 2 月与史瓦西通信时所使用的很可能是所谓的“后牛顿”近似方法,即求解时将广义相对论向牛顿的引力理论进行近似处理。然而,后牛顿近似方法在近似处理时需要保留到更高阶项才会出现引力波解,但爱因斯坦当时很可能忽略了除一阶项之外的所有高阶项,因而导致他认为引力波是不存在的。<sup>[10]41-65</sup>而在 1916 年 6 月的文章中,爱因斯坦的引力波求解方法已经转变成了后闵可夫斯基近似方法。

## 三、爱丁顿 1922—1923 年的引力波研究及其进路

### (一) 爱丁顿 1922—1923 年的引力波研究

英国物理学家亚瑟·爱丁顿(Arthur Eddington)在 1922 年修正了爱因斯坦 1918 年论文中引力波解存在的一个小错误,并给出了引力波解正确的数学表达式。爱丁顿认为,爱因斯坦 1916 年和 1918 年论文中的引力波(即“横横波”)传播速度等于光速,是人为地选取特定类型的坐标系求解爱因斯坦方程的结

果。“他[爱因斯坦]的分析显示的是,若要使引力势以光速传播的话应当如何选择坐标。然而,除作为这一任意的[坐标系]选择的结果外,没有什么表明光速会出现于[引力波]问题中。”<sup>[11]</sup>爱丁顿因此认为,爱因斯坦关于引力波传播速度等于光速的论述存在着循环论证。<sup>[12]1112-1117</sup>

此外,爱丁顿在1923年进一步尝试通过分析旋转物体的**能量是否会衰减**来考察引力波是否存在。他的研究表明,在假设引力作用的传播速度有限的情况下,旋转着的物体的不同部分之间会因为相互阻滞而导致物体旋转速度的下降,这意味着旋转物体能量的减少。爱丁顿认为这种能量损失是被以引力波的形式辐射出去了,即引力波是携带能量的,是物理的。因此,爱丁顿1923年进一步认同爱因斯坦1916年和1918年论文的结论,**引力波是存在的**。<sup>[12]1112-1117</sup>

#### (二)爱丁顿1922—1923年的引力波研究进路

爱丁顿1922—1923年的引力波研究,从引力波的求解方法上来看,依然使用了后闵可夫斯基近似方法。从分析引力波是否存在的方法上来看,爱丁顿一方面类似爱因斯坦那样分析引力波解是否取决于坐标系;另一方面,还通过分析旋转物体系统是否存在**能量衰减**的问题,来分析引力波是否存在的问题。

如果说对引力波解是否取决于坐标系的分析是对引力波解属性的直接分析的话,那么,通过分析旋转物体系统是否存在能量衰减来分析引力波是否真实存在,则是对于引力波波源的分析。可见,相较于爱因斯坦1916—1918年的研究进路,爱丁顿1922—1923年的研究进路额外引入了一种研究方法——**波源分析**。

### 四、爱因斯坦1936—1937年及朗道 & 利夫希茨1941年的引力波研究及其进路

#### (一)爱因斯坦1936—1937年的引力波研究

爱因斯坦1916年和1918年的论文,以及爱丁顿1922年和1923年的论文,都是使用线性近似方法求解引力波。由于近似求解所可能面临的精确性质疑,在1936年至1937年时,爱因斯坦试图寻找引力波的严格解。

有可能被人们现实地探测到的引力波的波源距离地球极为遥远。因而,波源相对于人类观察者的距离可以被视为无穷远。无穷远处的波源可被视为点状波源,距离波源无穷远处的波前则近似为平面波。故而,若引力波是存在的,当它们传播到地球时,其波前将近似为平面波。因此,爱因斯坦1936年在与纳森·罗森(Nathan Rosen)合作并投稿给《物理学评论》(*Physical Review*)的一篇论文中,试图寻找引力波的平面波精确解。然而,他们发现,无法在不引入奇点的情况下获得平面引力波解。爱因斯坦认为奇点在物理学上是无法接受的,因而得出**平面引力波并不存在**的结论,即人们实际上是无法探测到引力波的。

《物理学评论》的审稿人指出了爱因斯坦和罗森论文中的错误。爱因斯坦更正1936年论文中的错误后,将文章转投给《富兰克林研究所杂志》(*Journal of the Franklin Institute*),并于1937年1月发表在该杂志上。<sup>[13]</sup>不同于1936年的文章,爱因斯坦在1937年的文章中回避了平面引力波是否存在的问题,而是认为柱状(**cylindrical**)引力波是存在的。

柱状波的波源是线状波源。因此,爱因斯坦1937年关于柱状引力波存在的讨论实际是回避了引力波是否有可能被人们探测到的问题。需要指出的是,尽管1937年论文的署名包含了罗森,但罗森对于爱因斯坦回避平面引力波是否存在并不满意。他依然认为平面引力波并不存在,<sup>[10]96-97</sup>即无法探测到引力波,并在此后的数十年里持续地质疑引力波的存在。

#### (二)朗道 & 利夫希茨1941年的引力波研究

朗道(Lev Landau)和利夫希茨(Evgeny Lifshitz)在他们1941年出版的场论教材《经典场论》(*The Classical Theory of Fields*)中专门讨论了引力波问题。<sup>[14]368-381</sup>他们使用了与爱因斯坦1918年论文类似的线性近似方法求解引力波。奇点同样出现在了朗道和利夫希茨对平面引力波的求解中。但不同于爱因斯坦,他们注意到,这种奇点可以通过坐标系变换消去,因而并非是物理的,而只是数学的。也正因此,朗

道和利夫希茨明确地认为引力波存在。

此外,朗道和利夫希茨的求解还表明,引力波是具有能量的。不仅如此,他们还将其求解推广到了任意相对光速低速运动的物体所产生的弱引力场。<sup>[14]376-379</sup>这使得他们的分析适用于绝大多数引力波波源(比如双星系统)。

### (三)爱因斯坦 1936—1937 年及朗道 & 利夫希茨 1941 年的引力波研究进路

不同于之前的研究,爱因斯坦 1936—1937 年引力波研究的主要研究目标不是寻求对引力波的近似求解,而是试图给出引力波的精确解。爱因斯坦在 1936 年试图给出的是平面波精确解,在 1937 年发表在《富兰克林研究所杂志》的论文中则试图给出柱状波精确解。

而朗道 & 利夫希茨(1941)的研究在研究方法上重新回到闵可夫斯基近似方法,同时也解决了爱因斯坦 1936 年的引力波研究中对于度规中奇点的误解。此外,朗道和利夫希茨将他们的求解推广到任意相对光速低速运动的物体所产生的弱引力场后,使得他们的方法适用于绝大多数引力波波源,这便导致对于引力波的波源的分析成为了引力波理论争论中一项问题聚焦。

然而,朗道和利夫希茨的研究方法同样面临诸多争议。一方面,他们求解时大量地通过与电磁学理论中的电磁波求解类比来构造引力波解,而这种类比在有些物理学家眼中是值得怀疑的。另一方面,虽然基于引力波强度极弱而进行的近似对有些物理学家来说是可以接受的,但他们对朗道和利夫希茨所使用的近似方法的精确性及连贯性持保留意见。<sup>[10]110-115, [15]</sup>此外,朗道和利夫希茨的研究还进一步引发了另外一系列的争论,部分争论甚至持续到 1990 年代,<sup>[10]140</sup>尽管引力波是否存在那时已不再被学术共同体视为问题。

## 五、1957 年教堂山会议及其后的研究进路

### (一)1957 年教堂山会议

关于引力波是否存在的理论争论持续直至 1957 年 1 月在北卡罗来纳大学教堂山分校举办的“引力在物理学中的作用研讨会”。教堂山会议由布莱斯·德维特(Bryce DeWitt)和塞西尔·德维特(Cécile DeWitt)夫妇组织,44 位当时国际上主要的相对论研究者出席了会议。在本次会议上,英国物理学家菲力克斯·毕拉尼(Felix Pirani)提出,可以不必通过求解双星系统等波源中的引力波生成,而是通过分析引力波对探测粒子的物理影响,来分析引力波是否真实存在。若引力波能对探测粒子产生物理的影响,引力波便是携带能量的,是真实的。

毕拉尼的研究显示,当引力波经过时,一组“自由下落”的粒子之间会出现彼此相对的运动。这便表明,引力波在经过这组粒子时,对它们产生不同的物理的影响。因此,引力波是存在的。<sup>[16-17]</sup>

毕拉尼的研究很快便对引力波的理论争论产生了重大的影响。部分参加此次会议的研究者当场便改变了自己关于引力波是否存在的立场。<sup>[18]99-101, 142</sup>

### (二)1957 年教堂山会议后的研究进路

毕拉尼的研究在研究方法上既不同于爱因斯坦 1916—1918 年对引力波解的数学性质的分析,也不同于爱丁顿 1923 年研究中对可能引力波波源的分析,而是直接讨论引力波对“探测粒子”的物理影响。

正是因为关注的是引力波对“探测粒子”的影响,毕拉尼注意到只有引力场的变化而非引力场本身才能产生可探测的物理效果。因此,他在 1957 年的教堂山会议上将注意力放在引力场的何种变化才能够算作引力场的辐射,并认为引力场的辐射意味着爱因斯坦方程中的黎曼张量的非连续性。在给出黎曼张量可能的非连续性后,毕拉尼进而发现黎曼张量的变化会引起引力场中的“探测粒子”的相对加速运动。

正是基于这一思路,毕拉尼指出,当引力波经过一组“自由下落”的粒子时,将导致粒子之间出现彼此相对加速运动。引力波因此必然是物理的波,是真实的。值得一提的是,在毕拉尼的研究中,引力辐射被假定为以光速传播。他在 1957 年 2 月发表在《物理学评论》上的更详细的论文中也坦承,他只是处理了

以光速传播的引力场辐射。<sup>[17]1089-1099</sup> 总之,毕拉尼的引力波研究进路是分析引力波对探测粒子或探测器可能带来的物理效果。如果引力波能够对探测粒子或探测器带来可观测的物理效果,即表明引力波存在。

毕拉尼的研究进路对引力波研究产生了深远的影响。针对毕拉尼在教堂山会议上的报告以及与会研究者的讨论,费曼(Richard Feynman)在会议的评论部分进一步提出了被称之为“黏串珠论证”(sticky bead argument)的思想实验,指出引力波可以使一个细杆上的两个小球(其中一个小球被固定在细杆上,另一个小球可以在杆上滑动)之间产生相对加速运动,而小球在细杆上的运动会产生摩擦生热,这便表明引力波可以对球和杆构成的系统做功,即引力波是带有能量的。<sup>[18]279-281</sup>

邦迪(Hermann Bondi)此后对费曼的思想实验的进一步具体化及推广<sup>[19]</sup>则使得始于毕拉尼的这一研究进路在引力波理论研究中愈发具有影响力,促使引力波探测的早期研究者约瑟夫·韦伯(Joseph Weber)在此次会议后不久,开始致力于基于毕拉尼的思路来设计引力波探测装置,并尝试探测引力波。<sup>[20]</sup>也是自那时起,对于引力波的探测被提上了日程,引力波研究便逐渐从理论争论转向经验探测。

## 六、结论

从1916年至1957年,关于引力波的理论研究所涉及的关键问题是引力波是否存在。引力波的理论研究进路经历了一系列的演变。在引力波的理论研究的发展过程中,处理的理论问题以及研究方法直接影响了相关研究者对于引力波是否存在的判断。

从理论上分析引力波是否存在有三种可能的方法。第一种方法是通过分析引力波解的属性来分析引力波解是否表征了真实的物理的波;第二种方法是通过分析引力波波源是否能能量衰减来分析引力波是否是真实的物理的波;第三种方法是通过分析引力波与探测器的相互作用来分析引力波是否真实地存在。

关于引力波是否存在的理论研究和争论经历了以上三种方法的演进。爱丁顿1923年的研究后,第一种方法对于引力波解的分析已基本不存在争论。尽管如此,却依然不足以平息物理学家们对于引力波是否存在的争论。<sup>①</sup> 第二种方法所获得的结果到朗道 & 利夫希茨的研究发表后依然存在争论,甚至直到1974年发现脉冲星双星之时,双星系统是否辐射能量依然存在理论争论,并在其他层面继续推进了引力波理论研究。<sup>[21]</sup> 然而,毕拉尼在1957年引入的第三种方法使得引力波是否存在的理论争论基本尘埃落定。也正是第三种方法的出现,才使得对于引力波的探测工作成为可能。

与引力波研究方法演进相应的,引力波是否存在的争论中所直接处理的问题经历了从(1)是否存在与电磁辐射类似的引力波辐射,到(2)线性近似方法所获得的引力波是否是真实的波,再到(3)波源是否会因为辐射引力波而损失能量,最后到(4)引力波是否有可能被探测到的演变。

### 参考文献:

- [1] MISNER C W, THORNE K S, WHEELER J A. Gravitation[M]. New York: W. H. Freeman & Company, 2010: 130.
- [2] BONNOR W B. Spherical gravitational waves[J]. Philosophical transactions of the royal society of London, Series A: mathematical, physical and engineering sciences, 1959(994): 233.
- [3] BLANCHET L. Gravitational radiation from post-Newtonian sources and inspiralling compact binaries[J]. Living reviews in relativity, 2014(1): 1-187.
- [4] MAGGIORE M. Gravitational waves: volume 1: theory and experiments[M]. Oxford: Oxford University Press, 2008: 3-51.
- [5] CHEN C M, NESTER J M, NI W T. A brief history of gravitational wave research[J]. Chinese journal of physics, 2017(1): 142-169.

① 第一种方法判定引力波是否存在是通过分析所求得出的引力波解是否可以通过坐标系变换消去,来判定引力波解是数学的解还是物理的解。这一方法与广义相对论的广义协变性有关联。而人们对广义协变性的理解长期存在争议,这或许也导致了第一种方法难以平息人们关于引力波是否存在的争议。

- [6] EINSTEIN A. The collected papers of Albert Einstein, volume 8, part A[C]. Princeton: Princeton University Press, 1999.
- [7] WEYL H. Space, time, matter[M]. New York: Dover Publications, 1952: 248-252.
- [8] EINSTEIN A. Approximate integration of the field equations of gravitation[M]// The collected papers of Albert Einstein, Volume 7. Princeton: Princeton University Press, 2002.
- [9] EINSTEIN A. On gravitational waves[M]// The collected papers of Albert Einstein, Volume 7. Princeton: Princeton University Press, 2002: 11-28.
- [10] KENNEFICK D. Traveling at the speed of thought: Einstein and the quest for gravitational waves[M]. Princeton: Princeton University Press, 2007.
- [11] EDDINGTON A S. The propagation of gravitational waves[J]. Proceedings of the royal society of London. Series A, containing papers of a mathematical and physical character, 1922(716): 268-282.
- [12] EDDINGTON A S. The spontaneous loss of energy of a spinning rod according to the relativity theory[J]. Philosophical magazine, 1923(276).
- [13] EINSTEIN A, ROSEN N. On gravitational waves[J]. Journal of the Franklin Institute, 1937(1): 43-54.
- [14] LANDAU L D, LIFSHITZ E M. The classical theory of fields; volume 2[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1980.
- [15] PIRANI F A. Gravitational radiation[C]// WITTEN L. Gravitation; an introduction to current research. New York: John Wiley & Sons Inc, 1962: 199-226.
- [16] PIRANI F A E. Pirani's comments in conference on the role of gravitation in physics at the University of North Carolina, Chapel Hill January 18-23, 1957[C]. Ohio: Wright Air Development Center, 1957: 37-40.
- [17] PIRANI F A E. Invariant formulation of gravitational radiation theory[J]. Physical review, 1957(3).
- [18] DEWITT C M, RICKLES D. The role of gravitation in physics: report from the 1957 Chapel Hill Conference[C]. Edition open access, 2011.
- [19] BONDI H. Plane gravitational waves in general relativity[J]. Nature, 1957(4569): 1072-1073.
- [20] WEBER J. Detection and generation of gravitational waves[J]. Physical review, 1960(1): 306-313.
- [21] KENNEFICK D. The binary pulsar and the quadrupole formula controversy[J]. The European physical journal H, 2017(2): 293-310.

## Evolution in Theoretical Research Approaches on Gravitational Waves

LUO Dong

(School of Marxism, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** Theoretical studies on gravitational waves (GWs), which focused on whether GWs existed or not, have undergone multi-stages since Einstein first gave predictions on GWs in 1916. The approach introduced by Pirani in 1957 made the debates on whether GWs existed have a definite conclusion. During the process, a series of research approaches have been applied, from the approach of exploring whether the GW solutions represent the real physical waves by analyzing the features of the GW solutions, to the approach of exploring whether the GWs are the real physical waves by analyzing whether GWs sources would lose energy, and then to the approach of determining whether the GWs exist by analyzing the impacts of GWs on test particles. Accordingly, the research problems corresponding to the approaches have undergone changes: from whether there are gravitational radiations similar to electromagnetic radiations, to whether the waves obtained by linearized approximation methods represent the real waves, and then to whether GWs sources would lose energy due to gravitational radiations, and finally to whether GWs could be detected.

**Key words:** gravitational waves; research approaches; Albert Einstein; Arthur Eddington; Lev Landau & Evgeny Lifshitz; Felix Pirani

(责任编辑:江 雯)