

重离子应用研究

B. E. Fischer*, R. Spohr*

西德国立重离子研究所 (GSI) 侧重进行应用研究有两个方面的动机: 首先, 得知美国通用电器公司的 Fleischer、Price 以及 Walker 等人做过这方面的工作, 用重离子作微观标度的精确的打孔; 还有核微孔公司以前曾利用裂变反应产生的重离子, 制造过极好的商业性的过滤器。用 UNILAC 来制做这种过滤器, 看来似乎是更恰当适宜的设备。这里, 离子的范围比较大, 可选择适当的离子, 任意调节其损伤密度, 可以更精确地瞄准, 对多种多样的材料打孔, 都能够钻得更深而且更精确。

其次, 重离子可当作一种新型的显微技术的“光源”, 当时只是模模糊糊感觉到, 因为原则上元素周期表上所有的离子都可以用来“照明”微观物体, 而且可能引起的反应非常多, 通过这些反应来获取信息, 是用其他手段所无法达到的。使人惊奇的是, 重离子束在固体中能产生可蚀刻的径迹, 这对作为一种显微工具, 是必不可少的, 而且这对重离子显微技术来说, 也是重要的。

固体核径迹的某些基本情况

与预期的相反, 轰击离子与固体的晶格原子直接碰撞并不能形成核径迹。即使在能量很低(大约每核子几千电子伏)的情况下偶然会发生这样的事件, 而在 UNILAC 的 1.4 MeV/核子标准能量(以及更高)的情况下, 几乎观察不到这种现象。取代的是两步过程⁽¹⁾。当一束快速的重离子犁铧开路般的穿

凿通过固体材料时, 最初, 在它经过的路程中扫掉了许多的电子, 晶格原子的部分电子被剥掉, 于是原子之间相互排斥, 迫使其离开入射离子的径迹。现在, 会出现两种情况: 在金属中, 原子重新中性化的时间很短, 以至大部分原子很快又拉回到它们原来的位置。但是, 在绝缘体里, 原子得以中性化的时间就很长, 使晶格原子能够达到新的稳定位置, 甚至还可置换在它们途径路程上的原子等等。塑料的情况就比较特殊, 原“电子波”可直接截断某些聚合链。

最后, 在固体中留下的原始径迹, 其破坏延展范围大约有 50 埃。此范围通常称为潜径迹, 在透射电子显微镜下, 可以观察到(图1)。对于潜径迹而言, 尽管直径 100 埃, 与寻常的经验标度相比, 已经小得够惊人了。然而我们一定要牢记, 用轰击离子产生

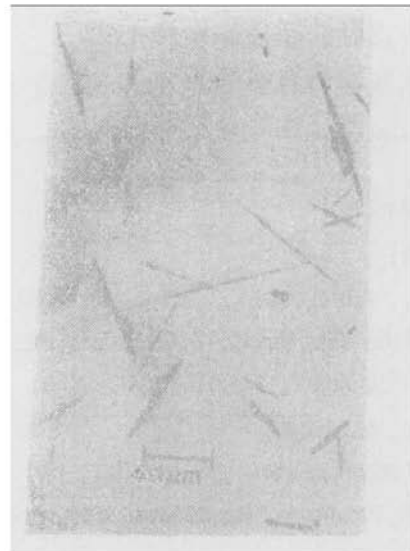


图1 在云母中裂变碎片径迹的透射电子显微照片。这些径迹没有经过蚀刻, 展示的是原辐射损伤的直径。

*西德达姆斯塔特重离子研究所

的潜径迹直径，还要小六个数量级，真乃是一种极度的加工技艺。

如果加以适当的蚀刻，可将这些潜径迹扩展成连续的径迹沟道，其直径从100埃起可扩到任何所希望的程度。图2是用重离子“钻孔”得到的滤箔。为使其可在扫描电子显微镜下看得见，沿着径迹沟道将箔切断。这些直径为 $0.2\mu\text{m}$ 的长直沟道是向下伸展的，象是用直尺划出来的一样。这样的打孔性能用其他方法是无法比拟的。

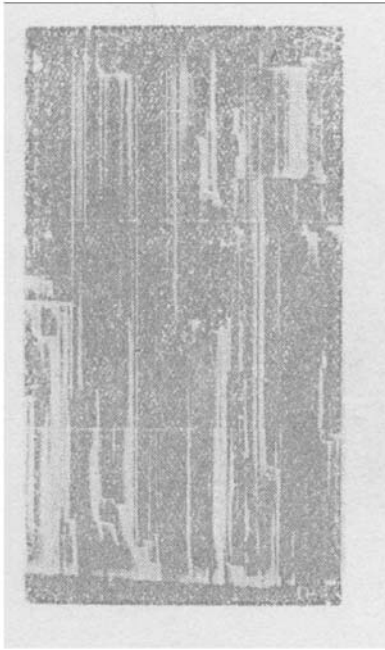


图2. 用7MeV/核子的氙离子，在云母上，经蚀刻制出的径迹沟道的电子显微组合图片。每条沟道的直径为 $0.2\mu\text{m}$ ，单个潜径迹向下蚀刻的深度约为 $50\mu\text{m}$ 。为使径迹沟道在扫描电子显微镜下看得见，把云母箔沿径迹切断。在切断前，曾在40%的氢氟酸中浸蚀20分钟。

此外，重离子打孔的形状是多种多样的：有人们所期望的那种圆孔(图3a)；有菱形孔(图3b)；六角形的(图3c)，或还有奇形怪状的，开始呈六角形，接着又变作菱形(图3d)。潜径迹的径向扩孔，将随着蚀刻的方式而定。在象玻璃或塑料等各向同性的

材料中，扩成的是圆孔，而在结晶材料中，看来孔的扩展与结晶方向相反。

同样，往材料内打孔的方法也是多种多样的。打如图2那样的长直孔；圆锥孔，带

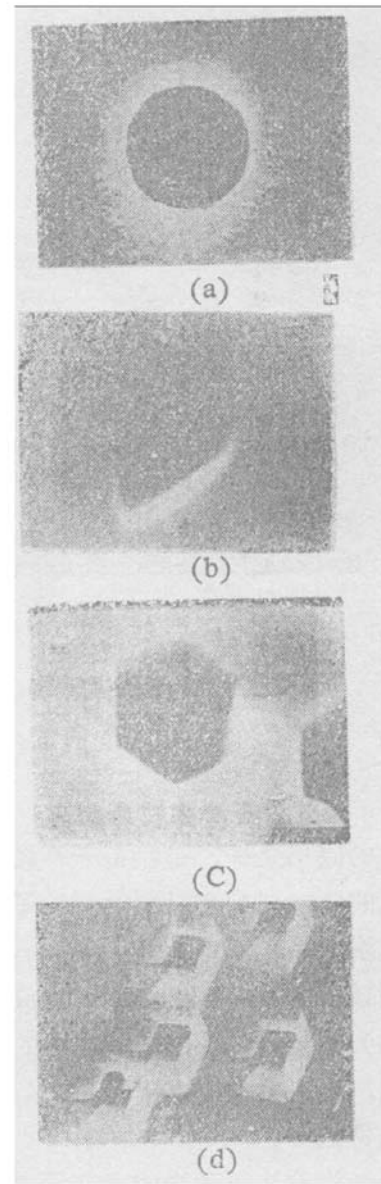


图3 重离子径迹的扫描电子显微照片。(a) Hostaphan, (b)用氢氟酸腐蚀的云母, (c)外延生成铁柘榴石, (d)在沸氢氧化钠中腐蚀的云母。

有大(图4a)或小(图4b)的张角；甚至还打成更使人惊奇的孔，开始是个细的沟道，到材料的深处又扩粗了(图4c)。

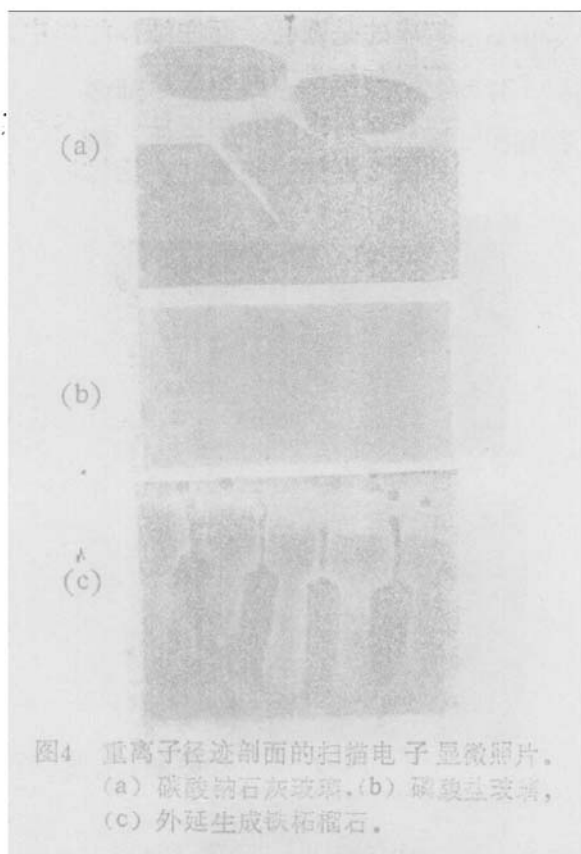


图4 重离子径迹剖面的扫描电子显微照片。
(a) 碳酸钠石灰玻璃, (b) 碳酸盐玻璃,
(c) 外延生成铁褐帘石。

应 用

单孔膜

非常简单的应用之一,是制备一种仅有一个精密微孔的膜。用它来对亚微观粒子依其大小、形变度以及表面电荷等予以分类。在含有亚微观颗粒的两种电解液之间,放置这么一个膜作为隔栅,就能达到分类的目的,然后做简单的电阻或光透射测量,就能识别上述那些特性^[1]。

由于红血细胞发生不适当的形变而引起循环失调的情况,可根据这种方法,用测量红血细胞通过稍小一点的微孔渡越时间的手段来诊断^[2]。甚至于用海胆精液来回地通过这样的微孔做实验也已获得了有关复杂形状的信息^[3]。

通过蚀刻径迹来改变材料性能

另一类应用是,用任意的重离子束进行辐照,接着进行蚀刻来全面地改变材料的性能。例如,在磁光膜上增大存储密度。这些透明的带有磁畴的膜,磁畴的方向在垂直膜

表面的两个方向,在交叉的偏光镜中有肉眼能看的明暗斑点。膜的存储密度是按畴的最小尺寸确定的,再要小,磁畴就溃灭了。预先在膜上蚀刻上网格式的沟槽,就能防止小畴的溃灭。这件事用径迹蚀刻很容易做到^[4],如图5a所示。图中圆圈的区域,展示经过辐照和蚀刻之后自然形成的较小的畴。图5b说明了为什么在这个区域里磁畴的稳定性比较大。由于畴壁优先地贯穿径迹孔,以减少能量,因此保持畴壁的稳定。

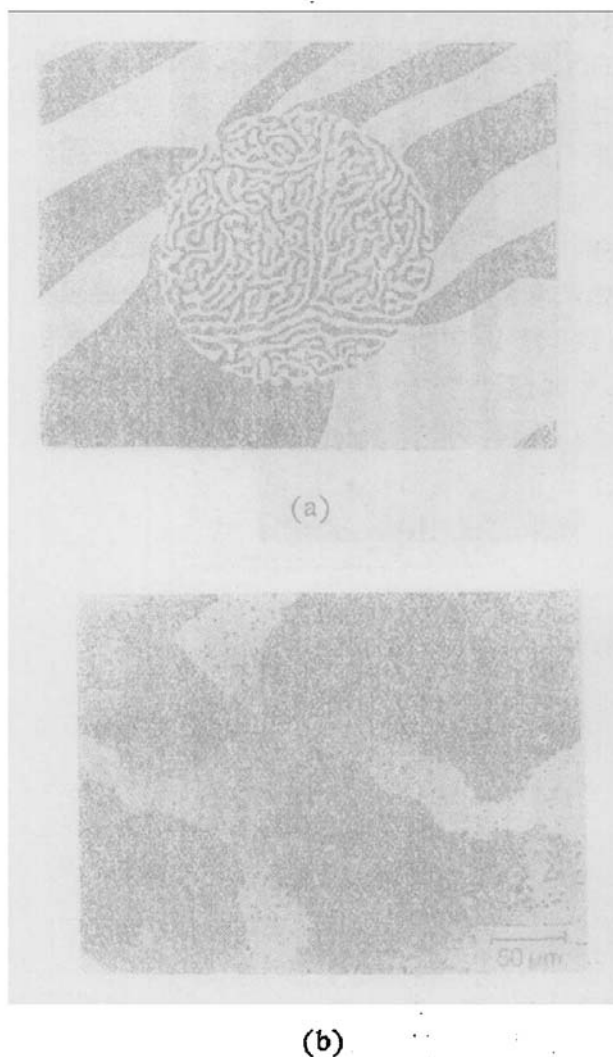


图5 在磁光膜上增大存储密度。(a) 辐照中心区,通过交叉偏振过滤光镜可以看得见,显示一个比较小的稳定畴。(b) 核径迹蚀刻的作用:如果磁边界贯通一个孔,磁场的总能量就降低了,因此在那里就保持了磁畴边界的稳定。

所谓超电绝缘膜的新材料，是在一次试验中偶然得到的。在扫描电子显微镜下研究用全蒸发沉积制备一个导电良好的箔，是办不到的。因为在高压技术中，由于打火金属沉积后，使绝缘遭破坏，这经常是件讨厌的事。经进一步研究的结果，已找到了防绝缘体污染的保护措施，当用径迹蚀刻的办法，使原来的表面减少一半时，其保护效果最佳。所得的结构(如图6)，电流好象进了死胡同的迷宫。即使迷宫的某一段路线或其壁顶导电，也没有与此迷宫完全连通的电导路线。这里给出一个特殊的实例可以证明，用 $0.7\mu\text{m}$ 的金箔覆盖具有上述那种迷宫式结构的表面，其电阻比平滑表面的电阻高十个数量级^[6]。

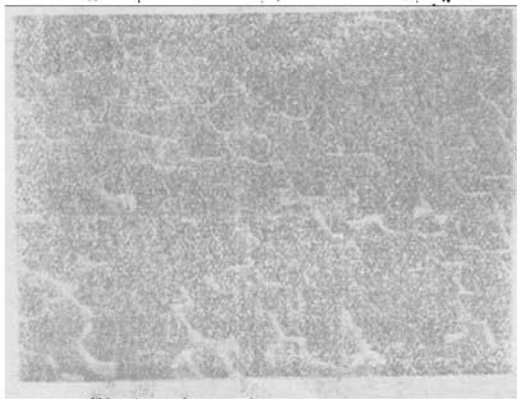


图6 用能量为 7.5MeV/u 、 $10^{17}/\text{cm}^2$ 的氦离子辐照，并在氢氟酸中腐蚀过，在云母箔上制备的超绝缘表面的微观结构。

蚀刻玻璃上的核径迹有个共同的体验，粗糙的表面往往会使反射光大为减弱。由于光的散射，这些粗糙的表面总是模糊不清。至今，径迹蚀刻作为抗反射处理，其潜力被忽视了。因为，潜核径迹是很细，轻微地蚀刻可得到低于可见光分辨限度的孔——换句话说，这些微孔就没有光散射。如果光学表面被如此小的核径迹微孔所覆盖(微孔的深度约为半波长，其形状如图4b那样的锥形)，这样的表面就会非常清晰了，还能显出很强的抗反射作用。有一种叫做CR-39的塑料能

说明这一点^[6]。

到目前为止，由于潜径迹具有独特的性质，似乎只能用核径迹技术才可改变绝缘材料的性能。图7显示的金属场发射体尖头，虽然事实未必是那样，但在聚碳酸酯箔上，把铜的电解液沉积到蚀刻了的径迹锥体中，即可制做出来。最后这个事例说明，已知的复制技术与核径迹技术相结合，使我们可以把这种技术扩展到几乎是任何材料中去。

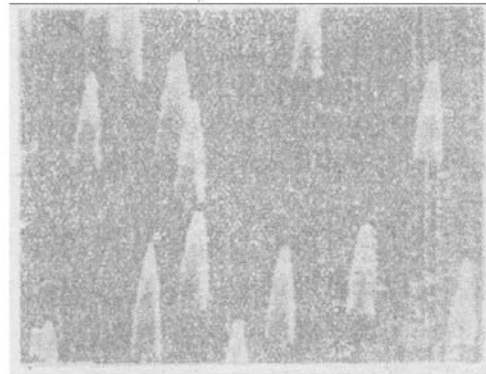


图7 在聚碳酸酯箔上，铜的电解液沉积到蚀刻了的径迹锥体形成的场发射体尖头的扫描电子显微图片。铜堆积到足够以后，再除去聚碳酸酯箔。

应用于显微术与微电子学方面

到此为止，我们仅仅说明了用重离子束对不同材料进行任意辐照，接着化学处理，制成了微观结构。更为感兴趣的是，用这种技术使我们印制更复杂的结构，同时，还能为我们提供了新的显微技术。这种技术叫做显微平板印刷术，其原理见图8。

离子显微平板印刷图片，必须在电子显微镜下观察。人们也许会问，为什么不用电子显微镜直接观察上述那种微观物体呢？回答是，直接观察，电子显微镜会受到样品中巨大的电子散射而观察不到。目前只是观察非常薄的薄片，或者观察样品的表面才能达到最好分辨。有时，光线使我们能够观察对电子显微镜来说过厚的样品，但是分辨较差。唯独重离子显微术，能使我们观察到厚的样品，而且分辨又好^[7]。

重离子另一个特性是，可使我们在异常

低的剂量下，获得显微平板印刷图片。因为径迹长度被限制得非常好。当单个离子通过材料时，就已经获得了有关的准确的信息，

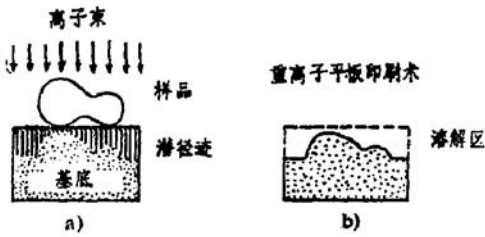


图8 (a)以不同长度的潜径迹形式，刻印到核径迹敏感材料上面的样品的表面密度分布。(b)潜径迹蚀刻到与每个径迹的长度相重叠为止，样品的一个类似立体的复制品就形成了。在扫描电子显微镜下能观察到，其高度表示原样品的质量分布。

而且一个离子径迹沟道的直径，从100埃到几个微米可以任意地蚀刻。换言之，一个象素，只有一个离子就够了，各个象素（由一条径迹沟道来表征）的大小可以任意确定。因此，可以把核径迹敏感材料看作是一张“胶片”，其感光度可由显影来控制。很久以前，Benton等人^[8]指出，对于医用图象，在需要减少剂量而又能把细部显现到一定的水平，用重离子显微术拍摄，已引人注目了。

使人惊奇的是，用图8中说明的方法，在离子能量太低时，就不能产生单个的径迹。因此，更多离子的累积损伤，仍可使辐照材料优先地能够蚀刻掉。此外，较慢的轰击离子的电场，与固体原子核作用时间足够长，以至直接置换这些原子，而且这种损伤不再取决于材料的电导率。那么，能量再低，这种方法不仅小型加速器上使用，而且还给利用任何材料均可制成显微平板印刷图片带来可能性。它还表明了这种方法的分辨能力。

显然，对于展现这般细小微观结构的能力，微电子学对这种技术感兴趣，还能够提供所需要的辐照掩膜。图9作为一个原理性的验证，是在PMMA（一种由于微电子学技术中的普通的辐射敏感树脂）上和裸露硅上

印出的微观格栅的重离子平板印刷照片。这两幅照片表明，利用重离子作为微观加工的工具所独有的特性，在于它能精确瞄准和精确地确定作用范围(图9a)，以及损伤密度很高，可直接构造许多材料，不必用辐照敏感覆盖层。所以，在微电子学研究中重离子装置的应用，在世界各地雨后春笋般地蓬勃发展起来是不足为奇的。特别是，现今用计算机调控微离子束，把亚微米结构直接地“写”下来，用以取代掩膜辐照技术，从技术上讲，已经是可能的了。

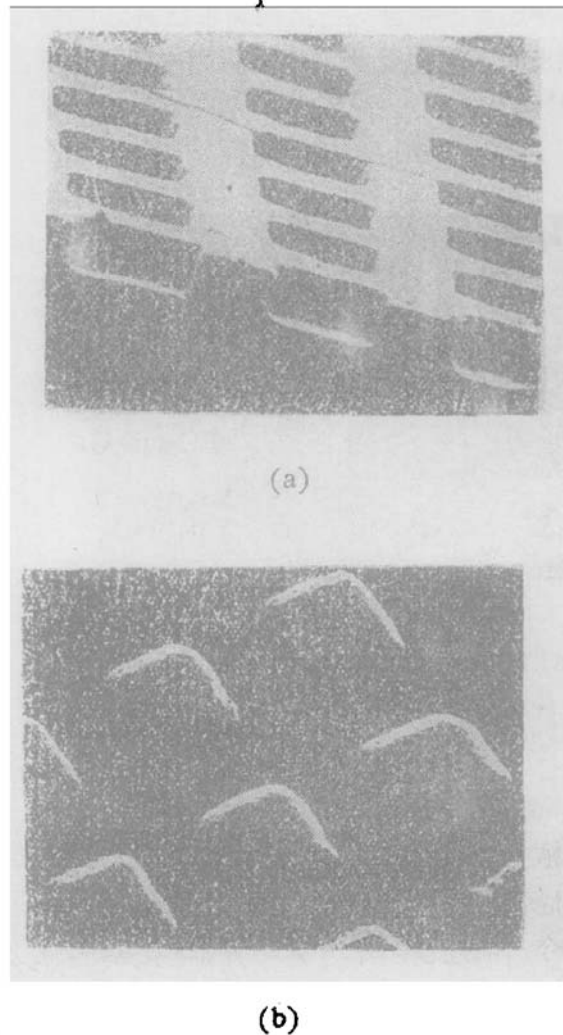


图9 (a)印在硅片上聚甲基丙烯酸甲酯层中的金属格栅掩膜的显微平板照片。辐照， $3.4 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 的720keV的氩离子。显影，在1:3的甲基异丁酮和异丙醇中浸10分钟。(b)印在裸露硅片上的上罩的显微平板照片，用 $7 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ 的720 keV的氩离子辐照，在Sirt1中腐蚀显影10秒钟。

参考文献

1. R.L.Fleischer, P.B.Price and R.M.Walker, Nuclear Tracks in Solids, University of California Press, Berkeley and Los Angeles, California (1975).
 2. H.kiesewetter, U.Dauer, K.Mussler, H. Schmidt-Schönbein and R. Spohr, Rigidity measurements in individual red cells, Hemopheology at European Pathology Symposium, Nancy, Oct. 1979.
 3. R. L. Fleischer, Where do nuclear tracks lead? American Scientist 67, 194-203 (1979).
 4. H.Heitmann, C. Fritsche, P. Hansen, J. P. Krumme, R. Spohr and K. Witter, Influence of irradiation with high energy ions on storage properties of magneto-optic $(Gd, Bi)_3(Fe, Ga)_5O_{12}$ epitaxial films, J. Magn. Materials 7, 19-78, 40-43.
 5. B. E. Fischer, D. Albrecht, and R. Spohr, The Preparation of Superinsulating Surfaces by the Nuclear Track Technique, GSI Scientific Report 1980, p. 178. ISSN 0174-0814.
 6. B. E. Fischer, A new antireflection treatment for optical surfaces by the nuclear track technique, Nuclear Instruments and Methods 216, 265-268 (1983).
 7. T. C. Yang, G. Welch, C. A. Tobias, H. Maccabee, T. Hayes, L. Craise, E. V. Benton and F. Abrams, The feasibility of heavy ion charged-particle microscopy, Annals of the New York Academy of Sciences 306, 332-229 (1978).
 8. E. V. Benton, R. P. Henke, C. A. Tobias and M. R. Cruty, Heavy-particle radiography. Science 182, 474-476 (1973).
- (张毓亭译自 Interdisciplinary Science Reviews v. 9, No4 1984 冉启惠校)

(上接13页)

可预言其密度为正常核物质密度的 2.5 倍至 4 倍。象图10中表示的那样, 从这些测量可得到状态方程的近似式。作为交叉检验实验, 在轻弹核轰击重靶和同样的能量积聚时并没有这种效应。最近 La 打 La 的实验非常好地肯定了 Ar 打 KCl 的实验结果。作为初步的结论, 可以认为在实验室的实验中得到了核的密度, 而一般这只存在于中子星内。曾经假定, 在 $\rho \geq 2\rho_0$ 时存在 π 介子凝聚态, 这在中子星的结构中是很重要的, 仍在积极的研究中。

总之, 相对论重离子碰撞可以说是现代核科学的最富有挑战性的广阔的前沿。

(褚永泰译自 Interdisciplinary Science Reviews 1984, V.9, No.4)

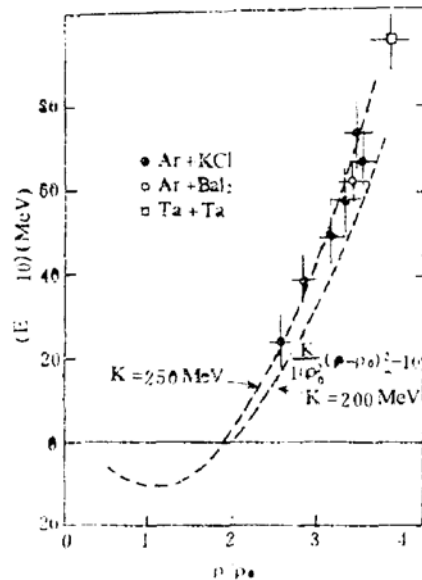


图10 作为核物质密度函数的压缩能, 这是从 Ar 打 KCl, Ar 打 BaI₂ 和 La 打 La 的中心碰撞中的 π 介子的产额得到的。