

宇宙射线 μ 子辐射成像与反恐

周书华

美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的科学家,在 2003 年 3 月 *Nature* 登载的一篇题为《宇宙射线 μ 子辐射成像》(*Radiographic Imaging with Cosmic-ray Muons*)的简讯中宣称,模拟和实验研究表明,作为天然本底的宇宙射线 μ 子可用于探测隐藏在集装箱中的核材料,立刻引起世界上许多研究者的兴趣。因为从已知的核材料走私事件和学者的分析

来看,恐怖主义者购买或制造核武器进行核恐怖袭击是完全可能的,而且不容忽视。铀和钚是核武器的原料,理论上讲,4 千克钚就可制成原子弹,16~20 千克的高浓缩铀(其中铀-235 的浓度远高于天然铀)可制成高效原子弹。而世界上现有 450 吨钚、1600 吨铀。即使流失其中极小一部分都会对生命财产造成威胁。这些核材料的安全保障,对反恐斗争中极为重要,而宇宙射线 μ 子辐射成像技术则可能发挥独到作用。

宇宙射线 μ 子的来源

来自太空的初级宇宙射线中,质子占 90%、氦核占 9%,剩下的 1%是其他粒子。这些初级宇宙射线与地球大气层的原子核相互作用,在距离地面约 15 千米的高空便开始产生大量的多种次级粒子,沿初级粒子的运动方向簇射。其中 π 介子占很大比例, π 介子寿命很短(平均寿命为 2.6×10^{-8} 秒),中性的 π^0 衰变成一对光子,光子和电子会形成电磁簇射,通过“电子对产生”和“康普顿效应”而损失掉能量。带电的 π^+ 和 π^- 介子,在到达地面之前就会衰变生成 μ^+ 和 μ^- 粒子。 μ 子是轻子,只参与电磁相互作用和弱相互作用,由于 μ 子质量是电子质量的 206.77 倍,辐射损失远远小于电子。能量为几个 GeV 的 μ 子,在穿过某种物质时能量损失主要来自原子的电离作用和与原子核发生的库仑散射,这使 μ 子具有很强的穿透能力。 μ 子的平均寿命约为 2.197×10^{-6} 秒,在高空产生的初始能量大于 2GeV 的 μ 子可穿透大气层而到达地面,每平方米海平面上每分钟平均入射约 1 万个 μ 子,其平均能量在 3~4GeV,相当于医



学透视用的 X 射线能量的几百万倍。这些 μ 子可以穿透 2 米厚的铅。更高能量的 μ 子甚至可穿透到地面下几千米的深处。这种穿透力很强的粒子不仅在粒子物理和天体物理的研究中起着重要作用,而且由于不需要花费财力专门建造 μ 子源、不会诱发新的放射性危害,所以是非常值得开发应用的天然资源。

宇宙射线 μ 子成像的优越性

最早应用宇宙射线 μ 子的是半个世纪前一位名叫乔治(E. P. Geoge)的科学家,他当时利用宇宙射线 μ 子的衰减,测量地下隧道上覆盖的岩层厚度。乔治分别测量了隧道内、外的宇宙射线 μ 子强度,由这两组数据的比值推算出了岩层厚度。此后,诺贝尔物理学奖获得者路易斯·阿尔瓦雷斯(Luis Alvarez)在 1970 年也用同样方法对埃及金字塔进行了辐射成像研究,意欲发现金字塔中的密室。随后,美国墨西哥国立自治大学的蒙查卡-罗哈(Arturo Menchaca-Rocha)打算利用宇宙射线 μ 子扫描墨西哥的太阳金字塔,试图揭示为什么这座金字塔要建在已被废弃 600 年的城市遗址上,他还怀疑塔中一定埋葬着某个重要人物。他们将一个小型 μ 子探测器放在塔基下 8 米深的隧道中,认为经过 1 年的观测,就能知道塔内是否还有通道或密室。

研究火山熔岩的活动是利用宇宙射线 μ 子的另一类实验。在实验中, μ 子探测器放在火山周围,测量水平方向穿过火山的 μ 子。日本 KEK 的 μ 子科学实验室测量了两座活火山的火山口熔岩数量,如果熔岩表面上升,就意味着火山即将爆发。此外,利用宇宙射线 μ 子测量岩层密度的方法也已用于地质学研究。

以上都是利用 μ 子在大块材料中因损失能量而被吸收,及 μ 子通过材料后的衰减程度测量材料厚度或密度的。现在回到利用宇宙射线 μ 子探测走私核材料的问题上来。核材料(如铀或钚)具有 γ 、中子和 α 放射性,偷运者用较薄的铅、含氢材料(如乙烯)和中子吸收体(如锂、硼等)就可屏蔽放

射性，使检查人员的辐射探测器无能为力。而如果用较厚的高密度材料（如厚的钨或铅）等屏蔽，那么即使是 X 射线或 γ 射线成像技术，由于穿透能力有限，也无法探测到受到屏蔽的核材料。然而，宇宙射线 μ 子的穿透能力强，与物质原子核发生多次库仑散射后的角度偏离与物质的原子核电荷数及密度有关（对一般固体物质来说，原子核电荷数大的密度也高）。这些性质可用来分辨物质的密度。

μ 子经多次库仑散射后的累计角度偏离可近似以高斯分布表示，分布宽度（或偏离的均方根值）为

$$\sigma_{\theta} = \frac{13.5}{p\beta} \sqrt{\frac{L}{L_0}}, \tag{1}$$

其中 p 是 μ 子的动量、 β 是 μ 子的速度与光在真空中的传播速度之比、 L 是 μ 子穿过物质的厚度、 L_0 是 μ 子在该物质中的辐射长度（即 μ 子因辐射损失使能量减少到原来能量的 $1/e$ 时所通过的距离）， L_0 随物质原子核电荷数 Z 的增加而减小。因此对于同样的材料厚度 L ， μ 子在通过核材料及其他高 Z 值的屏蔽材料（如铅、钨等）时角度的偏离比通常集装箱中的常见物质（如塑料、水、铁等）要大，利用这一原理就可区分不同密度的材料（图 1）。

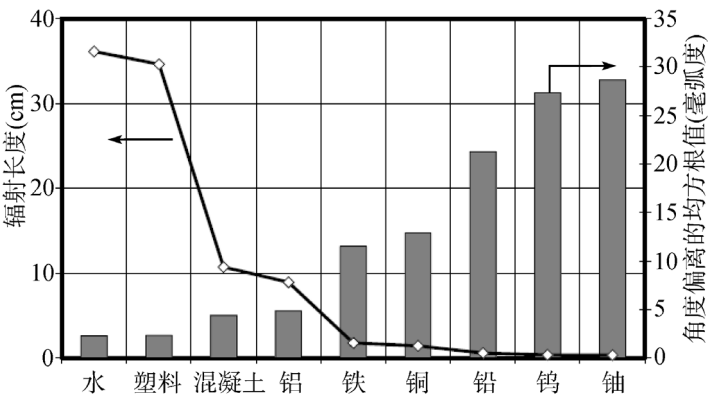


图 1 各种材料的辐射长度和动量为 3GeV/c 的 μ 子穿过 10 厘米厚材料后角度偏离的均方根值

图 2 是宇宙射线 μ 子检测装置示意图，可分为检测对象区和动量测量区。检测区中，待测对象上方和下方各有两层二维位置灵敏探测器，分别测量通过探测器的 μ 子的入射和出射方向。由此可以定出 μ 子通过材料后运动方向偏离的角度。根据这些角度的分布就可得到散射角度的均方根值。动量测量区由相间放置的两块（或多块）已知成分及厚度的板材和位置灵敏探测器组成。通过测量板材对 μ 子的散射可以估算 μ 子的动量。在关于 σ_{θ} 的表达式（1）中，用测量的 μ 子动量代替宇宙射线 μ 子的平均动量可

以得到更精确的结果。

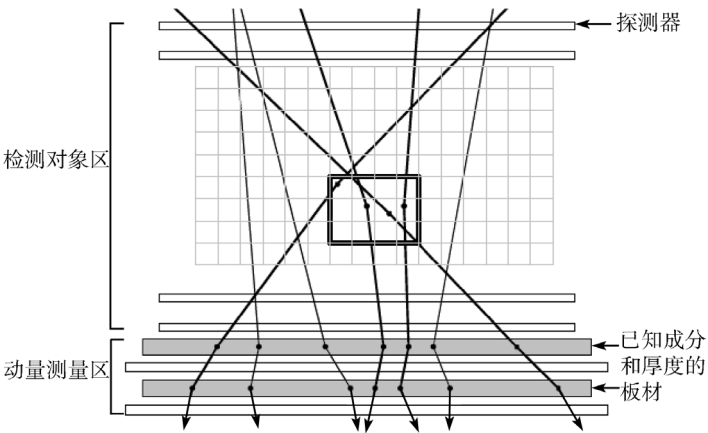


图 2 宇宙射线 μ 子检测装置示意图

图 3 是洛斯阿拉莫斯实验室利用这类装置（没有动量测量部分）测量得到的结果。在将测量数据进行重构时，假定 μ 子只经过单次散射，并以 μ 子入射轨迹与出射轨迹最接近的地方为散射顶点。图 3 中“LANL”几个字母是铅做成的，字母上下颜色较淡的条形图案是钢条形成的。不仅铅与钢材可被清楚地区分，字母与钢条的形状也看得相当清楚。这个演示图形是经过几个小时的测量得到的。实际上，如果仅仅为了判断一个集装箱内是否有可疑物，不必做出可疑物的详细几何形状，那么在很短的时间内就可以做出判断。因为走私的大块铀或钚会用高密度的材料，如铅、钨、金等，进行屏蔽。在对集装箱检测时，只有测量到高密度材料（如铀、钚、铅、钨、金等）才能产生的大角度散射事件，并发出预警信号，表示集装箱中可能藏有核材料。在两个大角度事件中，两条入射 μ 子轨迹的最接近处往往是高密度材料所在的位置。

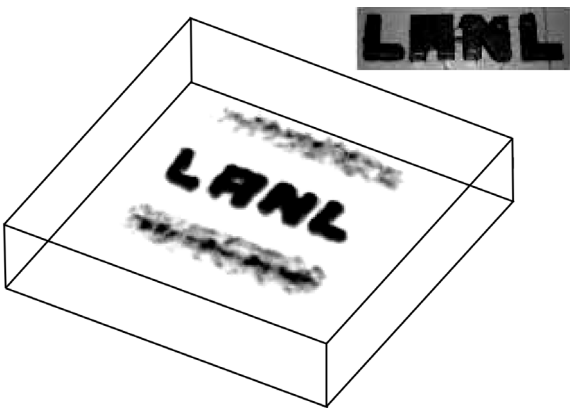


图 3 洛斯阿拉莫斯实验室用宇宙射线 μ 子成像技术区分铅（字母）与钢（条形）的结果

为了以散射实验数据快速重构散射体的图形，研究一种合适算法是非常关键的，美国洛斯阿拉莫斯实验室发展了一套数据重构算法，考虑了 μ 子经

爱因斯坦的等效原理和广义相对性原理

——问题、实质和出路

郭汉英

精确宇宙学的观测表明，物理学必须面对以宇宙常数为特征的宇宙尺度。

有关宇宙观测的数据分析，是以广义相对论和宇宙学原理为基础的。然而，分析的结果却向爱因斯坦相对论体系和量子理论，以及以之为基础的现代物理学提出重大疑难。这是对物理学前所未有的、更为严重的全面挑战。

挑战的实质是什么？如何面对？如何看待新近文献中五花八门的“奇思臆想”？

爱因斯坦认为，物理理论分为“构造理论”和“原理理论”。按照他的观点，原理理论“应用分析而不是综合的方法。其出发点和基础不是假设的要素，而是经验上观察到的现象的一般性质、一般原理；从这些性质和原理导出这样一些数学公式，使其用于每一自身出现之处。”“原理理论的优点，是它们逻辑上的完善，和它们基础的稳固。”在爱因斯坦看来，“相对论是一种原理的理论。”^①

因此，对于广义相对论的基本原理和引力场方程进行分析和探讨，会有助于如何面对相对论体系当前所面临的挑战和变革。

我们曾经指出，广义相对论却包含着许多重要的“假设要素”。不仅如此，与狭义相对论相比较，甚至在一些基本观念、基本原理之间存在着不协调。同时，广义相对论还存在一些其他与基本原理密切相关的重大问题有待解决。

这里将进一步分析这些问题。首先分析爱因斯坦提出广义相对论时的两个重要的基本原理：等效原理和广义相对性原理；指出其实质、存在的问题

和可能的出路。

爱因斯坦引力场方程无疑也处于广义相对论的核心地位。然而，从原理的高度来考察，这个方程同样伴随着极其深刻的疑难。用著名学者迈斯勒、索恩和惠勒所提及的话来说，这个方程存在一个无法打开的“戈尔迪结”^②。尽管他们设法回避，但是问题依然存在。

为什么这样说？能否打开？如何改造这个极其重要的方程？将在以后进行分析。

一、惯性力与引力等效吗？

不同质量重物的重力加速度相同，这是伽利略的重要发现，并不断为实验所证实。由此可以认为惯性力中出现的惯性质量就是在引力中出现的引力质量。其实，在牛顿力学中，质量只有一种，只不过出现的场合不同而已。

1907年，还在伯尔尼专利局的爱因斯坦突然灵机一动，想到在自由下落的电梯中，人是感觉不到重量的。由此出发，他提出惯性力与引力等效的等效原理。这个原理的确促使他突破狭义相对论，提出广义相对论。爱因斯坦曾回忆说，这一突发奇想是他一生中最高兴的时刻。直至他去世，不断多次用自由下落电梯来说明“引力和惯性力等效”。

然而，仅仅是对于牛顿理论的稳定均匀静态引力场中，爱因斯坦的自由下落电梯的论断是成立的。对于真实的引力而言，在牛顿理论中的表述就与惯性力并不等价。更重要的是，在爱因斯坦相对论中，引力表现为时空的弯曲，而惯性力却是以曲率为零的克里斯多菲（克氏）联络来表述的，当然

~~~~~  
过的多次库仑散射，用蒙特卡罗模拟表明，利用他们的装置结合这种算法，如果大量集装箱中有3%含有核材料，在60秒内就可将它们识别出来，被误判为装有核材料的只占2%。对于普通的没有高密度材料的集装箱，经20秒测量就可放行。这样就可以在提高安全保障的情况下加快港口的物流速度。

目前，我国北京大学、清华大学、中国原子能科学研究院及高能物理所等单位都对宇宙射线 $\mu$ 子集装箱检测问题给予了关注。原子能院已开展建立装置的工作。

（北京市中国原子能科学研究院核物理研究所102413）