

核物理研究近况

胡 济 氏

(北京大学)

核物理是一个相当广阔的学科领域，我的知识面很窄，见闻有限，这个题目一定讲不好，不过去年参加了国际核物理会议，在国内也参加了几次学术会议，听到一些情况，根据自己的体会作一点介绍。重要的遗漏，不确当的判断，以及其他缺点错误，在所难免。欢迎批评指正。

一、核物理的传统课题

核物理是一门已经有几十年历史的学科，有些课题，例如核力，已经有四五十年的研究历史，这些课题近年来仍然取得了一些引人注目的进展。

核力问题一直是核物理的中心问题之一，多年来人们一直努力在获得精确实验数据，寻找具有较可靠理论基础的核力以及探讨核力在核多体问题中的适用性等三个方面开展研究。在实验方面主要进展在于低能极化的实验，质子质子散射极化率的测量可以准确到千分之一，质子中子散射的极化率测定优于百分之一。（参看图 1，2，3，4）

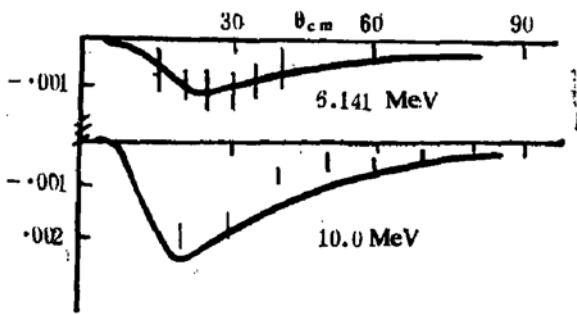


图1

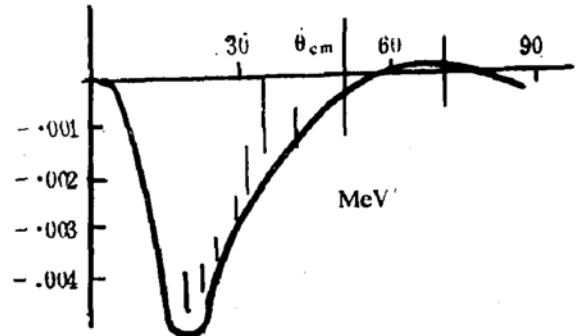


图2

图1, 2 几种不同能量的pp散射分析本领散射角的变化，曲线为巴黎势计算值。

从理论方面讲，可以把核力分成中长程和短程两个区域。大概在 $r >$ 和 $\approx 0.8\text{fm}$ 的中长程区域，核力可以从介子场论得到解释。这方面最成功的是巴黎势，（上次核物理会议上已介绍过）它的短程部分是唯象的，巴黎势只包含很少的可调参量，但是能很好地符合两体实验数据，关于短程部分，由于与核结构有密切关系，应该从夸克胶子作用得到解释。当然也可能直接从夸克模型来计算核力。在这方面也已取得一些进展，特别是有可能解释核力的排斥芯，国内在这方面也开展了一些研究工作。

用多体问题来检验核力是一个比较困难的问题，少数核子问题，（例如三体和四体问题，）和核物质问题是经常用来检验核力的两个方面。关于 ^3H 结合能的计算，应用各种符合两体问题数据的位势计算的结果均比实验值小1到1.5MeV。 ^3He 电荷形状因子的计算，当 $g^2 > 10\text{fm}^{-2}$ 时，理论值都比实验值大。关于核物质的计算，各种核力的计算结果均不能同时

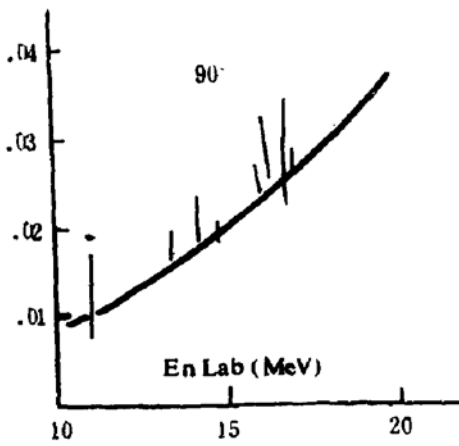


图3

图3 np90°散射极化率随中子能量的变化，曲线为巴黎势计算值。

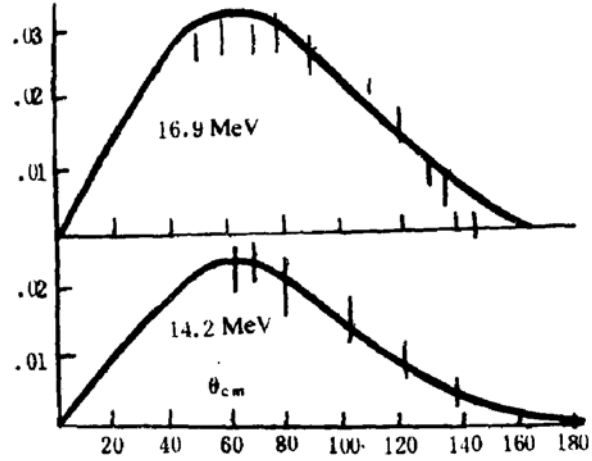


图4

图4 np散射极化率随散射角的变化，曲线为巴黎势计算值。

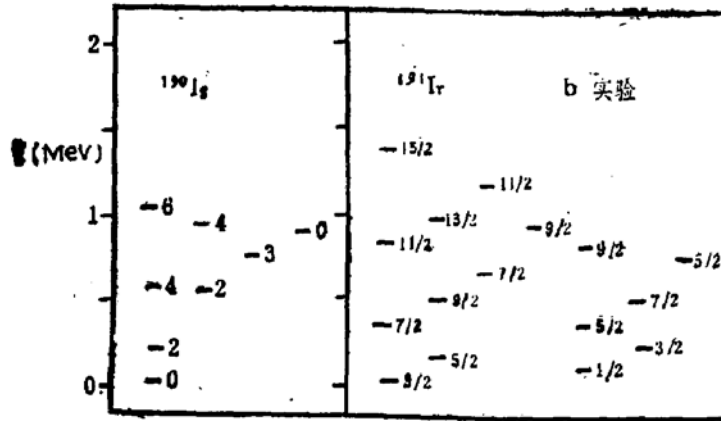
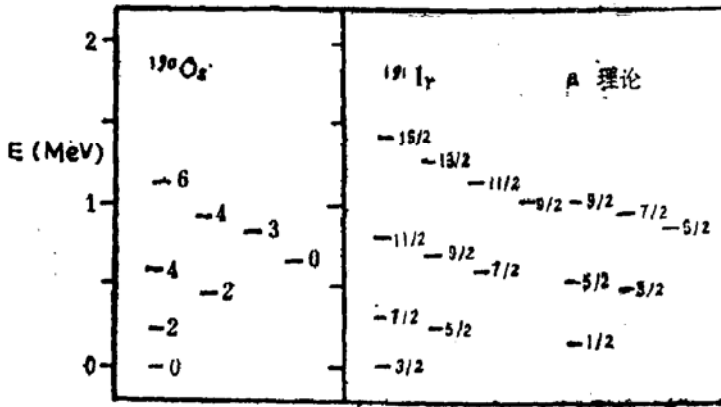


图5 ¹⁹¹Ir的超对称性能级结构。a根据IBM理论计算的结果，b实验能级图。

符合根据液滴模型质量公式推得的核内中心部分的核子密度和每核子的平均结合能（不考虑库仑能和表面能的影响）。例如用巴黎势计算的结果，平均结合能为16MeV，与实验值相符，而密度则比实验值大40%以上。

低激发集体运动态也是经过长期研究的核结构问题。近年来最主要的发展是相互作用玻色子模型（IBM）的提出。这是一个在壳模型基础上的唯象的模型，它的优点是能够系统地处理原子核的低激发集体运动态，特别是处于过渡区核的集体运动态。最近的发展是用具有超对称性的玻色-费米子模型处理奇核的低激发态，图5ab就是一个例子。尽管这仅仅是一个近似的模型，但是这是第一个显示这类对称性的例子。

关于核的低激发态去年曾在我国开过一次国际工作会议，关于IBM模型的应用和微观基础在我国都

曾开展工作。

原子核的巨共振 原子核的激发能超过了10MeV左右时，最引人注目的集体运动是巨共振现象，关于巨共振的新知识大部分来自强子（例如质子和π介子）与核的非弹散射，利用这一类核探针研究自旋和同位旋自由度的激发比较方便，例如从反应（π⁻, π⁰），人们找到

一个截面的峰值，它在向前散射的方向特别显著，由此发现了同位旋矢量巨单极共振。用这一类反应研究 MI 磁偶极巨共振和伽莫夫泰勒共振对于研究自旋和同位旋有关的核力以及核内的亚核自由度有重要的意义。人们发现这类巨共振的总跃迁强度在重核比理论预言要小得多。这种差异可能和核内存在 Δ 共振有关，对此目前尚不能完满地解释（其它因素难以完全排除）。

二、重离子核物理

重离子核物理是近十几年来研究工作很活跃的前沿领域，在这里只能介绍几个较为突出的发展。

新元素的合成 107 号和 109 号元素的合成是一项特出的成就。由于在离子种类和能量的选择方面，先进行了一系列的预备实验，才实现了冷熔合，反应 $^{209}\text{Bi}(^{54}\text{Cr}, n)^{262}107$ 和 $^{209}\text{Bi}(^{58}\text{Fe}, n)^{268}109$ 都只蒸发了一个中子，而且合成的是奇核，大大减小了裂变几率，因而可以观测到衰变链，便于元素鉴定。在实验设备方面使用了大型的速度选择器，可以初步确定观测到反应产物的质量，因此虽然 109 号元素只有一个事例，但由于完善的探测技术，可以初步论证这一事件表明了 109 号元素的合成。这方面的成功鼓励着人们又一次试图合成超重核。

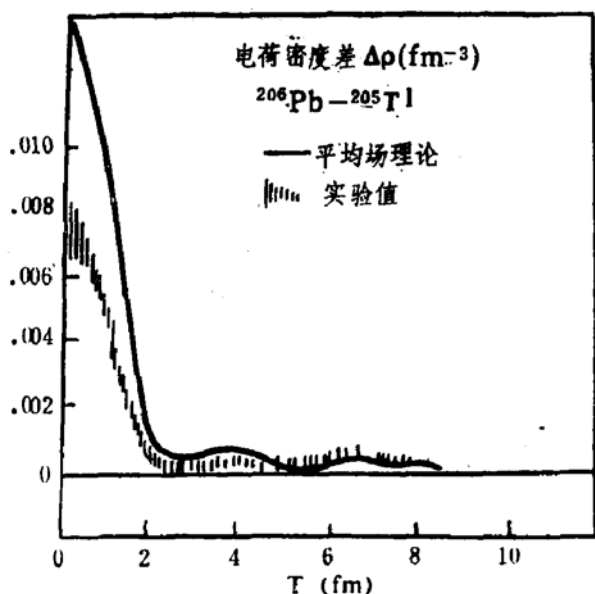


图7 由电子散射获得的 ^{208}Pb 和 ^{205}Tl 的电荷密度差，根据壳模型应为最后一个 3S 质子的电荷密度。图上明显地显示出 S 波电荷分布的特征。

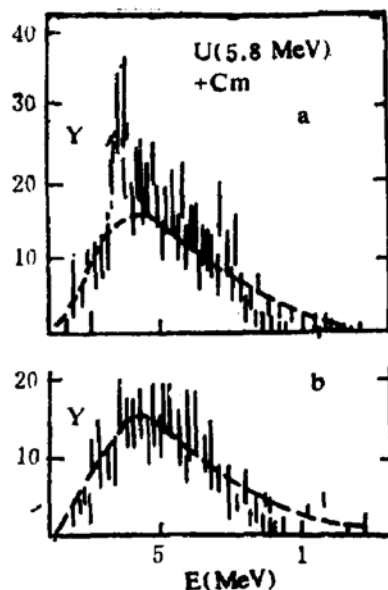


图6 U + Cm的正电子谱

- a. 离子实验室散射角在 27.5° 到 40° 之间，显示一峰值相应延迟时间为 6.5×10^{-20} 秒。
- b. 更为向前散射离子的伴随的正电子谱，无峰值。

虚线为理论计算值，仅仅考虑离子卢瑟福散射。

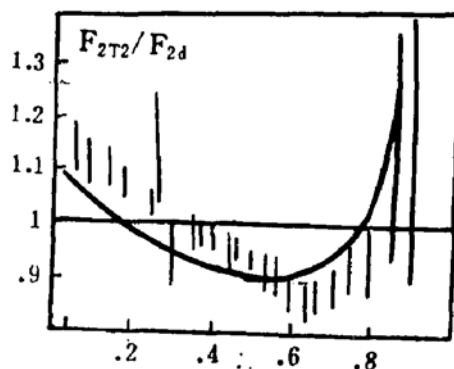


图8 由电子和 μ 子与铁和氩深度非弹散射导出的两核子结构函数的比值。 x 为与动量交换平方成正比的一个无量纲量。

$$x = \frac{Q^2}{2M_p C^2} \frac{1}{(E - E')}$$

$$Q^2 = -q^2 = 4EE' \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

巨核体系 我们称两个重核相碰而形成的核体系为巨核体系。如果其总的电荷超过 $173e$ 则可产生超强电场,引起正电子发射。对于两个很重的核人们发现对向后散射的离子,正电子谱具有一个明显的峰。这种线状结构一种可能的解释是这种核体系具有一个有一定寿命的准稳结构,也许这是研究这种巨核体系的一个途径,当然这种准稳结构在轻的重离子碰撞中早就发现了。(参见图6)

利用高能重离子碰撞来研究核物质的性质是进行这类实验的目的之一。现在通过对 π 介子多重性的测量,已经初步得到一些核物质被压缩到四倍的迹象。当然对这类实验的解释还有很多事要做,要从这类实验中获得可靠的信息是很困难的。

三、中高能核物理

利用中高能粒子束和各种高能反应的次级粒子束作为探针来研究原子核结构的工作称为中高能核物理。

电子探针 由于分析手段的改进,电子探针愈来愈受到人们的重视,测定核的电荷分布是电子与核散射研究的传统课题。由于实验技术和理论分析方法的改进,现在已可用模型无关的方法,从实验数据获得核的电荷分布。因此通过比较满壳层核和满壳层缺或多一个质子的核的电荷分布就可以获得单质子的电荷密度分布,从而获得关于单粒子波函数的知识。图7就是一个例子,从图上清楚地显示出 $3S$ 波函数的特征,这是关于壳模型波函数一次直接的检验。

利用电子非弹散射,还可以测定跃迁电荷密度和电流密度以及核的形状。这也是近年来才能获得的关于核结构的详细知识,分析电子对氩核的弹性散射,可以判定氩核的 D -波百分比约为6%,单单用核力不能解释电子对氩核和 3He 的弹性散射和氩核电子分裂的实验结果。一定要考虑交换介子流才能算得与实验基本相符的结果。这些结论并不依赖于核力的具体形式,因此可以认为这些实验是核内存在介子流的有力证据。

最后还应指出通过高能 μ 介子和电子对核作深度非弹性散射时所发现的EMC效应。如果忽略核结构的效应,那么电子(或 μ 介子)与 ^{56}Fe 散射的结构函数应该近似地为氩核结构函数的28倍。如果考虑到屏蔽效应,则在动量交换很小的区域内 ^{56}Fe 散射所得结构函数,经过折算为两核子结构函数后,应略低于氩核的结构函数,而在大动量交换的一端,则由于费米动量的影响,略大于氩核的结构函数。实验结果如图8所示。如果假设核内非弹散射有30%的贡献来自 6 夸克态,则如图曲线所示,可以近似地符合实验结果。当然,还要做很多理论和实验工作,才能在这一重要问题上做出明确的结论。

介子探针 前面已经指出,在研究巨共振时,人们往往使用 π 介子探针,特别是同位旋矢量单极巨共振,只是通过 (π^+, π^0) 反应才发现的。近年来,由于分析设备的进步,从实验精确度看, π 介子已接近电子的水平,使用介子,其优点在于可以有更多类型的反应,例如通过 (π^+, π^-) 反应可以产生 $\Delta T = 2$ 的同位旋相似态,利用 K 介子还可以产生各种超核,这是一个非常广阔的领域,其缺点在于理论处理比较困难,往往不能和电子一样,提供关于核结构很确定的信息。

四、核物理与其它学科

核技术的广泛应用是科学技术现代化的重要标志之一,很难设想有那一个科学技术部门不能从核技术应用中得到好处。应该说,这是核物理学中最最引人注目的一个方面,也是核物理受到科技界普遍重视的原因之一。要想用很短的篇幅介绍这方面的最新成就,即非我的力所能及,也是很难做到的事。因此,我想举出核技术在聚变能源方面几种最新的,可能的

应用。

极化核聚变堆 核反应截面一般是和参与反应的核的自旋取向有关的，以氘^(D)氚^(T)反应为例，如两核的自旋取向相反，生成中子和⁴He的截面要比非极化束的平均截面大50%。因此用极化束可以提高反应产额，目前关于极化离子源的发展，已有可能获得很强的极化束，理论估计，在进行聚变反应的等离子体中，极化可以保持一个相当长的时间（如仅仅考察通过离子间的碰撞退极化，氘和氚的极化程度分别可以保持10⁵秒和10⁶秒）。当然还有一些别的因素可能引起退极化，估计在一两年内，当大功率极化源制成后，即可在现有的试验装置上进行实验验证。

重离子束惯性约束聚变 这是近年来受到注意的一个方向，作为有效的打靶束流，要具备下列条件：（1）脉冲功率10¹⁴瓦，能量为几个兆焦耳，效率10%到20%；（2）束流聚焦到几个毫米直径的靶；（3）全部能量应该沉积在靶的表面，深度不超过0.1g/cm²，否则不能有效地压缩；（4）每秒10到20个脉冲，装置寿命应达到30年，造价不高于几亿美金。根据现有加速重离子的技术，这些条件是可以在近期内达到的。而用其它束流，虽然可以进行试验，要全面达到上述要求都有困难，目前这方面一个主要不定因素是空间电荷对重离子束聚焦的影响，在这方面没有进行实验研究。

μ子催化聚变 当μ子束注进D, T混合物时，如能形成μ分子DT_μ，则D, T发生聚变反应而释放μ，而μ又能形成新的DT_μ，引起新的聚变，原来的理论计算表明，形成DT_μ的几率比较小，一个μ子在衰变前只能引起一个聚变，这当然在能量上不合算，近来人们发现DT_μ的一个能级和分子团DT_μ-D或DT_μ-T的一个能级能量偶然相同，而T_μ与D₂或DT结合这种分子团的几率相当大。如能把μ子从α粒子的俘获中解脱出来，一个μ子可以促成100到1000次聚变。实验上已经在127℃，密度为液氢的60%的DT介质中获得每μ子引起70个聚变的结果，复活了实现冷聚变的希望。当然这方面还有很多实验和理论工作要做，最主要是要设法把μ子从α粒子的俘获中解放出来，以及进一步验证生成DT_μ的机制。

上面这些情况又一次给我们指出，基础研究所发展的先进技术往往具有重大的应用可能性。

五、实验和加速技术

应该指出，上述各种成就都和实验技术和加速技术的发展有紧密的关系。当然，最引人注目的是多参量数据获取系统的发展和新的加速器的建立，在这里只能作一些简单的介绍。

γ射线多重探测装置 为了研究自旋态和测定重离子核反应中的γ多重性，人们用许多γ探测器组成一个球形探测器组，可以测定自球心向任何方向发射的γ射线，例如Heidelberg的晶体球就是由162个NaI晶体组成的多面体，其中部分晶体可以换成高分辨率的锗探测器，邻近的晶体之间还可以组成反符合系统，以减少康普顿本底。因此整个系统组成了一个高效率的γ谱仪，用这种系统不仅可以测定γ多重性等，还可以探测稀有的γ衰变事件，例如，已经用这种装置，探测到⁹⁰Zr 1.76MeV O⁺态到基态(O⁺)的双γ跃迁。这一典型的例子说明γ探测设备怎样从70年代通用的晶体谱仪，通过使用电子计算机，发展到价值百万美元的大型设备，从目前的趋势看，探测设备的费用，已经接近主要加速器的费用。

重离子加速技术 在近十多年来一直是一个发展迅速的部门，图9a, b, c分别画出了已在运行、正在建造和计划建造的重离子加速器。从图上可以看出，在近四五年内，运行中的重离子加速器数目将增加接近一倍，而且对于轻的重离子(A<40)，每核子能量都超过或接近30MeV。而计划建造的尚有6台，重离子加速器的另一个趋势是在串列静电加速器上接

后加速系统。这样做能保持串列静电的束流品质，造价也较低，缺点是往往不能加速很重的离子。离子源的改进是重离子加速技术的另一个重要方面，我们知道重离子加速器中离子所获得的能量与离子的电荷态有关，直流型加速器离子能量正比于电荷数，而回旋型的离子能量正比于电荷数的平方，目前发展的电子共振离子源 (E.C.R) 已经能有效地提供 18 个电荷态的 Kr 和 26 个电荷态的 Xe，进一步的改进，可望得到 26 个电荷态的 Kr 和 30 个电荷态的 Xe。另一种电子束离子源则可望提供电荷态为 70 的 U 离子，强度达到每秒 10^{10} 个。

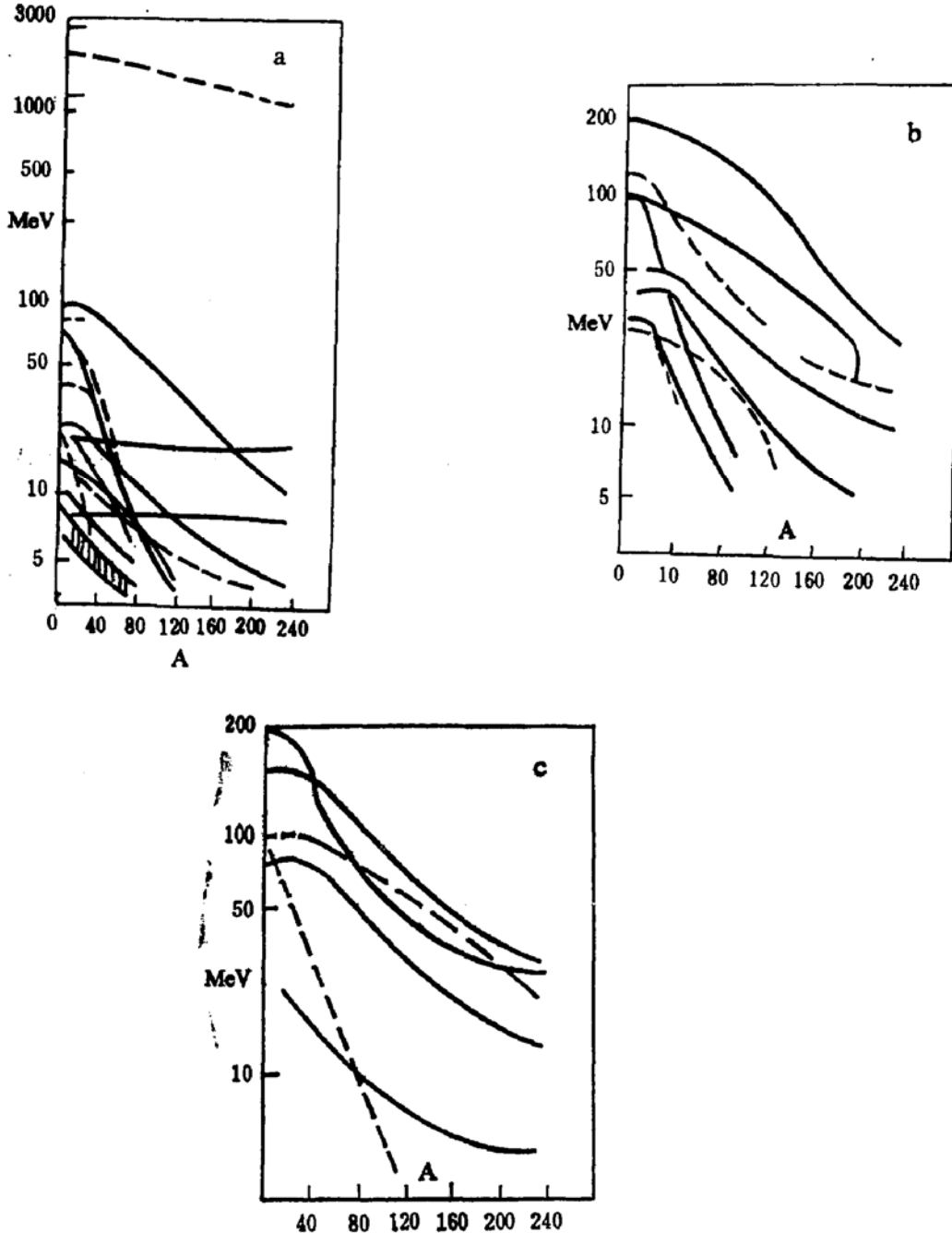


图9 重离子加速器建造情况，每一曲线表示一台设备加速离子的范围及能量。
a 现有 b 建造中 c 计划建造的

电子加速器 前面已经指出，在近年来，电子探针已发展为研究核结构的有效武器，因此电子加速器的建造也相应地受到重视，在最近的三五年内，将有十几台电子加速器建成或提高了性能后投入运行，加速能量在几百 MeV 到几 GeV 的区间，平均流强从几十到一两百个

微安，有不少加速器由于采用了脉冲拉伸环技术，将提供连续束流，同时由于发展了电子束激光散射的方法，可以得到几百MeV的单色 γ 射线，这对于利用光子探针将会是一个促进，不难看出，这些加速器的建成，投入运行，将大大推进核结构的研究。

六、结束语

上面介绍的成就大部分是贝克莱会议以后的发展，还有很多工作因为难以用几句话加以论述，未能在此介绍。仅仅从涉及的内容看，已足以说明核物理依然是一个很活跃的研究领域，新的成果不断出现，新的大型设备不断建立，人们对原子核物理这个领域表现兴趣，投入巨大的人力物力，我想，主要有以下几个因素在起作用：

1. 作为物质结构的一个层次，原子核具有独特的特点，它的运动形态具有无限的多样性。我们对这种多体系的基本性质还有许多基本问题没有弄清楚，因此研究原子核，对于推动整个物理学的发展，能够起其它研究领域所不能替代的作用。

2. 原子核是研究强作用和弱电作用的天然实验室。它和物质结构的下一个层次，粒子的结构有着极密切的关系。

另一方面，原子核物理又是研究天体演化、元素形成、星体演变等天文物理问题的必要基础。从尺度上讲，从极大到极小，原子核物理都在起着重要的作用。

3. 核能源的发展对核物理和核技术提出了许多基本的或迫切要解决的问题，毫无疑问，这是推动核物理研究一种重要的动力。

4. 核技术能提供关于物质结构及其运动形态最详细的信息又能对物质作最精细的加工，因此，核技术在材料科学、生命科学、原子分子物理以及其它科技部门都有重要的应用，而核物理研究又是核技术发展的源泉。

5. 最后还要指出，无论是核物理基础研究或核技术的应用的发展，都是和计算技术和信息处理能力的进展分不开的。这些方面的发展也还不过是近十多年的事。从已经取得的成就可以预期，随着信息技术的大发展，核物理研究和核技术的应用还会以更大的步伐向前迈进。

参考文献

[1] «Proceedings of the International Conference on Nuclear Physics» Vol. 2. 主编 P. Blasi and R. A. Ricci. 意大利 Tipografia Compositori-Bologna 出版 1983.

[2] Physics News in 1983. 主编 P. F. Schewe 美国物理学会出版。