

# 美国核物理学家汉密尔顿教授 学术报告摘要

中国科学院近代物理研究所“核物理动态”编辑部

一九七九年四月

一九七八年十月美国范德毕尔特大学核物理学家汉密尔顿 (J. Hamilton) 教授来华访问。十月四日至七日曾到兰州中国科学院近代物理研究所参观访问。现将其在兰州期间所做学术报告和座谈摘要整理如后，以供参考。

## 目 录

1. 远离  $\beta$ -稳定线的原子核 ..... ( 1 )
2. 关于  $A = 60-80$  核的高自旋现象 ..... ( 26 )
3. 关于美国橡树岭“霍里费”重离子核物理实验室建设 ..... ( 30 )
4. 重离子物理的未来及在其它科学领域中的应用 ..... ( 41 )

# 远离 $\beta$ -稳定线的原子核

约瑟夫·汉密尔顿

我很高兴被邀请到兰州所访问，这是我们两国之间较早进行交换的一部分。今年七月你们的核物理与等离子体物理代表团访问范德毕尔特大学，我荣幸地作为主人接待了你们，所以这次我很高兴地做为一次回访。

科学家之间的合作是十分重要的，这有以下几点理由。由于这种科学合作，意即互相交换各自的想法，使得彼此知道，你们正在做什么和我们正在做什么。廿世纪以来科学经历着十分快速的发展，这种发展是由于在全世界的科学家之间通过了各种途径来交换他们的心得与成果所促成的。这种交换是在世界上各国之间进行的，除科学方面外还有更广泛的文化方面的。几年前在西德慕尼黑的一次会议上，马尔·莱尔尼兹教授，他是老辈的德国核物理学家，在开幕式中问道：“为什么人们要研究原子核物理？”当然，他回答的一个理由是，由于核物理对于那些研究它的人们来说是十分有趣的。但是他谈到还有一个理由，就是现今核物理提供一个机会，使世界上所有国家之间的核科学家可以相聚一起，共同合作并讨论学术问题。因此，今年所进行的中华人民共和国同我们之间的这种交换，也正是具有这种意义，我也特别高兴地来参加这样的一种合作。我希望自己能做为首批交换的成员，正因为核物理领域中，兰州的科学家所感兴趣的课题与我自己从事的工作在很大范围内是一样的。

今天下午我想谈我自己研究中的主要领域之一，即远离 $\beta$ -稳定线的原子核，特别利用重离子来研究它。

也许苏联的一个小组，在杜布纳是首次用离子研究远离 $\beta$ 稳定性的原子核的。他们做了些设备，发现了 $\beta$ -缓发质子体这种新现象。但是，从此以后，在弗辽洛夫教授指导的实验中却把主要力量集中到远离 $\beta$ 稳定性的新元素上，即合成104, 105和106号元素上。但是，用重离子来对一大片远离稳定线的核素进行电子和 $\gamma$ 能谱测量的广泛的领域却被忽视了。大约在1970年，当橡树岭实验室的重离子束提高到可用来作一些测量工作时，就成立了一个小组开始研究远离 $\beta$ 稳定线原子核的核谱的详细性质。当我第一次提出该小组的研究规划时，许多人笑我，他们说选择了一个错误的时间来开始我们的研究。这由于我国在1970年左右，正是大大缩减研究基金的时候。所幸的是，我能把一些大学联合起来，大家凑合些钱进行合作，也请求联帮政府来支持，使这一研究规划得以实行。所以这规划中的主要设备名字叫尤尼所尔（UNISOR）—分离器，它是由12所大学和橡树岭实验室共同建造的用来研究非稳定同位素的设备。尤尼所尔（UNISOR）的名字是从大学（University）—同位素（isotope）—分离器（separator）—橡树岭（Oak Ridge）这四个字头所组成的，它代表了各大学与橡树岭同行们共同作的一台同位素分

分离器。我们各大学合买一个同位素分离器，并且把它装配在橡树岭，不仅如此我们还作了一个五年预算来支持这台分离器能进行研究工作。我们到原子能委员会请求他们支持我们这个研究方案。庆幸的是，尤尼所尔的期望得到了满足。进一步我们请求原子能委员会在橡树岭建立一台新的重离子加速器，因为这对于在该地区的大学来充分使用尤尼所尔设备来说是至为关切的。后来布洛姆莱教授对我说，因为他曾是1969—70年原子能委员会主席，他曾以委员会的名义建议关闭全国所有回旋加速器，因为这是一种老式加速器，而美国是无钱来运转这些老机器的，而正是由于我们的规划才把橡树岭这台老加速器又运转了五年之久。所以在当时全国资金紧张的条件下，把这台老回旋加速器进行运转，以便尔后原子能委员会考虑建立一个新的串列加速器注入到这个老回旋加速器中，这是有意义的。如果在1970年我们关闭了这台回旋加速器，则对我们来说将不会有任何好处的。正如今天早上我参观时对你们说过的，我对你们把老的加速器在建立新的大加速器时使用上这一点是有深刻体会的。你们的实验室做着与橡树岭正在做着的相同的事情：你们是希望做一台新的加速器而把老的一台作它的注入器来使用的，而我们则希望作一台新的注入器注入到老的回旋加速器中去。

现在我想提醒你们，现在人们还没有建立起足够的设备来研究远离 $\beta$ 稳定线的原子核，而在这研究领域中许多有趣的课题，而且还有许多新的原子核尚待研究。这些元素的半衰期太短，或者你要花许多小时来做好几次实验，因为把这些核分离出来并进行测量在一次实验中进行是不容易的。但是有许多研究课题只能对远离 $\beta$ 稳定谷的原子核中才能观察到，我们必须攀登谷傍的山峰后才能观察到它们。例如刚才我提到的 $\beta$ -缓

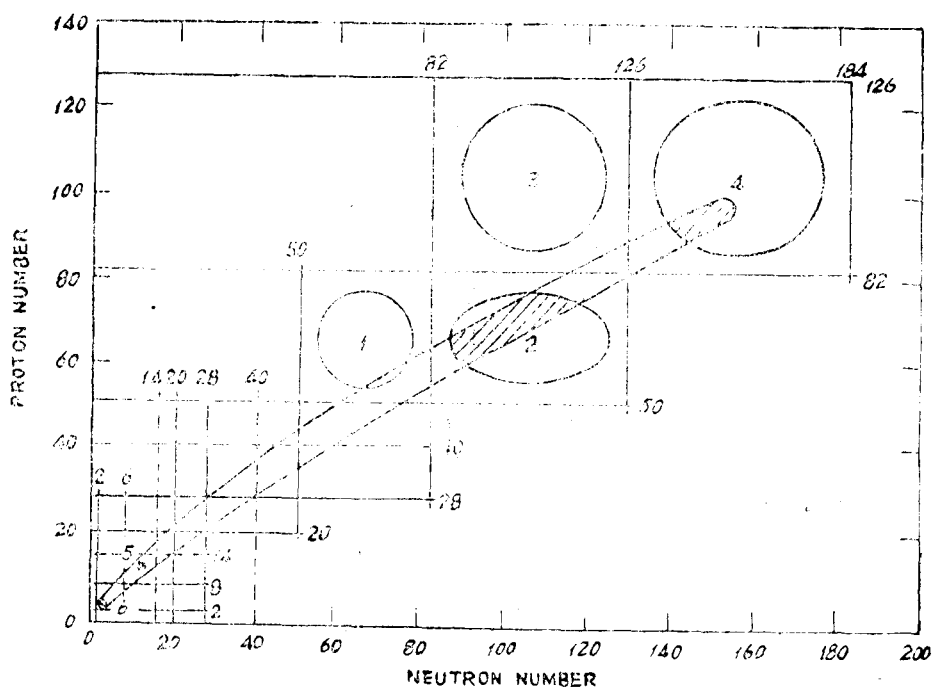


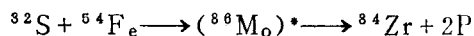
图 1

发质子现象就不可能在稳定谷中存在。另一种在谷中看不到的现象就是当 $\beta$ 衰变能量很高时，你就有可能研究 $\beta$ 衰变到连续激发态去的统计特征。另一个特别有理论兴趣的课题是研究质子数等于中子数的核，即 $N = Z$ 。

现看第一张幻灯片—图1，它是一张老的核素图，横坐标是中子数，纵坐标是质子数。在图中把中子及质子的幻数如50、82和126等用线条标志出来。在图中象雪茄烟形状的区域，就是人们所知道的稳定谷附近的原子核。玻尔和莫特逊以及同他们一起得诺贝尔奖金的伦瓦特，就是因为他们预言了在两个幻数的中间区域内如图1中的2区的阴线部分可以期望观察到原子核呈现长椭球的形变。此外在减小壳的效应时也有着其他各种不同的性质。这是在质子数从50填充到82和中子数从82填充到126时所出现的情况，可以用不同的形变特征来描述。从图1可以看到，这里还有好几个区域，如3和4与1的圆圈围起来的区域。还有几个强调的核素，即铅-208，下去有钙-40、氧-16和氦-4，它们被称作双幻数核。现在有一个十分有趣的问题，即偏离稳定线后双幻核可以仍然存在吗？例如锡-132，它具有50个质子和82个中子，它是一个点正的双幻核呢或者不是呢？又如锡-100，它是50个质子和50个中子，锆-80，40个中子和40个质子等，这些核又有什么性质？另一个重要的课题是稳定谷可以延伸到多远，能否延伸到为人们所关切和预言的超重元素区域上去呢？

现在在德国有个小组，他们不是用重离子反应方法，而是在反应堆上做了锡-132并研究了它的能级。他们用一台质量分离器与一个新的反应堆结合使用。他们发现了锡-132第一激发态的能级为 $3^-$ 态，比基态 $0^+$ 高出132keV。我提醒你们，铅-208是另一个双幻核，大家熟知的，也有第一激发态为 $3^-$ 的特点。所以看来，对于丰中子的锡-132的确仍保持了幻数核的特征，表现出良好的双幻数核的特征。现回到图1，有证据表明对于锆的同位素区域可以指望是形变区，可能是一个新的形变区，而且一些实验表明随着中子数减小，变形愈来愈大，尽管这时中子数更近于40这个幻数。到了锆-80，看来也很可能是个形变核。因此，现在研究Zr同位素的性质尤其那些稳定谷外的核的性质，是个十分有趣的课题。

上面所涉及的核素要作出来是不容易的，但是橡树岭那台正在新建的25兆伏的串列加速器将可能提供很佳的束流来进行这类研究，明年这台加速器将交付使用。特别是，这台加速器将可供给硫-32的束流，选用铁-54作靶则通过以下反应：



得到Zr-84，这反应中的复合核为 $\text{Mo}-86$ 。

因此在尤尼所尔工作的科学家在盼望明年新加速器提供的硫束。由于通过 $(\text{HI}, xn)$ 和 $(\text{HI}, pxn)$ 反应，人们可能来研究Zr-80附近核的能级。

我们常遇这样的情况，即当我们在研究这一新的核区时，发现一些使人惊奇的现象，而这些现象是在研究近于稳定线附近的原子核时则没有出现过。我愿意较详细地来描述在某一特定核区所出现的形状共存态，这些核区处在Hg和V的轻质量数核，最近还研究了Pb和Bi的核区。

我想提醒你们，重离子方法是唯一的可以使原子核合成到所预言的超重稳定核新元素的方法。这些新元素的原子序数Z大概从114到126。因此这又是一个远离稳定性的核

区，我们以极大的关注寄托于新一代的加速器来研究它们。现在我们看图 2 (略)。这将提醒我们，为什么重离子特别吸引人们的注意，想用它来研究远离 $\beta$  稳定线的原子核。这是由于当选择靶核、重离子束类型及能量，我们可以使原子核反应产物集中到一二个核素，这样可以得到被选择出的放射性缺中子核。用这种方法可以大大减小本底。同样，选择合适的靶核与重离子，人们可以得到特定核的高自旋态以及低自旋态。例如，Hg 同位素在 Hg-187 到 189 范围，高自旋同质异能态和低自旋同质异能态具有可以鉴别的半衰期，或者可以近于鉴别。对其中一个例子是  $8^-$  和  $9^-$  同质异能态，它们相联系的  $\gamma$  射线达到 250 条，所以你无法从分离各个  $\gamma$  能谱来进行研究。但是将用选择靶子种类和重离子种类及其能量，在某个特定情况你可以做出 90% 的高自旋同质异能态，而在另一情况下，却可做出 90% 的低自旋同质异能态。利用重离子反应的这种挑选技巧，有助于我们搞清楚这些同质异能态下的能级结构。

重离子传递一个大的线性动量给靶核，这也是很有用的。这就可以用产物离子反冲出靶子的方式来引出，便于在线分析这些同位素。又由于重离子的射程很短，因此可以使用丰同位素薄靶，而这种薄靶对于能量质子束来说则由于太薄而无法使用。

为什么尤尼所尔的工作使用钨-180 作靶子呢？因为钨-180 是十分缺中子的同位素，用它作起始核很适合。但钨-180 的天然丰度仅 0.1% 左右 (0.13%) (因为它缺中子太多，丰度自然很低)。最初我们准备把钨蒸发到一个衬箔上的办法来作这种靶子。因此我们申请要些钨-180 的材料。但是回答是令人吃惊的，我们需要付出一百万美元的价钱，因为我们需要的是浓缩到 90% 范围内钨-180。你们可能问为什么要花一百万美元才能做出这个靶子呢？因为用蒸发的办法作出仅几个毫克的靶子就需要用一百万美元。你们一定知道，作为几毫克的靶子，意味着在蒸发舟中必须装上好几百毫克的靶材料。几年前美军方在橡树岭花了二三百万美元来做高纯钨，后来还剩下一百多万美元来做钨的同位素，我怀疑这些钨同位素对军方有啥用途，我不知道他们为什么要做它。好，现在回到我们的靶子上来。后来我们改用碳网来作靶子的底衬和反冲收集箔。这时我们只需用几个毫克的钨-180 ( $^{180}\text{W}$ ) 压在碳网上就可以了，而一毫克钨只要一千多美元 (一克是一百万美元)。把一毫克的钨-180 压在网上然后加热，使钨嵌进非常细的碳网网格中去。这样碳网就可为两重功能，一是做靶衬，一是做反冲收集箔，把收集到反应产物供给尤尼所尔分离器的离子源。从这例子我们可以看到由于靶材料昂贵，我们不得不来亲自关注这种一般的制靶技术。尤其为了做出可用的，同位素丰度大的薄靶，而所用的同位素虽可以分离出来但价钱太贵时，我们必须仔细考虑制靶技术问题。

重离子引人注意的第四个特点是可以转移进原子核很大的角动量，这就帮助你来产生出高自旋同质异能态。在我们尤尼所尔研究中，这也被证实了，而且是十分重要的特点。

最后一个特点，我想可能利用“重离子—裂变”反应产生的可鉴别的碎片来研究新的丰中子区的核素。我们现在刚开始利用重离子诱发裂变来研究裂片的质量分布及在钨同位素和这一核区其他同位素的性质。

现在让我来描述最近的尤尼所尔装置情况。为了设计尤尼所尔装置，我们考虑到二个重要事情。其一是有大量的大学研究人员想用这台设备来作实验，其二是所在的重离

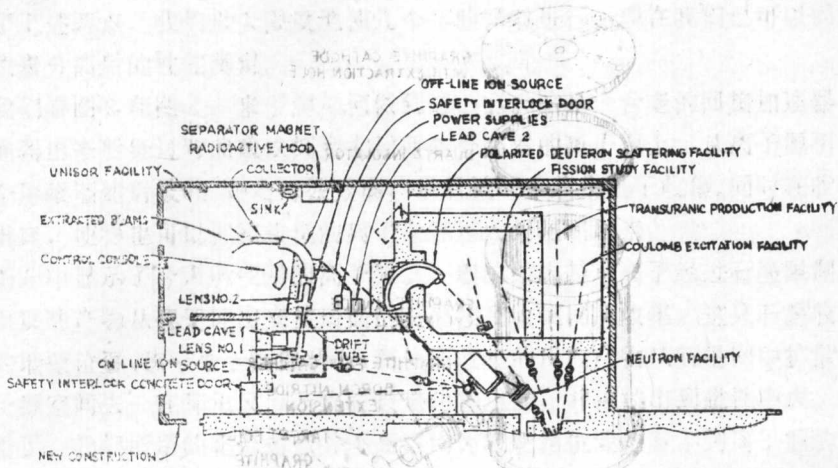


图 3

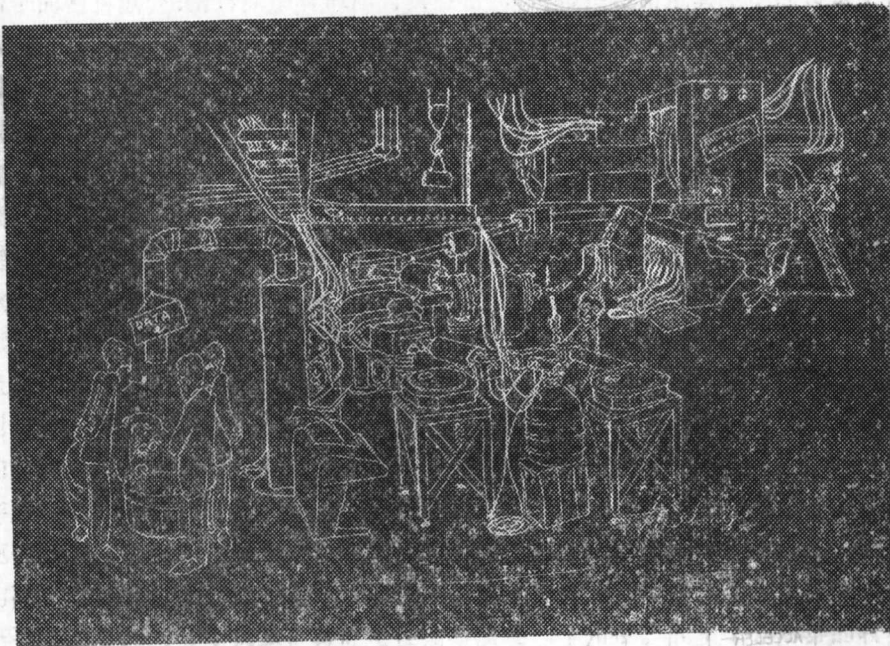


图 4



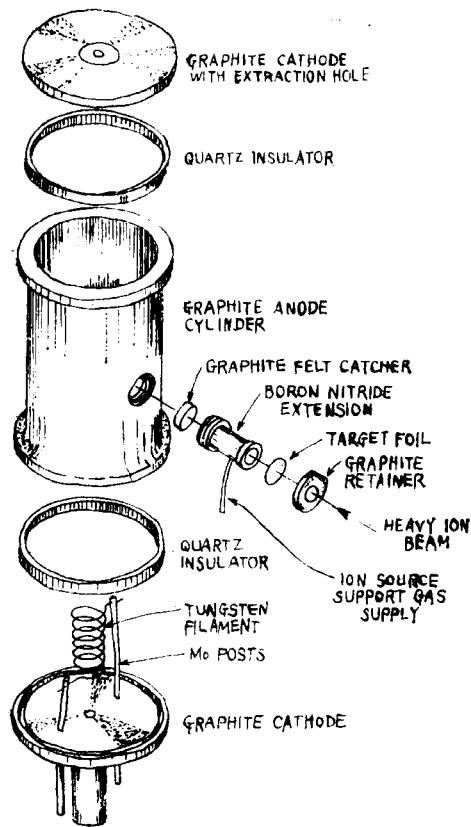


图 5

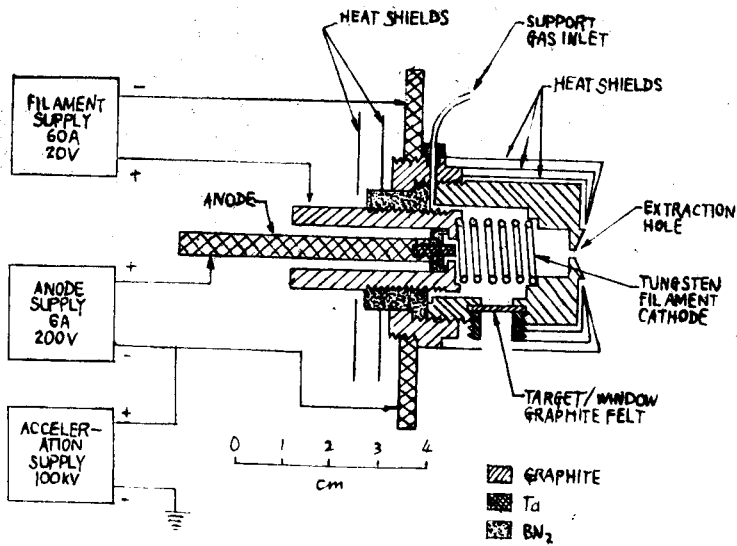


图 6

子加速器的束流时间是十分珍贵的。因此我们必须考虑能够尽可能同时地做好几个实验。为了上述两点，我们最大限度地使几个实验同时进行，现在我们可以同时做5个不同同位素分离后的性能测定。

让我们看图3和图4，来了解如何做到这一点。这是一台老的回旋加速器。束流从回旋加速器出来后经过弯曲磁铁打到尤尼所尔分离器的离子源上。从离子源引出的离子穿过一个屏蔽墙然后被 $90^\circ$ 弯曲磁铁分离，最后被一个收集匣子收集。同时在收集匣上有好几个出口，使得也可以把被收集的离子束穿过收集匣引出来。

在图5中显示了今天所使用的离子源。一般的结构是重离子经过石墨限制孔打到靶箔上，而反冲产物从靶子冲出来被后面的石墨接受收集网所收集。这只石墨收集网处在离子源的墙壁位置，该壁处于高温状态，而使所收集的反应产物从石墨网中扩散出来，进入到离子源空间去；在那里反应产物将被热化和电离，并被拉出到磁铁中去。在此碳网也被使用了。我们所用的靶箔熔点并不高，因为在靶箔位置上看不到离子源的高温区。在图6中表示了我们新近使用的离子源，它被称作高温离子源，工作在 $2,000^\circ$ 。这时，我们将石墨收集箔置于离子源下部，作为窗和靶子来使用。这时反应产物扩散后进入到一个更小的区域中。高温离子源可以期望得到金的同位素引出，而常规的离子源作到这一点是困难的；它给出金同位索引出的产额之高是过去没有先例的。在下一个照片中（缺印）发展了一种用于尤尼所尔的收集系统，它由奥格·卡特和我的毕业学生共同作出的。你可看到，在收集匣中放了一卷录音带作为传达单元。而现在发展一种真空密封抽拉带子的密封隙。在密封隙中有油作为真空密封，可将传送带从真空中通过这个密封隙拉到大气中来，这只要不到一秒钟时间，而且这种抽拉动作并不破坏真空室内的真空度。密封隙用二层橡皮圈作成的，它可以在传送带拉出时不致有油附在带子上，而带子上的同位素却不被擦掉地送到外面来。在图7中勾出了这台分离器的收集站，它有三个引出的管道。在下一个照片（未复制）是显示这收集站的俯视图。这样当你将质量为186的同位素置于中心点处，则这中心两边的点对应于不同的质量数。这三个点处放置三个收集带子，这样我们可以在需要测量时，使某个收集带在一秒钟时间内拉到上面去作脱线测量，即将收集带上收集的同位素的地方放在一个探测器前面。这样我们可以同时对收集站中的中间三条同位素线进行测量。这种并行三条带的收集系统，我们叫它“收集盘子”。这个“盘子”处在收集器的焦平面上，还可以左右移动，这就使测量的质量谱线范围能够更宽。用这样的收集—测量系统，可以研究的同位素其半衰期的下限取决于收集带的拉动所费的时间，可以达到10秒或20秒。而实际上大多数情况是研究那些具有一分二分或五分钟半衰期的放射性同位素。现回过来看看图7的三条引出管道。在收集站内还有一个静电使偏器，它可以将收集到的离子流偏到不同的方向去，这就可以使你选择所需要的质量的离子束，并且把它送到这三个管道中的某个中去。至于要把离子流送到那一个管道，需要转动下面的一个机械，将静电使偏器旋动一个角度。故整个分离器的收集装置上方有两套收集带动的马达，而三个管道目前只用了两个。这里有一套收集带全在真空中的收集系统，也有一套只需半秒钟可将收集带拉出到空气中的系统。后一个系统可以在收集带拉出空气后的某个位置上放置一系列探测器，例如放三个探头，其中两个是Ge(Li)- $\gamma$ 探头，一个是固体探测器。此外还有另一个装置，它有一台电子磁透镜式谱仪，

作为电子测量用的。

将收集带全置于真空室中，一旦带子断了，则将需要破坏整个真空而使整个实验花费很多时间。但采用这种真空密封拉带装置，把接收收集带子通过它进入真空收集匣和拉出去，这样就可以将所有的卷带机全放在大气中，使用起来特别简单方便。这时在真空中只有一小段收集带，真空室可以做成小室，一旦需要破坏真空，关上阀门，只需抽空这个很小体积的空间，花不了多少时间。由于收集带可以把放射性同位素带到空气中的任何位置，所以安置各种探测器也极为方便。这种简单的便宜的装置是由橡树岭地区大学制作的。这种新的真空密封隙的使用，使得我们发展了一种十分灵活而简单的迅速移出收集的同位素进行脱线测量的装置。带动这些收集带的马达是由数据获取系统的电子计算机控制的。

下一个幻灯片显示了用磁透镜作电子测量的装置。通常这种测量是进行“电子- $\gamma$ ”符合测量的。所以在磁透镜对面也放置锗(锂)探测器。可能要问，为什么要放这台磁透镜呢，何不如用简单的硅探测器来测电子就可以了呢？实际上若用硅探测器则是测量全电子能谱。而使用磁透镜谱仪，我们可以挑选电子谱的某一段来作为符合之用。这样可以将不必要的那些电子谱去掉，因为我们不需要全 $\gamma$ 与全电子谱的符合。而这磁透镜的磁场扫描是很快的，因而可以迅速地得到电子的全能谱和挑选所需要的进行与 $\gamma$ 符合的一段能谱来。

现在我们使用磁透镜来作寿命测量，这是很重要的测量方法。在我们研究形状共存的图象中，重要的问题就是在形变能带中 $0^+$ 态的寿命是多少。因为这种 $0^+$ 态应该是形状同质异能态。所以，寿命 $\tau$ 是重要的实验数据。对 $^{184}\text{Hg}$ 其寿命可能为0.9毫微秒(ns)。用硅-锗探测器符合测量，我们可得到 $^{184}\text{Hg}$ 的某些跃迁的寿命。目前我们只得到寿命的上限值，即决定出 $\tau$ 小于0.5毫微秒。在德国的一个小组测出 $^{184}\text{Hg}$ 的，其寿命上限为0.4ns。现在，美国人用了磁透镜挑选出 $0^+ - 0^+$ 跃迁转移电子。我们可以将一个塑料闪烁体放在透镜中，所以我们有高的时间分辨，我们希望来更好地专门观测这种跃迁的过程。为此我们还用一只塑料闪烁体作为第二个快探测器，来测量所有的 $\gamma$ 射线。当然在这快探测器中的能量分辨已经调出来，并且对所有感兴趣态的 $\gamma$ 射线的能量也都清楚。这样，我们借助于这个“塑料闪烁体——塑料闪烁体”的符合测量，就可以得到某个态的寿命来。这个态正是通过某种跃迁后所馈送到的态。用此方法，可以得到0.5ns量级的寿命值。回过头来看，这寿命测量值比当前可测量的值的上限短10倍。我们在这个问题中所期待的寿命值大致在0.1到0.2ns。而用上述方法可测量的寿命值，大致在0.5ns到1ns范围内，虽然如此，这对于寿命测量来说已是很不错的了。这样我们可以测量Pt-184的 $0^+$ 基态和 $0^+$ 激发态之间跃迁的寿命值，而我们已知道它与形状同质异能态无关，然后来与Hg-184的 $0^+ - 0^+$ 跃迁的寿命进行比较，这样就可以得出形状同质异能跃迁表现在寿命上有何不同来。所以用磁透镜谱仪来测量寿命是一种很好的方法，具有重要的应用意义。

下面将转到近两三年来在尤尼所尔上所做的某些物理工作的情况。当我们发现轻的汞同位素有形状共存现象时，我们翻阅老文献，看看谁曾经提及过这种形状同质异能素或形状共存现象存在的问题可能性。现已搞清楚黑勒与惠勒教授在1952年曾经预言了

形状同质异能素或形状共存的可能性，下面这张图（图 8）是从它的52年发表的文章中的图27摘引下来的。黑勒教授实际上是1940年左右从凡得贝尔特大学毕业的。从这图可见，核的形状可从扁椭球朝长椭球变化。这图预示了这样一种可能性，即有的核在激发态的时候呈长椭球，而在基态时呈现扁椭球。因此，这就可能发生形状同质异能态的跃迁。

显然，黑勒的这种想法是十分有趣的，可是当时却没有人去观测这种现象。

直到1966年在杜布纳的索洛尼亚教授重新提及此事。我们也观测了这种激发态与基态具有不同形变的现象。上面我们描述过的汞的轻同位素的这类现象，正是这种长期以来杰出的理论预言所给出的首次系统性的证实。

为什么我们一开始就在汞的轻同位素中来寻找形状共存现象呢？因为一开始是CERN的同位素分离器（叫ISORN）上工作的杰沙姆想得到汞的轻同位素。但他们未能得到汞的衰变链，或得到可以衰变到汞的那些链。最近，由于他们的同位素分离器不能对汞元素作出离子源，因为汞易蒸发，所以他们无法从离子源中引出汞同位素来。

在卖斯的阿冈教授利用光谱仪测量汞的同位素线移，从而定出各种汞同位素的方均根半径（RMS）来。当原子核半径稍改变时，将会使原子跃迁的能量变化，换句话说，当原子核半径变化时将影响到原子各态的能量值。因此把稳定汞-204同位素的核半径作为单位，然后来观测各种汞同位素比汞-204少一些中子时，它的半径的变化。

以汞-204半径作归一后，当把中子从汞-204中取走，半径自然会变小。例如从图 9 可见，由204到200到196、192到190时，半径在减小。这一直继续到187。然后测量185时，发现半径增加到几乎与汞-198一样大。然后汞-184降下来，再到183又半径变大了。看来这附近A区存在一种尚未了解的形变。这种形变比起 $S_m$ 同位素系列在转动区存在的还要更明显。也就是说，这种跳动，很大幅度的半径变化，表明Hg-184可能有形变，正如 $S_m$ 在中子数88附近所出现的那样。这是基于液滴模型上的考虑。

CERN 组测量了铅-188的 $\alpha$ 能谱，来看看Pb-188经过 $\alpha$ 衰变到Hg-184，在 $\alpha$ 能谱上是否存在精细结构，而这种结构是由变形核的特征所引起的。但测量结果表明，不存在低能量跃迁， $\alpha$ 谱中不存在精细结构。结论是，Hg-184的基态是不形变的。这样使人们不懂得，为什么对 $S_m$ 核有形变，对于Hg-184则无形变。关于这个现象，为了找到解答，现

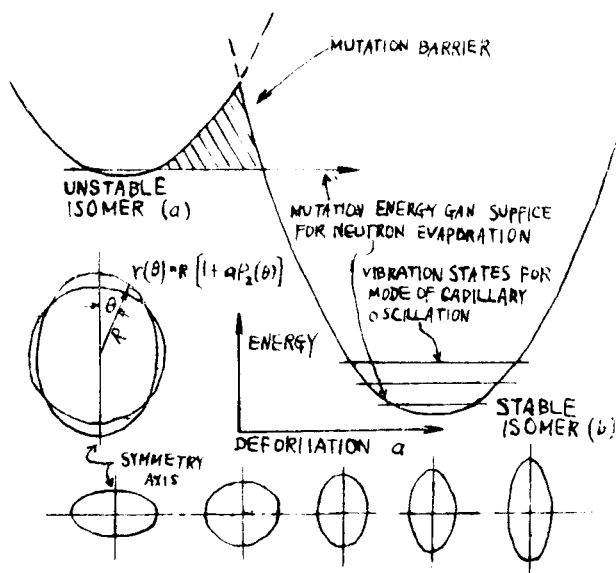


FIG. 27. Nuclear mutation forms.

图 8

核变化形式：核形状由扁椭球变到长椭球根据能量释放方向或者由长椭球变到扁椭球的现象。

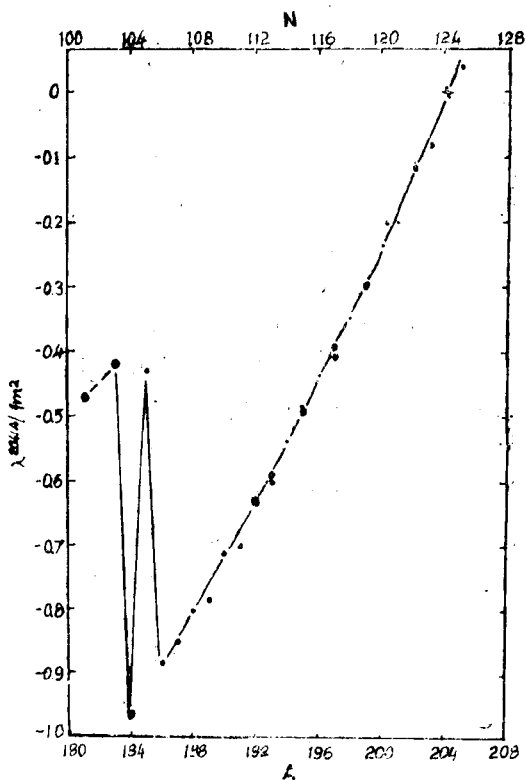


图 9

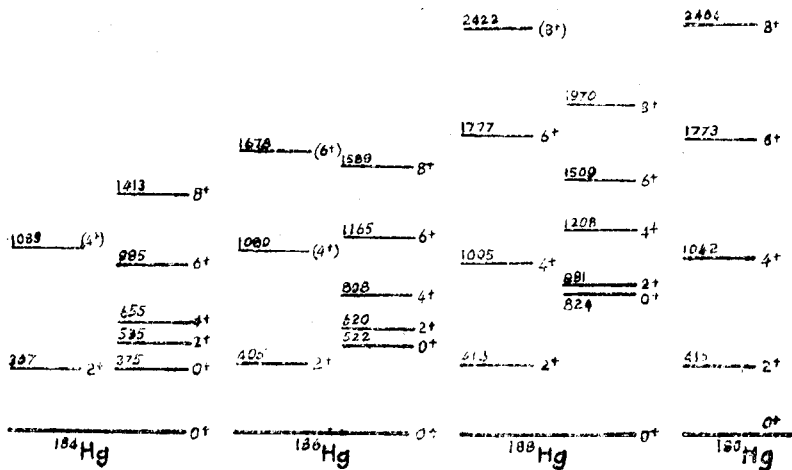


图 10

有三个小组进行研究。一个是贝克莱小组，研究了Hg-186的在束 $\gamma$ 谱。他们发现yrast级联的 $\gamma$ 能级，从0, 2, 4, 6自旋来看，在 $6^+$ 能级似乎为一个能量桥。在 $6^+$ 能级以上看来象一个转动带，而以下看来象振动带。在 $6^+$ 能级以下态的能量减少，以上态的能量增加。因此，贝克莱小组建议，在 $6^+$ 态附近存在着从球形核朝变形核的跃迁现象。但贝克莱小组仅仅观察了yrast级联 $\gamma$ 情况。而另一个组是在巧克河，他们测量了Hg-184，发现上述的类似的能量桥落在 $4^+$ 能级上。在尤尼所尔小组作了Hg-188发现，也落在 $6^+$ 能级上。这些均在(图10)上得到说明。后来想测量这些态的寿命，因在改变形状发生时，寿命将变化，但尚未给出形状共存的证明。现在尤尼所尔的人们研究自旋8以下的所有能级，不仅仅是yrast级联能级，并且使用了在线谱学技术。

在图11中左图综合地表明了Yrast级联特征 $\gamma$ 射线，对于汞的184、186和188质量数。该图纵坐标表示惯性矩 $g$ ，横坐标为原子核的转动频率 $\omega$ 。对振动核，曲线应是垂直线，对于转动核则应是水平线。而从这图中可见，原子核开始是振动的，而以后则变成转动的。

尤尼所尔小组现在不仅研究Yrast级联序列，发现了一个建立在基态上的能带，也发现了一个建立在 $0^+$ 激发态上的能带，这个带头为 $0^+$ 激发态的能带有更大的形变。从图11右边的图可见，一个是基态带，其第一激发态为412keV这个带，看起来象是振动带序列。由于该核是非常软的形变核，有很小的形变，以致于在很低的激发能跃迁，如 $0^+$ 到 $2^+$ 到 $4^+$ 跃迁，而使原子核产生较大形变，并有另一个转动带与之相联系。在该图看出，其形变能带成员从 $2^+$ 、 $4^+$ 直到 $6^+$ 、 $8^+$ 、 $10^+$ 和 $12^+$ 能级。

现在我们尤尼所尔小组研究形变交叉点以下的能级态，和基态带(近于球形核)超过交叉点的那些态。因为交叉点是联系两种形状共存的点。

在束重离子反应中，由于观察的能级很低，因此，反应后可沿着这条带衰变下来，直到低至Yrast级联能级不存在为止。现尤尼所尔将研究184, 186的汞同位素。

在图12中表示汞-186的能级，这里存在 $E(0)$ 跃迁，它是从 $0^+$ 到 $0^+$ 的跃迁，即522keV线。这图的上面是电子谱线，下面是 $\gamma$ 谱线。可以看到， $E(0)$ 跃迁的K-线，是很清楚的，且无其他 $\gamma$ 线的本底。在下面的(图13)仍是一张 $\gamma$ -能谱图，从这张图可以看到汞、铂金和金等一系列的衰变过程中所发射的 $\gamma$ 射线，Pt衰变到Hg再衰变到Au的过程。

在下一个图，即(图14)中表示了Hg-184的能级测量结果。在此 $0^+$ 激发态比 $2^+$ 第一激发态只高出8keV。再下一个图，图15中总结了所有汞同位素的能级图。从这图可以看到在Hg-190时，不存在变形的能带。这表示该核是近于球形核，只有很小的形变。但是到了Hg-188，突然出现了明显的变形带，带头处在824keV，同时还存在小变形的近于球形的能带。

到了Hg-186，形变带的带头下降到522keV，这时似存在着这种形变带和一个近于球形核的能带。中子数再减少，形变带的能量继续下降，一直到Hg-184，形变带的带头几乎与近于球形带的 $2^+$ 第一激发态相重合。

现在可以给出说明，即为什么在基态情况下Hg-185、183是形变核，而Hg-184、187则不是形变核。

原因在于，Hg-184的变形带的带头下降得很低，因此在添加一个中子到Hg-184核

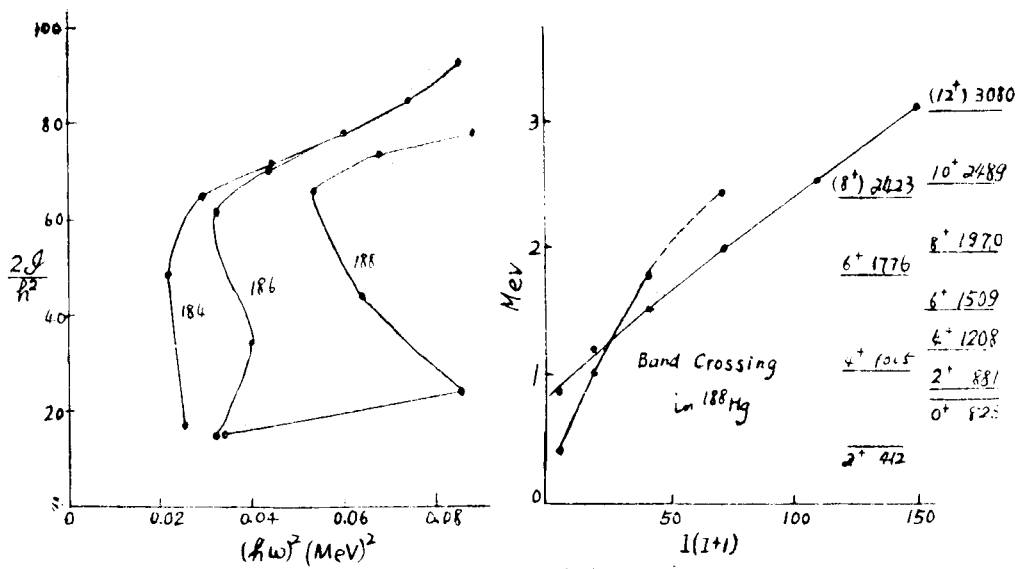


图11

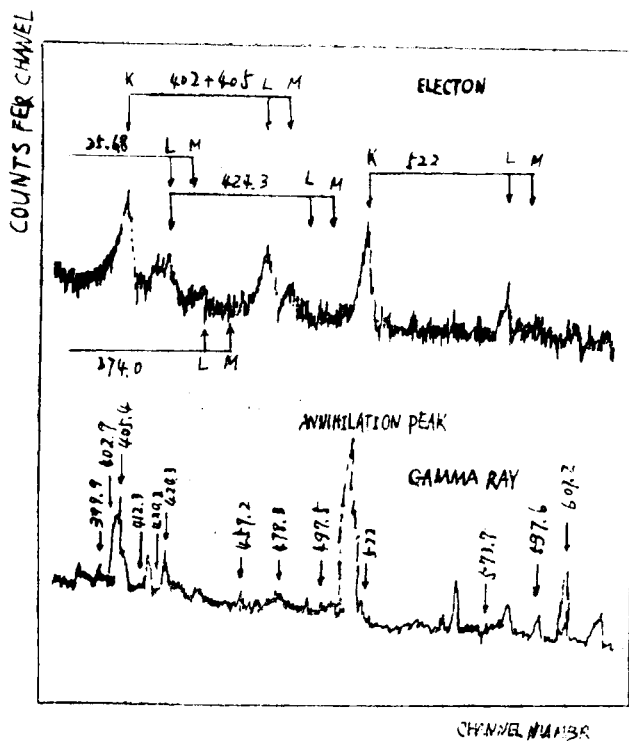


图12

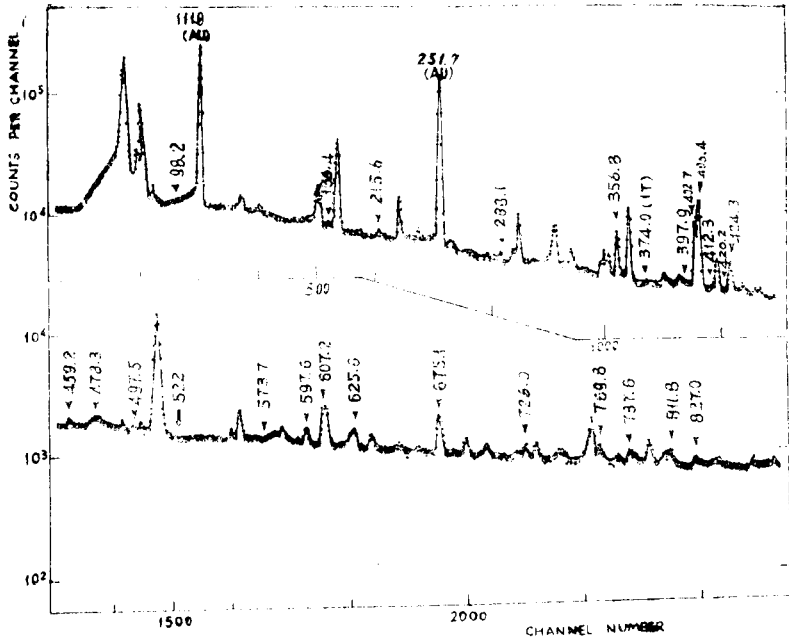


图13

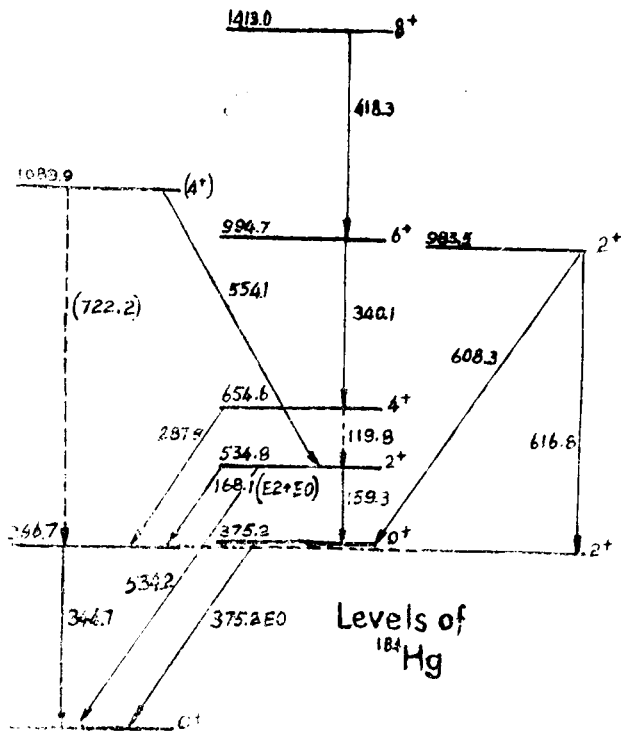


图14



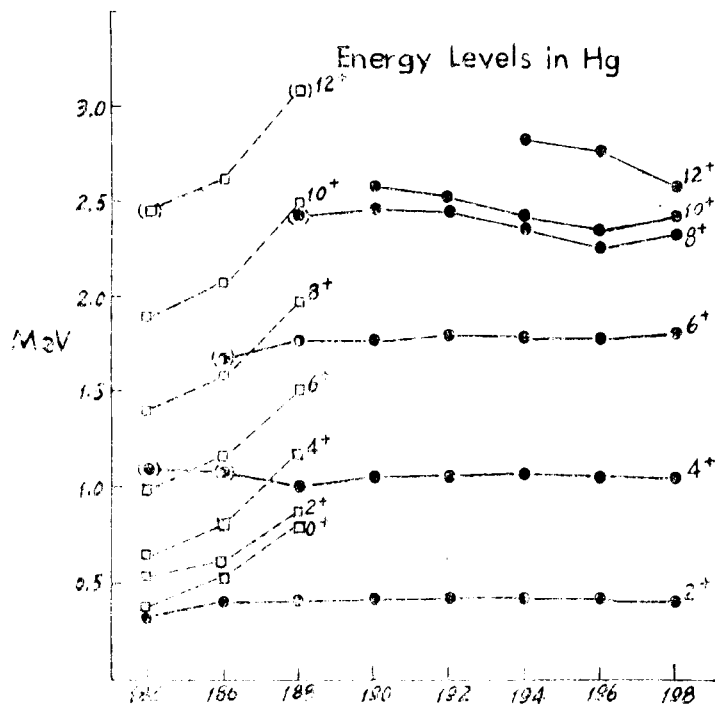


图15

实形成Hg-185, 这个奇中子将与形变带耦合起来, 形成一个基态形变的 Hg-185核。换言之, 这个奇核子发现它很容易造成核实的形变, 因为Hg-184是很软的核。当然, 我们也可期待, 这个奇核子若添加到Hg-184的形变核实, 也可与之耦合成球形基态带。这应是较高能量的态, 应该是形状同质异能态。的确, 在尤尼所尔工作中, 他们发现在Hg-185核中存在一个高自旋的和—个低自旋的同质异能态。

在阿通教授小组今年使用铍(Na)材料的染色激光证实了这个同质异能态是对应于球形核的。阿通教授测量了Hg-185同质异能态的均方根半径, 而得出这个结果的。他的结果与尤尼所尔的结果一致。这就是说在远离稳定线的核存在有形状共存的现象, 这是以各种不同途径所证实的。

理论物理学家奥弗斯文, 在同时期内, 努力工作以计算出所期待的能级。许多理论学家作出一些计算, 想要来解释形状共存现象。瑞典和西德的小组, 给出了一些早期的预示, 在杜布纳的弗辽洛夫小组的阿方波西与尤斯卡维奇, 橡树岭的C.Y.王和通纳, 以及西德另一个小组狄特教授等, 均在这方面做了理论方面的工作。

基态是近于球形,  $\beta$  值为  $-0.15$  量级, 故是轻微形变的扁椭球, 而在位能面上还存在第二个极小值, 其 $\beta$ 值为  $+0.25$ , 故为较强形变的长椭球。

在狄特的计算中, 很完美地再现了这些核的各个能带的能级值。

下一张图, 图16将给出一些理论结果。这是弗辽洛夫和帕萨维奇的结果, 是对Hg-184计算得到的位能面。其中一个极小在  $-0.12$ , 第二个极小值在  $0.25$ 。这两个极小值的能量差也划在这个图上。可以看到, 能量差对于187是正的, 对Hg-183和185却是负