赵忠尧，电子对产生和湮灭

李炳安　杨振宁

一、简介

作为20世纪物理学发展的里程碑，关于电子无穷海的狄拉克理论现在已被普遍认为是粒子物理基础的不可分割的一部分．然而它曾有过一段难以被人们接受的时期．是1932年正电子的发现，以及随后对于电子对产生和湮灭过程的理解，最终扭转了对它不信任的潮流．

事实上，在比1932年更早几年的时候，电子对产生和湮灭的过程已从实验上被发现了，但未能从理论上得到理解．这些早期发现的报道在于如下文章中：

(a) 在1930年5月，由三组物理学家分别独立发表的文章．这三组物理学家是英国剑桥的塔伦特，柏林-达赫莱姆的梅特纳和赫布菲尔德，以及帕萨丹那的赵忠尧．这些文章都叙述了发现Thc"2.65MeV γ射线被重元素"反常吸收"的实验现象．

(b) 赵在1930年底发表的关于他的另一个实验的文章．在这个实验中，他发现了Thc"γ射线在铅上的"附加散射线"．

现在回顾来看，文章(a)是代表着首次观察到电子对产生的过程．而文章(b)是首次观察到电子对湮灭的过程．在随后的两年，即1931—1932年，反常吸收和附加散射线吸引着理论物理学家极大的注意，并激发着重要的进一步的实验研究．为了评估赵的文章的作用，我们在这里引述C.D.安德逊在1983年的一篇文章里写的一段文字：

"我在加州理工学院做研究生论文的工作是用威尔逊云室研究X射线在各种不同气体里产生的光电子的空间分布．在我做这项工作的1927—1930年间，赵忠尧博士就在我隔壁的屋子里工作．他是用验电器测量Thc"产生的γ射线的吸收和散射．他的发现引起我很大的兴趣．当时人们普遍相信，来自Thc"的2.6MeV的"高能"γ射线的吸收，绝大多数应是按照克莱因-仁科公式表达的康普顿碰撞．但赵博士的结果清楚地表明，这种吸收和散射显著地大于克莱因-仁科公式的计算．由于验电器很难给出细致的信息，所以他的实验不可能对上述反常效应做出深入的解释．我建议的实验是利用工作在磁场中的云雾室来研究Thc" γ射线与物质的作用，即观察插入云雾室中的薄铅板上产生的次级电子，来测量它们的能量分布．从而研究和了解在赵的实验结果中还反映着哪些更深刻的意义"．

另外，哈雅卡华在一篇文章里引述了他与奥恰里尼在1980年的谈话，其中说：

"奥恰里尼高度评价赵的成就，并说明赵关于Thc" γ射线反常吸收的工作是如何激发了他们远在英国进行的有关研究"．

看来在80年代的今天，安德逊和奥恰里尼都强调，早在30年代赵的工作确实激发了他们所完成的革命性的研究．这一研究转而导致物理学家对量子电动力学的理解．而他们并没有提及当时与之相关的赵的竞争者的工作．

在本文中，我们追溯1930年发现反常吸收和附加散射线的历史．研究赵在其中做出的实质贡献，以及他的工作对于以后布莱克特和奥恰里尼关于电子对湮灭的假设具有多么重要的意义．

二、背景

在物理学中许多重要的事情发生在1930年前后．这是一个极其活跃、激动人心，而又令人迷惑的时期．

在这些迷惑与不解之中，很大一个问题是电子和质子究竟是否是核的组成．由于在当时仅有这两种已知的基本粒子(不包括光子)，因此人们自然地假定核是由它们构成的．然而这一假定面临着许多严重困难．另一个谜团来自β衰变谱似为连续的观察结果．而这一点甚至曾使玻尔和其他人以为在β衰变中能量是不守

恒的.

而在理论的范畴中,狄拉克方程和空穴理论也还苦于缺少一种本质的要素,而遭到大多数权威物理学家的反对. 当然任何人都不能不承认狄拉克解释电子自旋和磁矩的辉煌成就. 它出自于完全的独创性和简捷的数学方法. 但是负电子海仍被普遍认定是有缺欠的. 泡利曾说:

"任何有这种缺欠的理论只能与偶然的验证相一致."

针对这种背景,从实验上研究象康普顿散射这样的涉及电子的散射过程并验证理论计算是很有意义的. 当时有三个不同的公式描述康普顿散射:

(a) 康普顿公式:

康普顿修改 J.J.汤姆逊的经典理论来计算波长位移和反冲效应. 他得到如下的截面公式:

$$\sigma = \frac{8\pi}{3}\frac{e^4}{m^2c^4}\frac{1}{1+2\alpha} \tag{1}$$

其中 $\alpha = h\nu / mc^2$,这不同于汤姆逊的结果. 康普顿的理论还在另一方面不同于 J.J.汤姆逊的经典理论:对于硬γ射线,出射波集中于向前的方向. 从量子理论的观点来看,正如康普顿自己所指出的那样,他的公式在理论上是不正确的.

(b) 狄拉克和高登公式:

狄拉克和高登从量子力学出发,使用不同方法推出了相同的公式:

$$\sigma = \frac{2\pi e^4}{m^2c^4}\frac{1+\alpha}{\alpha^2}\left[\frac{2(1+\alpha)}{1+2\alpha} - \frac{1}{\alpha}\ln(1+2\alpha)\right] \tag{2}$$

这里没有考虑自旋.

(c) 克莱因-仁科公式:

$$\sigma = \frac{2\pi e^4}{m^2c^4}\left\{\frac{1+\alpha}{\alpha^2}\left[\frac{2(1+\alpha)}{1+2\alpha} - \frac{1}{2}\ln(1+2\alpha)\right] + \frac{1}{2\alpha}\ln(1+2\alpha) - \frac{1+3\alpha}{(1+2\alpha)^2}\right\} \tag{3}$$

这公式是把狄拉克相对论波函数移植到经典辐射理论推导出来的. 在狄拉克空穴理论之后,狄拉克和华勒表述出,在空穴理论中一个正确的二阶微扰计算正好给出和克莱因-仁科公式相同的结果.

公式(1)(2)(3)在低能界内相同,而在高能即硬γ射线区域则变得不同. 所以在 1929—1930 年间,为了检验和区别这些理论,帕萨母那的赵、英国剑桥的塔伦特和柏林-达赫莱姆的梅特纳和赫布菲尔德做了上述三个测量硬γ射线吸收系数的实验.

三、反常吸收

赵忠尧,1902 年生于中国浙江省,1925 年毕业于东南大学化学系后,担任清华大学叶企荪先生的助教. 1927 年夏赵来到美国在加州理工学院成为 R.A.密立根的一名研究生. 密立根叫赵测量硬γ射线在不同物质中的吸收系数以检验克莱因-仁科公式(3). 据赵本人在 1986 年回忆说,密立根最初曾经是倾向于相信公式(2)而不是克莱因-仁科公式(3)会与宇宙线数据一致.

1929 年将近年底的时候赵完成了实验. 他发现对于轻元素来说,实验结果符合克莱因-仁科公式,而对于重元素例如铅,实验测得的吸收系数值大于公式给定值. 密立根起初不相信赵的结果,因而赵的文章被拖延了数月没有拿出去发表. 幸而鲍文教授知道赵的实验细节,他使密立根确信赵的实验是可靠的,并建议尽快将其文章送出去发表. 该文送稿的日期为 1930 年 5 月 15 日. 在此之前二周,1930 年 4 月 29 日,赵的结果宣读于美国国家科学院.

塔伦特和梅特纳和赫布菲尔德也独立地获得与赵相同的主要结果, 但在细节上有些不同:

(a) 在塔伦特的实验中,吸收系数对介质原子序数的依赖是不规则的. 而在梅特纳和赫布菲尔德的实验结果中,更有一个"跳跃",这些都导致疑议. 而与此相反的是,赵的结果非常平滑,是完全可信,不容置疑的.

(b) 所用的探测器很不相同. 据赵在 1986 年所说,他用的探测器是 25 个大气压下的

气压电离室和真空静电计．它们是更为可靠的仪器．

所有这三个实验发现的硬γ射线在重元素上的附加吸收，被称为“反常吸收”或曰“梅特纳-赫布菲尔德效应”．后一种说法源于梅特纳和赫布菲尔德的朋友．所有这三篇发表的文章也都推测反常吸收是由于某种未知的核效应引起的．

四、“附加散射线”

为了更多地了解硬辐射在物质上的吸收机制，在紧接着第一个实验之后，赵开始进行又一个新的实验来研究散射辐射的强度和角分布．这是一个困难的实验．原因在于散射辐射比背景更弱．实验结果发表于1930年．在这以后一年，其他实验组才开始致力于研究散射辐射．这些后来的工作做的不漂亮且没有结果．它们引起更多的争议，分散理论家的注意，因而很不幸地减小了赵的实验结果的影响力，我们将在后面第六节里重述这些要点．

赵在第二个实验中发现：

(a) 伴随反常吸收，存在着一种硬散射之外的附加散射辐射．

(b) 这种附加散射辐射实质是各向同性的．

(c) 测得这种附加散射辐射的波长为22X.U.即相当于0.5MeV的光量子．

赵得出的所有上述结论都是非常惊人地恰好正确．他实际上已经发现了电子对湮灭！在过程$e^+e^- \to \gamma\gamma$ (4)中，每个光子带走约0.5MeV的能量，而这正是赵所发现的．然而在当时，以及直到那以后很久都没有人理解其理论上的意义．这一点我们将在下一节讨论．

五、解释

从1930年中直到1933年初，在二年半的时间里，有三个课题摆在物理学界面前，按照后来的理解，它们包含量子电动力学(QED)的所有方面：

反常吸收

附加散射线

狄拉克电子论

关于狄拉克理论的深入讨论包括奥本海默、泰姆和狄拉克对于湮灭过程(4)截面的计算．但是这些作者中没有一个人把这一过程和赵的附加散射辐射联系起来．(其原因很可能是在于当时核物理处于非常混淆的状态，于是很自然地赵的结果和反常吸收这二种陌生的现象都被认为是核现象了)．

在这一时期我们找不到任何关于附加散射辐射的理论文章．(从下面的第六节可以看出，到1933年，用电子对的湮灭和产生来表述的最终解释是如何地基于附加散射辐射而不是反常散射．)

对于反常吸收，当时有很多理论讨论．奥本海默试图构想其来源于光电效应，但这将导致结论说QED是错误的．在当时这是一个很流行的题目．海德堡和卡蒙则推测这是由于某些核过程引起的．

这些理论工作都未能获得重大的进展．直到安德逊于1932年9月发现了正电子．几个月以后，布莱克特和奥恰里尼用绝妙的触发云室又得到了更多的正电子．这时候，关于正电子穿过物质时的性质这样一个问题才被提出来了．它将布莱克特和奥恰里尼引导到狄拉克早些时候关于湮灭过程(4)的计算．以及得出这样一个推论：赵的附加散射线其实是湮灭过程的结果．

布莱克特和奥恰里尼还推测正电子产生于对生成的过程，但他们没有得出在重核库仑场中QED对生成过程的正确概念．而就在数月之后，奥本海默和普拉赛特按照狄拉克理论即QED产生和发展了这一概念．他们发现这个结果与早时关于反常吸收的实验发现相一致．而且安德逊在云室中也观察到了光子生成的电子对．

1933年之后，随着所有上述问题的澄清，QED进入了在所有应用方面都取得巨大成功的鼎盛时期．唯一留下来令人不安的事情只是发散问题了．

六、赵的决定性数值0.5MeV

布莱克特和奥恰里尼的文章具有重大的影

响，这不仅因为他们报道了许多新发现的正电子事例，而且因为他们解释出反常吸收和附加散射线是分别由对生成和对湮灭引起的．这就导致了物理学家关于狄拉克理论是否正确这一概念上的大翻身．关于这一点，在文章中最为关键的段落是：

也许γ辐射被重核的反常吸收*是与正电子的形成及其在再次辐射中的消失相联系的．在事实上，实验发现这种再次发射的辐射具有与预期湮灭谱相同量级的能量．(A)

格雷和塔伦特，'Proc. Roy. Soc' A卷136，第662页(1932)．

梅特纳和赫布菲尔德，'Naturwiss.'第19卷第775页(1931)．

赵，'Phys. Rev.' '物理评论'第36卷第1519页(1931)　(B)．

段落(A)是伟大的物理．注脚(B)是疏忽的历史．特别是这个注脚对赵忠尧太不公平了．它包含二个印刷上或者是粗心造成的错误．

(i) 赵在物理评论上的文章发表于1930年而不是1931年．它领先于其他二篇文章1或2年．

(ii) 尽管文内的星号是打在"反常吸收"之上，但所有这三篇引述的文章都是关于附加散射线，而不是关于反常吸收的．

更重要的是，布莱克特和奥恰里尼的论据其实是在于赵一个人的文章．正如我们现在所要表明的，这一事实是被这样一个不加分辨的注脚给弄模糊了．

布莱克特和奥恰里尼是在他们名为"正电子假设"的文章里的某一节中推出上面引述的伟大假想(A)．这一节开始提出为什么正电子"至今逃避观察"，然后说："显然它们作为自由粒子，只有有限的寿命．因为它们在正常条件下不表现出与物质的结合……似乎……它们好象是与负电子发生反应形成2个或更多的量子然后消失的"．

他们继续说到这种消失机制是由狄拉克电子论直接给定的．而且他们曾和狄拉克谈过．后者曾把自己那篇1930年的关于给出湮灭截面的文章给他们看．

布莱克特和奥恰里尼然后结论说，狄拉克理论这样估计正电子的寿命："以在云雾室观察正电子而言，它的寿命是足够长了．但要解释为什么用其他方法发现不了它，又只能说它的寿命还太短"．接下来他们又说到，尽管如此，要观察到这一湮灭过程，还是有可能的．因为它引发一个峰位在于0.5MeV的光量子谱，然后就是引文(A)．

这整个一系列推论反映着宏大的物理思想．它们也表明布莱克特和奥恰里尼的立论焦点是在于湮灭过程．这一过程是以其引发一个"附加散射线"而被确认的．而这种确认的能力又集中在于这样一个事实，即湮灭辐射谱峰值为0.5MeV(见上文)．这一点与引文(A)所说"实验上已经发现"的内容是一致的．由此可见，实验证明附加散射线的能量为大约0.5MeV这是他们立论的决定性根据．

由于某种原因，布莱克特和奥恰里尼没有提及，在他们上面的引述(B)所提及的三篇文章里(这三篇文章都是关于附加散射线的)，只有赵的文章给出了正确的决定性的数值0.5MeV．梅特纳和赫布菲尔德1931年的文章比赵晚了一年，而且根本没有找到附加射线．格雷和塔伦特1932年的文章比赵晚了二年，在大约0.47MeV处找到了附加散射射线，可又同时找到一个大约0.92MeV的分量．这是十分令人混淆的．而且甚至直到后来在他们1934年的文章中还仍然存在．

人们也许会想到这样的问题，为什么布莱克特和奥恰里尼的文章对1930年的三篇关于反常吸收的文章完全不加引述(这些文章曾比附加散射线引起更多的注意．因为它是较早的发现，而且是基于难度较小的实验，见第五节)．对这个问题的回答是布莱克特和奥恰里尼立论的焦点不在于此，而在于湮灭过程．进一步说布莱克特和奥恰里尼并没有象在库仑场的情况那样钉住对生成的机制．这一工作是后来由奥本海默和普拉赛特从理论上进行的．

综观对生成和对湮灭的发现历史，我们深

深地被赵的实验所感触．这些实验探索到了重要的问题．赵的竞争者们在反常吸收和附加散射线这二个实验中都曾陷入失误．这一事实又证实了这些实验是很难做的．它们具有简捷的经典色彩，具有经得住时间考验的可靠性．不幸的是由于布莱克特和奥恰里尼在文章中疏忽的引证，以及由于其他实验造成的混淆和争议，赵的文章没有获得其本应充分获得的评价．

(继尧译自《现代物理国际通讯 A》，第 4 卷 17 期 4325—4335 页)

赵忠尧先生生平

著名物理学家、我国核物理研究的开拓者、中国科学院院士赵忠尧教授因病医治无效，于1998年5月28日下午15时55分不幸逝世，享年96岁．

赵忠尧教授1902年6月27日出生于浙江省诸暨县，1925年从东南大学毕业后任清华大学助教．1927年去美国加州理工学院，从师于诺贝尔奖金获得者密立根教授，1930年获得博士学位．1929年他和英、德的几位物理学家同时发现了硬γ射线的反常吸收(实际上是γ射线在物质中产生电子对的效应)．在进一步的实验中他首先观察到硬γ射线在铅中引起的一种特殊辐射(正负电子对的湮灭辐射)．这些结果是正电子发现的前导，得到国际物理学界的高度评价．

1931年他回国后任清华大学物理系教授，在我国首次开设核物理课程，并主持建立我国第一个核物理实验室．1937年抗日战争爆发，赵忠尧教授离开北平，先后到云南大学、西南联大和中央大学任教，培养了一批以后为我国原子能事业作出重要贡献的人才．1946年，他受当时政府的委派，赴比基尼群岛参观美国的原子弹试验；之后又在美国麻省理工学院、加州理工学院等处进行核物理和宇宙线方面的研究．

中华人民共和国成立后，1950年他冲破重重困难，毅然回国．

他回国后参与中国科学院近代物理研究所的创建．利用他回国时带回的当时国内尚无条件制备的静电加速器部件和实验设备，先后于1955和1958年建成了我国最早的70万伏和200万伏高气压型的质子静电加速器，为我国核物理、加速器和真空技术、离子源技术的研究打下了基础．以静电加速器为基础，又主持建立了核物理实验室，具体领导和参加了核反应研究，为开创我国原子核科学事业作出重要贡献．1972年他参与高能物理研究所的筹建工作，还多次向有关部门提出了发展我国科学事业的许多具体建议．他历任中国科学院物理研究所副所长、原子能研究所副所长、高能物理研究所副所长．

赵忠尧教授在教育事业方面有很大贡献，三四十年代先后在国内很多知名大学担任教授，五十年代又为中国科技大学创办近代物理系，在师资队伍、实验室建设、教学质量等方面都下了很大功夫．1995年，由于他对我国物理研究的杰出贡献，他获得何梁何利科学与技术进步奖，他将奖金全部捐献，在几所大学设立了“赵忠尧奖学金”．

赵忠尧教授1948年当选为中央研究院院士，1955年受聘为中国科学院数理化学部学部委员．他曾担任中国物理学会副理事长、中国核学会名誉理事长．他是第一至第六届全国人民代表大会代表，是第三、四、五、六届全国人民代表大会常务委员会委员．

赵忠尧教授以毕生精力从事科学和教育事业，为发展我国核物理和高能物理研究事业、为培养我国原子能事业、核物理和高能物理的实验研究人才作出了重大贡献，是我国原子核物理、中子物理、加速器和宇宙线研究的先驱者和奠基人之一．

赵忠尧教授赤忱爱国，正直刚毅，艰苦朴素．他一贯坚持实事求是、刻苦钻研的科学精神，锐意进取，严谨治学．他学问精深，德高望重，平易近人，深受同事和学生们的爱戴．他为我国的物理研究和社会主义事业作出了杰出贡献．

赵忠尧教授的科学业绩和优秀品格永存！

(中国科学院高能物理研究所供稿)