

# 在GSI的重离子碰撞中出现令人迷惑不解的正电子峰

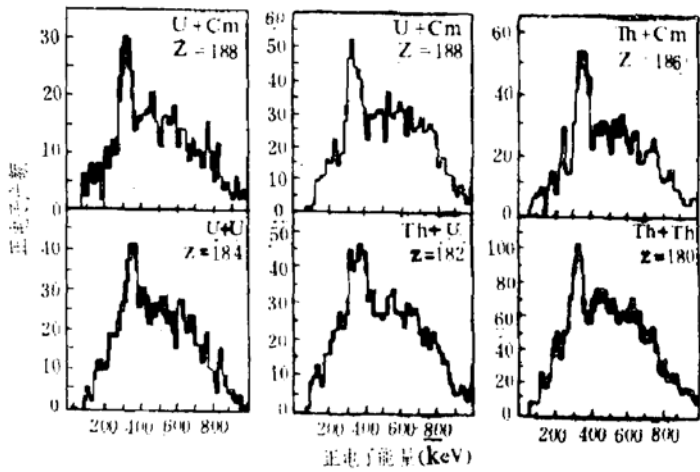
B. Schwarzschild

“真空火花” (“sparking of the vacuum”) 是量子电动力学非常奇异的预言之一。在探索“真空火花”时，塔姆施达特 GSI 的两个重离子实验小组发现了相当出人意料并且让人非常迷惑不解的事情。如果有某个电荷数  $Z$  足够高的核，在最低位电子轨道上有个空位，那末它由真空自发产生一个电子-正电子对较之失去这个轨道空位，在能量上要更容易些。事实上，这就是 QED 所预言的真空火花，或者说“自发正电子发射”。或许能够指望，这个有点稀奇古怪的  $e^+e^-$  对的产生是出自虚无，除非该真空中存在  $Z=137$  时出现的超强静电场。对于  $Z=137$  的点电荷的核来说，狄拉克方程的束缚态解是不存在的。但是对于有限直径的真实核来说，详细的 QED 计算预言，自发正电子发射在  $Z=173$  时才第一次出现。

当然我们至今还远未知道  $Z$  高至 137 的核，更不用说  $Z=173$  的核了。那是在十六年前 GSI 的重离子设备将要出现的时候，那时尽管 GSI 的 UNILAC 加速器尚在设计图板上，它却展现了第一次为实验者提供一直到 U 的高能离子束的前景。当时 W. Greiner (Goethe University, Frankfurt am Main) 和他的同事们就指出：对于 U 核和其它很重核之间碰撞时“超临界”核 ( $Z$  大于 173) 的情况，能够进行简洁模拟。苏

联的 Yakov Zeldovich, S. S. Gershtein 和 V. S. Popov 也独立地提出了相同的思想。

到1981年为止，在塔姆施达特设备上已成功进行了几个这类实验，并且在大力探索寻找自发正电子发射的过程中正在得到富有刺激性的初步迹象 (见 Physics Today, 1982, No.8, p.24)。但是随着实验研究的进展，结果却变得越来越难以理解。在范围从亚临界 Th 打 Ta ( $Z_{Th} + Z_{Ta} = 163$ ) 到超临界 U 打 Cm ( $Z_U + Z_{Cm} = 188$ ) 的一系列碰撞实验中<sup>1-5</sup>，在射出的正电子的能谱中都一直出现令人迷惑不解的正电子单色峰。量子电



在总核电荷  $Z$  范围从 180 (Th 打 Th) 到 188 (U 打 Cm) 的重离子碰撞中，在射出的正电子谱的大约相同能量处，总是出现非常窄的和固定的正电子峰。这些数据 (见参考文献 3) 是用 Darmstadt 的 GSI 重离子加速器上的 EPOS 谱仪得到的。在每种情况下，轰击束能量都这样选择 (接近每核子 6 MeV)，以便对头弹性库仑散射时能够使碰撞核表面恰好仅仅相切。只是在轰击能量非常接近“库仑位垒”时，才能辨认出这些峰。

动力学预言，自发正电子峰的能量是 $Z$ 的特别敏感的函数。但实验结果却完全违背上述预言，不管碰撞核的电荷是何值，峰总是不变地保持在300keV附近。正电子峰惊人的窄（小于80keV）也是令人迷惑不解的。这表明它的来源是出人意料的长寿命的，因此这就暗示：这些碰撞中以前尚未知道的基本粒子玻色子正在产生和衰变，或者形成了准稳定的超重核类，或者两者兼而有之。

**现在处境非常困难。**如果我们现在仍然把重复出现的300KeV正电子峰，理解为QED所预言的自发正电子发射的直观表现形式；那末将面临着非常困难的局面。另外，也基本上排除了它是来自核物理和原子物理的甚多的屡见不鲜的效应。既然其它解释在实验数据面前都已束手无策，这就预示着朦胧出现了另一种富有刺激性的可能性。电子—正电子谱仪（EPOS）协作组的一个成员（GSI, Yale, Frankfurt, Heidelberg, Brookhaven, Mainz), Jack Greenberg (Yale) 谨慎地说：“尽管从理论家的常规思维观点来看是牵强附会的，我们实验工作者却不会忽视下述明显的可能性：相同的峰能量或许来自至今尚未探测到的轻的中性玻色子到 $e^+e^-$ 的衰变”。

尽管读者已被最近几十年发现的成百“基本”粒子弄得疲惫不堪，但是或许会注意到：这个新粒子的质量将只有电子质量的三倍。迄今为止，比电子重的最轻的已知粒子是 $\mu$ 介子和 $\pi$ 介子，它们都比电子约重200倍。

如此轻的玻色子几乎不可能是一个由夸克组成的通常的强子。这个300KeV正电子峰吸引了基本粒子理论家的注意，通常他们总是瞧不起任何一个重于氦核的核。现在已经这样猜想，如果这种新的轻粒子确实是玄妙的正电子的来源，那末它或许是“轴子”（“axion”），或者是有待粒子理论家探索的一些其它的奇异的实体。至于为什么在很重的离子间的碰撞中才第一次看到这样的粒子，Greenberg指出：简短些说只有在几乎

200个质子瞬间聚集在几费米的空间中时，才会存在这种非常强的电场。他推测这种生成机制或许需要这样“珍奇的条件”，也许需要在形成准稳定超重核以前维持较长的持续时间。

如果正电子峰确实来自某固定小质量玻色子的 $e^+e^-$ 衰变，那末用电子伴随正电子的符合测量的方法，就应当能够加以验证。恰好，这样的符合研究由两个GSI谱仪正在进行之中。在任何一种情况下，Greenberg指出：“低能单色正电子峰事实上都是珍品。这就表明是相当有趣的异乎寻常的来源”。

**自发正电子发射。**氢中最低位电子轨道的结合能约为10eV，并且在非相对论近似中当核电荷增加时结合能随 $Z^2$ 增加。电子静能量的两倍就是 $2m_e c^2$ （约1MeV）。当 $Z$ 变成大到使结合能超过 $2m_e c^2$ 时，会发生什么呢？对于点核而言，这个问题尚未解决。因为 $Z$ 超过137时狄拉克方程不能提供解，此时结合能增至 $m_e c^2$ 。在七十年代初期，Greiner的Frankfurt小组和苏联的理论家就进行通信，详细地讨论了重离子碰撞中有限尺寸的超重核和它的模拟的情况下，低位电子能级的 $Z$ 相关性。对于 $Z$ 大于173的这些有限尺寸核的计算情况，在最低位电子轨道的结合能超过 $2m_e c^2$ 时，环绕裸核心的不带电的真空的存在时间并不长于最低位能态。在该真空中耗去 $2m_e c^2$ 能量而自发产生一个 $e^+e^-$ 对，这种可能性大于电子落入环绕核心的深的超临界静电位垒的最低位能态。量子电动力学对此已详尽地作出精确预言：如果在 $Z = 184$ （铀原子序数的两倍）的准真实可信原子的K壳层存在某真空，真空自发火花将落入这个真空，并且过程是相当瞬时的，约需 $10^{-19}$ 秒。伴随电子的自由正电子创生离开时其动能为几百KeV。标志这样的自发 $e^+e^-$ 产生的单色正电子谱只有几KeV宽，这与 $10^{-19}$ 秒寿命相应的海森堡测不准量相当，当然已经假定我们处理的是处于静止状态的 $Z = 184$ 的静态核。

**缺乏这样的超重核。**我们对超过 $Z = 109$ 范围的核至今还一无所知，这就使情况变得极其复杂化了。人们寄希望于GSI的重离子碰撞能够提供对事实上没有的超重核的适当近似。Greiner和其同事们进行了下述计算：当两个重核相互靠近并弹性散射、短时间形成“准原子”电子组态时，电子能级怎样随两核间距离（也就是时间）变化。随着Unilac的离子束能量接近每核子6MeV，以 $180^\circ$ 卢瑟福轨道弹性散射的核，应当大约恰好粘结在靶核上。

在这样的情况下，Frankfurt理论家已经算出：当两个核的间距小于某临界距离（几打费米）约 $10^{-21}$ 秒时，与此同时产生自发正电子发射。这个瞬间十分短暂，要比稳定超重核中发生过程的特征寿命短一百倍。

对自发正电子发射所预言的惊人特色是对 $Z$ 的小变化它都极其灵敏，此处的 $Z$ 是碰撞核的电荷的和。在 $Z$ 超过173时，自发正电子发射开始，得到的正电子峰的能量预期随 $Z^{20}$ 变化，而峰强度显示了甚至更加惊人的 $Z$ 相关性。人们曾经希望，如此奇怪的 $Z$ 相关性应能作为自发 $e^+e^-$ 对产生的清楚的实验特征。对于核间最靠近距离的灵敏相关性（正如用束流能量和散射角所测定的那样），也已预期能够表征这个现象。对于空想的静态超重核情况计算出来的极窄的正电子峰，无论如何，在重离子碰撞的实际实验中会极大地展宽，原因在于超临界场的持续时间非常短。

超临界静电场中 $e^+e^-$ 对的自发产生与光子到 $e^+e^-$ 对的“对转换”，在性质上是十分不同的。前者是通过带电粒子，而后者是扰动QED效应。相反自发 $e^+e^-$ 产生是非扰动QED过程，它能存在于纯静电场中。应能预期：在环绕足够高电荷的核的真空中，它是相当自发的，需要无时间相关性的场。因此，这就涉及到真空火花。

在重离子碰撞中寻找真空火花，被另一个竞争的正电子发射过程严重复杂化了。这

个过程就是“动力学 $e^+e^-$ 产生”，它引起碰撞中的电场的迅速改变。要对这两个过程进行详细计算都是很困难的。

正当这类实验在GSI于七十年代晚期开始进行的时候，计算就已警告：在卢瑟福散射碰撞中，宽广的动力学 $e^+e^-$ 本底总是淹没自发 $e^+e^-$ 信号。

**实验研究。**当Unilac加速器于1976年开始运行的时候，Greenberg、Egbert Kankeleit和Hartmut Backe (Technische Hochschule, Damstadt)、Paul Kienle和Christopher Kozuharov (Technische Universität, München) 与Helmut Bokemeyer (GSI) 就相互协作，开始了在重离子碰撞中寻找正电子产生的实验。这些最初的研究证实了以前那个让人悲观的警告，即动力学正电子产生的本底将会支配整个的正电子谱。或许能够希望：自发产生信号能被某种机制增强，这种机制多半是准稳定超重核复合物的形成。

在用两个早已存在的正电子谱仪进行了初期测量之后，这类探索扩展到建造更有综合能力的EPOS谱仪。建造者为Greenberg、Bokemeyer、Klaus Bethge (Frankfurt)、Dirk Schwalm (Heidelberg) 和来自GSI、Yale及Frankfurt的合作者们。尽管新探测器的螺旋形正电子传输效率高，早期的EPOS实验在寻找U-U碰撞中所希望的自发正电子发射信号方面还是都失败了。如果来自动力学正电子产生的本底占支配地位、并且由卢瑟福散射遭遇的短暂性所预期的自发正电子峰的展宽与削弱，那末得到清楚信号的可能性的确是相当悲观的。

**第一批300KeV正电子峰。**第一批300KeV正电子峰终于在1983年由EPOS小组和Kienle小组报导。前者研究了U打U ( $Z = 184$ ) 和U打Cm ( $Z = 188$ ) 碰撞<sup>(1)</sup>，而后者用较古老的环形“桔子”谱仪研究了U-U和U-Th ( $Z = 182$ ) 实验<sup>(2)</sup>。EPOS小组的策略是把研究散射变量的相空间作为摆脱讨厌的本底的一个方法。这些峰只出现在束流能

量接近“库仑位垒”的很窄的范围内，在U打U时为每核子5.8MeV。用寻找在 $180^\circ$ （对头碰）卢瑟福弹性散射中什么束流能量恰好引起两个核表面粘住的方法，计算了已知束流和靶核尺寸及形状时的库仑位垒能量。此外，EPOS小组还看出：在定义为弹性散射的角度—角度曲线中，只有当两个散射核的反冲角间的关系是非常接近但又不恰好相等时，峰才会超过动力学正电子发射本底。运动学考虑是选出造成EPOS实验中300KeV峰的那些碰撞，这样做有双重任务。它们看来是选出了两核仅仅相切的几乎弹性的碰撞；并且它们截除了大部分动力学电子本底，这本底似乎是由更加紧靠弹性散射的情况造成的。

EPOS对反冲核的运动学分辨是出色的，这在选择感兴趣事件时起着重要作用，Greenberg这样告诉我们。除了在正电子输运螺线管一端提供高分辨位置能量测量的硅探测器以外，EPOS探测器系统还有气体雪崩探测器，后者用于高精度测量散射核的反冲角，但能量分辨有限。

**它们是什么？**对于自发正电子发射的假说而言，1983年的这些实验结果开始提出了严重的问题。这两个实验小组都报导了正电子峰惊人地窄到小于80 KeV，并且他们指出在Z从182到188的区间时几乎没有变化，如有变化也只是一丁点儿。对于简单的卢瑟福散射遭遇的情况而言，80KeV的宽度实在是过于窄了。根据海森堡测不准关系，它是难以逃逸的。如此窄的峰的来源，不管它是什么样的，都必须至少持续 $10^{-21}$ 秒。事实上，这个宽度和由静止较长寿命的源所预期的多普勒展宽是一致的。或许它是被准稳定超重核形成所拉长的自发正电子发射。这种推测本身就使核物理家深感兴趣，他们长期以来一直寻找Z超过137时的“稳定岛”。

事实上Greiner和他的理论家同事们已能指出EPOS的U—Cm数据中的宽度、位置和强度；至少已能解释在U—Cm碰撞有个

小的份额，能够形成Z=188的大的亚稳定的双核子系统。但是他们的理论仍然无法解释剩下的较轻核—靶的碰撞数据。Cm (Z=96) 是能够得到的作为靶材料的最高电荷的核类。采用碰撞超临界相期间准分子核形状的有关合理假定，Greiner的计算预言U—Cm时的正电子峰能量约为320KeV，这与数据符合很好。但是他还预期自发正电子发射的峰位置有Z<sup>20</sup>的相关性，由此得到峰能量随靶变轻很迅速地减小，一直减小到U—Th (Z=180) 时的60KeV。

EPOS小组在改进探测器系统之后，就开始系统研究峰的Z相关性。最初致力于研究Th+Th (Z=180)、Th+U (Z=182)、U+U (Z=184)、Th+Cm (Z=186) 和U+Cm (Z=188) 这些超临界情况。这些观测结果<sup>(3)</sup>与对自发正电子发射预言的Z<sup>20</sup>相关性非常不同。在每一种情况下，在接近330KeV处都出现了窄的正电子峰（宽约75KeV）。实质上都是碰撞的相同的运动学事例，提供这些峰的碰撞其束流能量和散射角总是这样，即两个核仅仅相切并且角—角曲线恰好刚刚离开弹散曲线。

Kienle的桔子谱仪小组最近完成了高统计学的实验<sup>(4)</sup>。实验表明峰的强度与散射角只有微弱的相关性，“因此表明是各向同性产生机制”。他们还指出，产生的强度并不是束流能量的尖锐成峰的函数，但和EPOS小组报导的结果有相当类似的形状。

或许能够认为：在如此多的不同散射实验中正电子峰的一致性意味着，实际上总是处理的碰撞瞬间相同Z的情况，即是说不知为什么不多几个质子蒸发离开核表面从而总是形成Z相同的超重核。但是Greenberg指出，EPOS反冲探测器的能量分辨适合于探测这样的质子逃离的情况。另一方面，采用曲折繁琐和难以置信的假定，然后计算就能得到不变的峰能量。超临界电子能级决定于接触瞬间准分子核的形状。如果假定两核仅仅相切时是哑铃形状的，这好象是有道理

的。那末，峰能量的数值范围从60到320 KeV。为了对所有的碰撞核类都得到不变的峰位置，已经做出了奇异的假定，即在每种情况下核形状都是严重的和不同的变形，以便对该超临界K壳在每一时刻都得到相同的能级。

暂且不论如此拙笨的假定在美学上多么令人讨厌，EPOS小组现在主张用更多的直接证据，来比较正电子峰的来源。在完成一系列超临界碰撞实验之后，该小组研究了亚临界情况——Th打Ta ( $Z=163$ )。原来以为在这种情况下，无疑会有不可预料的自发 $e^+e^-$ 产生。但实验结果却是让人意外，恰好在同一老地方出现了另一个窄的正电子峰。这个小组仍然在研究新的Th-Ta数据的可能的一般解释，但是“把所有这些接近300KeV的峰都看作是自发正电子发射，却清楚地变得越来越不可能了。”

桔子谱仪小组最近也已开始了几个亚临界散射实验。对于U打Ta ( $Z=165$ )的情况，他们发现了弱正电子线，它比超临界峰的能量约低15KeV。Kienle的小组最近也做了U打Au的系列实验 ( $Z=171$ )，但是实验数据仍在计算评价之中。大体上说来，这个小组已发现的峰强度对Z有很强的相关性，“该过程的特征与很强的电磁场的存在有关”。

在对这些难以理解的单色峰进行奇特解释之前，必须排除能用核物理或原子物理现象进行“通俗的”解释的可能性。Greenberg说：“我们尝试了所有明显的情况，并且至今没能提供任何东西”。各个核的激发或瞬时复合核的激发与后继的退激，这种退激通过 $\gamma$ 到 $e^+e^-$ 的内转换方式进行，这就应当意味着在 $\gamma$ 和 $e^-$ 谱中有一个清楚的信号，但在两个谱中都没有看到。在任何一种情况下，如果用各个核的激发的方法来解释，峰都是太窄了。在最近的Physical Review Letter<sup>(3)</sup>上，Greenberg和他的同事们总结说：“这些峰不能认为是来自任何一个通俗的来源。这

些通俗来源只涉及受激发终态核中的电磁跃迁。在系统以质心速度运动以前，峰的形状与多普勒展宽发射是一致的”。

关于这些峰来自以前尚未知道的轻玻色子这种可能性，显然下一步是寻找来自玻色子的想象中的 $e^+e^-$ 衰变。但这是相当困难的，因为这些电子会混杂在来自碰撞的其它电子碎片之中。Greenberg告诉我们：“但是我们的大多数最新实验已使我们信服，上述实验是行得通的”。因为一些玄妙的新的长寿命玻色子的两体衰变产生了 $e^+$ 和 $e^-$ ，而 $e^+$ 和 $e^-$ 的多普勒位移是数值相等但方向相反。把它们的能量的和进行标绘得到的峰，将大大地窄于仅从多普勒展宽的正电子谱得到的峰。

Kankeleit的小组最近也已着手广泛研究符合电子。Kienle告诉我们，已经预计在(1985年)10月29日在GSI召集一次专题讨论会，以便“鼓励一致努力寻找这些玄妙的正电子线的来源”。这次讨论会将把这三个小组最近数月积累的大量数据集中在一起。尽管在重要方面意见一致，一些实验上的矛盾分歧仍然有待反复推敲。

**理论家的评论。**在最近的Physical Review Letter<sup>(6)</sup>上，Oak Ridge的理论家Baha Balantekin、Christopher Bottcher、Michael Strayer和Suk-joon Lee研究了下述可能性：正电子源或许有点象轴子(axion)，一个中性的伪标量玻色子。它是粒子理论家Steven Weinberg和Frank Wilczek 1978年在量子色动力学中为遏止CP非守恒效应而提出来的。现在假定观测到的300KeV正电子峰是来自轴子的 $e^+e^-$ 衰变，Balantekin和他的同事们从GSI的数据算出，它的质量应当是电子的3.2倍。用记录轴子对电子反常磁矩的影响的方法，他们对轴子与 $e^+e^-$ 的耦合提出了上限，但结果并未看到。因此他们得出结论：“轴子的寿命应当约为 $10^{-13}$ 秒，这远远大于重离子碰撞时间，但又短于到正电子计数器的飞行时间”。然而他们断定：“在这些GSI

的重离子碰撞中得到的粒子，不可能是‘标准的轴子’。”现在假定这种标准轴子模型，由重离子数据的轴子的轻子耦合导出的这些参数，也同时确定了粒子的夸克耦合。在各种各样的高能物理实验中业已证明了轴子研究的否定结果。对于与此一致来说，上面的参数在某种程度上偏高。调查了有关粒子研究的大量数据，Balantekin 惊奇地发现：这些研究与天体物理学和宇宙学的约束以及各种各样的理论极限一起，看来是排除了大多数质量和寿命数值的轻的中性粒子，“除了 $3m_e$ 和 $10^{-13}$ 秒附近的某个很小的窗之外”。

Greiner和他的同事们A. Schäfer、Joachim Reinhardt、Berndt Müller和Gerhardt Soff，最近借助于GSI的重离子数据研究了許多新粒子的情况<sup>(7)</sup>，包括新的轻玻色子与碰撞离子的原子的电子而不是与它们的核耦合的可能性。但是他们得出结论：“我们只剩下了一个能够存在的可能性，即产生了一个来自核粒子流的1.7MeV的伪标量粒子”。它应当与轻夸克强耦合，但只与轻子和魅夸克很弱地耦合。他们提出安排专门设计的低能核物理实验，就能够证实或排除这个假设的新的轻伪标量粒子。“我个人的看法”，Greiner告诉我们：“是我们已看到的是来自真空衰变的正电子而不是新的玻色子，并且它们携带着有关巨核的新奇异核结构的信息”。

Oak Ridge的另一个理论家C. Y. Wong有不同的看法<sup>(8)</sup>，本文讨论的问题完全在QED的范围之内。他提醒我们注意，自发正电子发射并不仅仅是超强场下量子电动力学的惊人预言。例如，“多电子” $e^-e^-e^+$ 亚稳束缚

态，也已看到过它在 $10^{-10}$ 秒衰变到 $e^- \gamma \gamma$ 。Wong提出：300KeV正电子峰或许正在表明是电荷共振 $e^+e^+e^-$ 多电子态到 $e^+ \gamma$ 或 $e^+ -$ 正电子的两体衰变。

Yale的William Lichten和Andre Robatino 完全不愿放弃原子物理的解释。他们指出<sup>(9)</sup>了下述可能性：峰可能是在两核相互靠近到一千费米时形成的准分子轨道的结果。因此这或许就可解释窄正电子峰所意味着的长持续时间。Lichten告诉我们：“我们仍在试图弄懂：在没有核效应或奇异粒子的情况下，这样一个模型是否能够给出与Z粗略无关的峰能量”。

### 参 考 文 献

1. J. Schweppe et al., Phys. Rev. Lett. 51, 2261 (1983).
2. M. Tsertos et al., Phys. Lett. 137B, 41 (1984).
3. T. Cowan et al., Phys. Rev. Lett. 54, 1761 (1985).
4. H. Tsertos et al., Phys. Lett. B, to be published (1985).
5. H. Bokemeyer et al., GSI Annual Scientific Report (1984), p. 177.
6. A. B. Balantekin et al., Phys. Rev. Lett. 55, 461 (1985).
7. A. Schäfer et al., J. Phys. G11, L69 (1985).
8. C. Y. Wong, submitted to Phys. Rev. Lett. (1985)
9. W. Lichten et. al., Phys. Rev. Lett. 54, 781 (1985).

(颜家骏译自《Physics Today》1985, No.11)