

层子核物理¹⁾

王 凡 和 音

(南 京 大 学) (北京师范大学低能核物理研究所)

一、引 言

原子和分子的历史可能在原子核和基本粒子中重演。

早在物理学揭开原子内部结构以前,化学已在研究分子,不过这时化学中的分子被认为是无内部结构的原子的复合体,因而不能彻底了解分子结构和化学现象。后来,在建立了原子有核模型基础上,运用量子力学方法,才真正说明了分子结构和化学现象,从而使原来分属于物理学和化学的原子结构和化学现象统一成了原子分子结构问题。这是人类认识物质结构的一个里程碑。

原子核的研究已经有半个多世纪了,但是作为核物理的基本问题之一的核力究竟是怎么回事,也还没有完全搞清。一个可能的原因是,至今的核物理都把核子当作无内部结构的点粒子,就象经典化学把原子当作无内部结构的点粒子一样。事实上,核子是有结构的,原子核问题的最终解决有可能要从核子有结构的角度入手,原子核和基本粒子的关系可能是分子和原子关系在更深的物质结构层次上的重演,当然并不是简单重复^[1]。

几年以前,核物理和粒子物理间还存在着一条鸿沟。现在,以层子模型为基础来沟通核物理和粒子物理的尝试终于开始了。不过,由于今天的量子色动力学(QCD)还不及1927年时的量子力学那样成熟,层子互作用应当如何描写也不十分清楚,所以我们还不能象 Heitler 和 London 那样从第一性原则出发,而只能既借用一些 QCD 的一般结论,又加上一些唯象

猜测来进行研究。这样的模型理论目前主要有两种,一种是口袋模型,一种是势模型,这两种模型各有自己的优缺点。本文只介绍从势模型出发沟通核物理和粒子物理的尝试。

二、强子的层子势模型简介^[2]

层子势模型是原子壳模型和原子核壳模型的延伸。此模型的基本假定是:(i)层子相互作用可用一个瞬时的定域势描述,目前大多采用下列形式的层子势:

$$V_{ij} = \lambda_i \cdot \lambda_j (V_0 + k r^a + V_{BF}), \quad (1a)$$

$$\begin{aligned} V_{BF} = \alpha \left\{ \frac{1}{r} - \frac{1}{2m_i m_j c^2 r} [\mathbf{p}_i \cdot \mathbf{p}_j \right. \\ \left. + \hat{\mathbf{r}} \cdot (\hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{p}_i) \mathbf{p}_j] - \frac{\pi \hbar^2}{2c^2} \delta(\mathbf{r}) \left(\frac{1}{m_i^2} \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{m_j^2} + \frac{4\boldsymbol{\sigma}_i \cdot \boldsymbol{\sigma}_j}{3m_i m_j} \right) - \frac{\hbar^2}{2c^2 r^3} \left(\frac{\mathbf{r} \times \mathbf{p}_i \cdot \boldsymbol{\sigma}_i}{2m_i^2} \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{\mathbf{r} \times \mathbf{p}_j \cdot \boldsymbol{\sigma}_j}{2m_j^2} \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\mathbf{r} \times \mathbf{p}_i \cdot \boldsymbol{\sigma}_j - \mathbf{r} \times \mathbf{p}_j \cdot \boldsymbol{\sigma}_i}{m_i m_j} \right) \right. \\ \left. - \frac{\hbar^2}{4m_i m_j c^2 r^3} (3\boldsymbol{\sigma}_i \cdot \hat{\mathbf{r}} \boldsymbol{\sigma}_j \cdot \hat{\mathbf{r}} - \boldsymbol{\sigma}_i \cdot \boldsymbol{\sigma}_j) \right\}, \end{aligned} \quad (1b)$$

这儿 λ 是色 SU_3 (表示色 SU_3 , 即夸克三种颜色态间的么正对称性) 群的生成元 (即 Gell-Mann 矩阵); $k r^a$ ($a = 1$ 或 2) 是为了反映层子囚禁而唯象地引进的, $a = 1$ 的线性囚禁势也许可从 QCD 导出; V_{BF} 是单胶子交换引起的 Breit-Fermi 相互作用; α 是层子胶子耦合强

1) 本文曾在“全国原子物理教学讨论会”(北京, 1982) 上报告。

度常数; $m_i(p_i)$ 是层子质量(动量); σ_i 是通常的泡利矩阵; $\mathbf{r} = \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j$; $\hat{\mathbf{r}} = \frac{\mathbf{r}}{r}$; \hbar 和 c 是普朗克常数和光速; V_0 是一相加常数。(ii) 层子动力学可用薛定谔方程描述。

适当选择相互作用势中的参数, 此模型大体能说明现有的强子谱。不过, 目前不同作者往往采用不同的层子质量, 保留相互作用势(1)式中不同的项。有的用 $a = 1$ 的线性囚禁势, 有的用 $a = 2$ 的谐振子囚禁势, 并相应地采用不同的参数 V_0, α, k , 但都只能或好或差地说明了强子谱。总之, 强子谱分析尚不能完全定下层子相互作用势的形式和参数, 情况和唯象核力有点相似。

三、原子核的层子集团模型

传统核物理已经取得了相当的成就, 这表明传统的看法(原子核由无内部结构的点核子组成)在一定范围内适用。强子的层子模型也相当成功地说明了强子性质, 这表明层子模型必定在一定程度上正确地反映了强子结构。为了把这两方面统一起来, 使既能反映强子的层子结构, 又能反映核子等强子相当稳定地作为一个整体存在于原子核中, 比较合适的模型是原子核的集团模型, 它把核子看作一个层子集团, 原子核由一个一个这样的层子集团组成。近年来国内外已采用这个模型进行了一些计算^[2], 分析的对象自然地比较集中于双强子系统, 尤其是双核子系统。因为双核子系统的实验资料最丰富最可靠, 理论处理也最方便。

1. 核力的层子模型

核力本来被认为是强相互作用的代表, 现在看来不再能代表基本的强相互作用了。从 QCD 看, 基本的强相互作用是层子间由胶子传递的色相互作用, 层子势(1)可能是这种色相互作用的非相对论近似。人们已经在核力问题上作过大量研究, 唯象地引进了多种核力, 它们都能等效地说明低能双核子实验数据。另一方面介子理论也已发展得相当复杂。但是无论唯象

核力还是介子理论, 对于核力的短程行为 ($r < 0.5\text{fm}$), 实际上都无能为力。根本的问题在于核子和介子都有层子结构, 而唯象核力或介子理论都把它们当作无内部结构的点粒子。

从核子有结构角度探讨核力的短程行为, 最早可追溯到坂田模型。1964年 Tamagaki 等人提出核力的排斥心可能类似于 α - α 等效势中的排斥心。由于核子是由另一些未知的费米子组成的, 泡利原理使得它们的相对运动波函数有一个几乎不随能量变化的节点, 核力的排斥心不过是这种节点的等效表现。但是, 考虑到层子具有色自由度后, 泡利原理并不排斥六个层子都占据最低轨道。

Oka 和 Yazaki, Harvey 分别用层子集团模型及其共振群方法作了较仔细的计算。Oka 等人用的层子势是

$$V_{ij} = \lambda_i \cdot \lambda_j \left[kr^a + \frac{\alpha}{r} - \frac{2\pi\alpha\hbar^2}{3m^2c^2} \sigma_i \cdot \sigma_j \delta(r) \right]. \quad (2)$$

计算中考虑了 N-N 和 N- Δ , Δ - Δ (Δ 指核子共振态)道的耦合。图 1 给出了 Oka 等人计算出的 S 波单态和三态 N-N 相移 δ 随 N-N 质心系散射能量 E_{cm} 的变化趋势。曲线旁的符号 3S_1 和 1S_0 等是通常的光谱符号 $^{2s+1}L_J$ 。在左上角 $2s+1$ 中的 s 指道自旋, L 指轨道角动量 ($L=0, 1, 2$ 分别对应于 S, P, D), 右下角 J 指总角动量(图 2, 3 符号意义同)。显然, 他们的理论相移和图 3(a) 中相应的实验值(虚线)不符。不过 Oka 等人认为, 他们算出的相移随散射能量递增而单调下降的趋势说明了核力有排斥心(通常认为, 散射能量 $E_{cm} \geq 300\text{MeV}$ 时, 实验 N-N 中的 S 波相移由正变负表明核力有排斥心), 并指出, 核力的排斥心是泡利原理和层子势(2)中的自旋相关项共同作用的结果。

Harvey 用的层子势是

$$V_{ij} = \lambda_i \cdot \lambda_j [V_0 + kr^2 + Ce^{-r^2/b^2} + A\sigma_i \cdot \sigma_j \delta(r)]. \quad (3)$$

参数 V_0, k, A, b, c 用 2GeV 以下的强子谱定出, 分别用单道近似(即只考虑 N-N 道)及三道耦合近似(即考虑 N-N 和 N- Δ , Δ - Δ 及 C-C

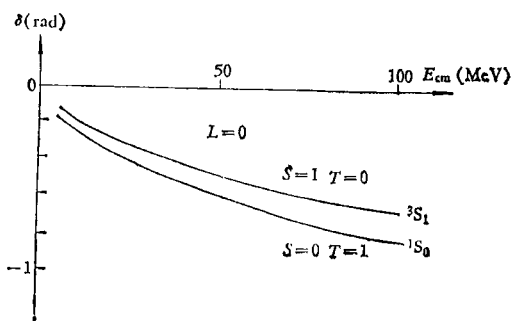


图 1

隐色道¹⁾的耦合)计算出 S 波三态 N-N 相移 δ 。图 2 中的虚线及对应于 $V_\pi = 0$ 的实线即为单道及三道近似计算值。容易看出,他的理论值和 Oka 等人的相似。除了说明核力有排斥心外,其他方面也 and 实验不符。Harvey 认为,理论和实验不符的原因在于上述计算中未考虑海层子激发引起的介子交换效应,因此他在层子势外唯象地加进了单 π 介子交换势:

$$V_{NN} = V_\pi \sum_{i>j} \sigma_i \cdot \sigma_j \tau_i \cdot \tau_j e^{-r^2/\beta^2}, \quad (4)$$

其中 $\beta = 1.42\text{fm}$; σ, τ 分别是自旋、同位旋泡利矩阵; V_π 是强度参数。图 2 中的五条实线分别对应于外加了 $V_\pi = 0, 2, 4, 6, 10$ 的单 π 介子交换势(4)后,用三道耦合近似算出的相移。由图可见, $V_\pi = 10$ 的曲线大体与实验曲线的趋势相符。

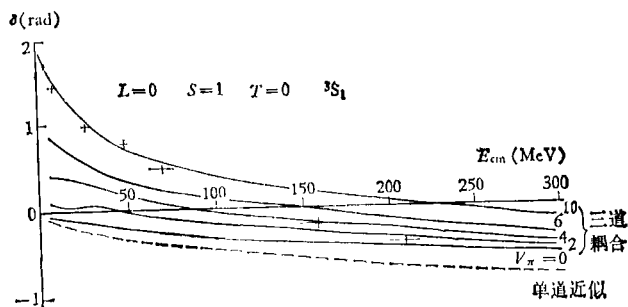


图 2 Harvey 理论 N-N 相移 δ 和实验相移的比较

Warke 和 Shanker 比较全面地分析了层子势(1)中各项的作用,得出了定性上和唯象核力一致的结果,但定量上同样也和实验不符。应该指出,他们用的近似并不十分可靠。

我们和国外同时独立地开展了这项研究。

i. 我们用单道共振群方法计算了层子势(i)的中心势引起的 N-N 单态相移。层子势参数取自几组具有代表性的强子谱分析定出的值,这样算出的单态相移也和相移分析结果不符。ii. 考虑到上述种种味无关层子势都不能定量解释实验相移,我们根据强子表现出来的对称性 $SU_3 \times SU_2 \times SU_3$, 唯象地假定了一种味有关层子相互作用势:

$$V_{ij} = \lambda_i \cdot \lambda_j (V_0 + kr^2) (a + b\sigma_i \cdot \sigma_j + c\lambda_i' \cdot \lambda_j' + d\sigma_i \cdot \sigma_j \lambda_i' \cdot \lambda_j'), \quad (5a)$$

其中 λ' 是味 SU_3 群的生成元(形式和 λ 相同); k 由核子均方根半径来定; V_0 由核子基态结合能来定。可调参数取下列值:

$$a/d = 0.51, \quad b/d = -1.05, \quad c/d = -0.03. \quad (5b)$$

统一计算了 n-p, p-p, Λ -p, Σ^+ -p, Σ^- -p 和 Σ^0 -p 散射的相移、微分截面及积分截面。图 3 中给出了我们的理论 n-p 相移和实验的比较(微分、积分截面的详细比较列于文[3]中)。由图 2,3 可知,我们单用层子势(5)计算出的相移就和 Harvey 外加了单 π 介子交换势的相移(图 2 中 $V_\pi = 10$ 的曲线)相近,定性地与实验曲线的趋势相符。iii. 我们用层子势(5)加上层子势(1)中的自旋轨道耦合势计算了三态 N-N 相移,发现层子势中的自旋轨道耦合项对 N-N 三

态相移劈裂影响很大。特别值得指出的是,我们的计算表明, N-N 偶、奇分波相移的正、负交替现象,可能是层子费米统计性引起的一种奇偶效应。

层子势(1)应用于强子谱定出的几组参数未能同时说明核力。一个可能改进的途径是寻找新的参数(使能统一说明强子结构和强子相互作用);另一个途径是考虑 N-N 道和 N- Δ , Δ - Δ , C-C 道的耦合。由于不同的同位旋态可能的耦合道不同,这种耦合将会

在 N-N 道产生味有关的等效势。这既可能是解决

1) 单个核子处于有色激发态,但两个核子合起来仍无色道称为隐色道,它类似于极性分子。

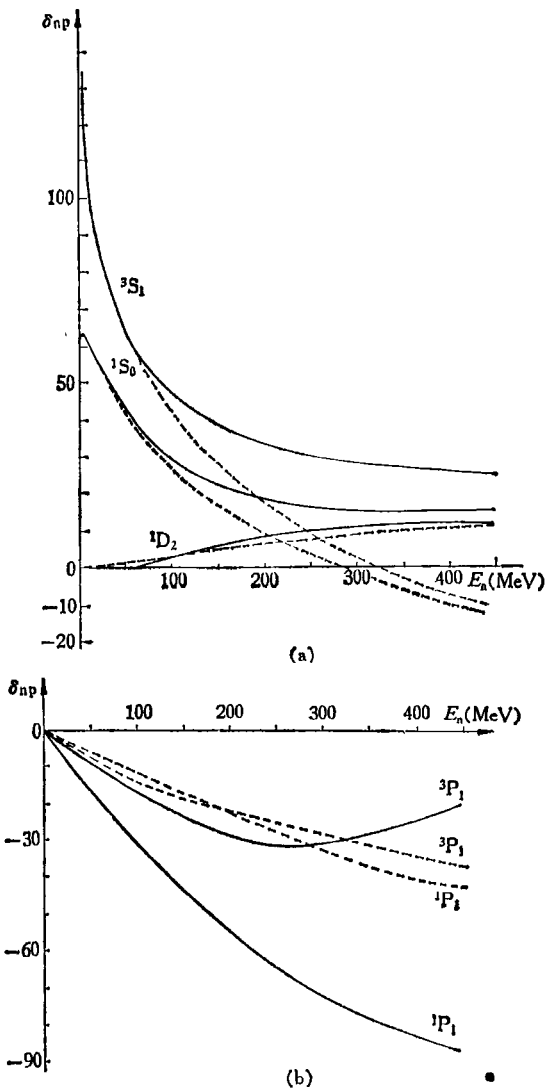


图3 味有关层子势(5)理论和实验 n-p 相移 δ_{np} 的比较
 实线为理论计算值；虚线为相移分析结果；
 E_n 为入射中子能量

层子势(1)在单道近似下和 N-N 相移不符的出路,也可能把味无关相互作用(1)和味有关相互作用(5)联系起来(即层子势(5)可能是已经包含道耦合影响在内的一种等效势)。

现有的种种层子集团模型计算虽然还未能完满地说明核力,特别是短程处核力的行为,但是无论如何它总为研究核力开创了一个新局面。

2. 核内的层子自由度^[4,5]

自从1932年发现中子以来,人们一直认为

原子核是由质子和中子组成的。超核的发现把原子核的成分扩大到 Λ 和 Σ 超子。近十多年来又证实了介子自由度及核子激发态确实是一些核现象中起作用。现在核子既然由层子组成,那就很难设想层子自由度永远冻结在核子内。以氦核为例,只要我们承认核子由层子组成,就可写出层子自由度,例如采用双核子集团波函数作为近似氦核波函数:

$$\Psi_{ST}(123456) = \frac{\mathcal{A}}{N} \{ [\phi_{N_1}(123)\phi_{N_2}(456)]_{ST} \cdot F^{ST}(\mathbf{r}) \}, \quad (6)$$

这儿 ϕ_N 是单核子波函数; $[\]_{ST}$ 表示把两个核子的自旋、同位旋耦合成 ST ; $F^{ST}(\mathbf{r})$ 是双核子相对运动波函数; \mathcal{A} 是反对称化算符; N 是归一化系数。式(6)也只在 $r \gg$ 核子半径时才表示双核子。当两个核子集团靠近时,波函数(6)里也包含了 Δ - Δ 和 C-C 成分。

虽然上面的讨论是以氦核为例进行的,但结果具有普遍性:只要承认核子的层子结构,那么在核内必然出现 Δ 成分和核子色激发态成分。中高能物理已对核内 Δ 成分进行了不少研究。色激发态成分则是层子集团模型带来的全新内容。实验上尚未发现自由层子,而且目前普遍认为永远不可能分离出自由层子。如果能在核中真正找到色激发态成分,那将是有色层子模型的重要依据。

3. 双重子共振^[6]

自然界唯一存在的双重子系统是氦核,而且氦核只有一个束缚能级。究竟有没有其他双重子态?近年来 N-N 碰撞、 γ -D 和 π -D 等实验中一再宣称发现了双重子共振,其中 1D_2 (2.16 GeV), 3F_3 (2.20 GeV) 共振的证据似乎最多,但是就是这两个共振态也还有待进一步检验。

理论上要从点核子模型来说明双重子共振是颇麻烦的,但是从层子集团模型来看,出现双重子共振是很自然的。如果采用层子势(1),那么如(6)式那样的六层子态并非哈密顿的本征态。(6)式所描述的 N-N 道必定和 Δ - Δ , C-C 道耦合起来,通常的核反应理论早就证明了这种道与道的耦合将会在 N-N 散射道引起

共振。这儿特别有兴趣的是隐色 C-C 道引起的隐色共振。如此看来双重子共振应该相当多，但实验上看到的却是极少。一个可能的解释是 N-N 道和 C-C 等道的耦合很强，使共振能级宽度都很大，这样实验上就不易观察到了。

4. 奇特多层子态^[7]

目前自然界已经发现的层子系统有介子 $q\bar{q}$ 、重子 qqq 、原子核 $(qqq)_1 (qqq)_2 \cdots \cdots (qqq)_A$ ，这儿 q 代表层子， \bar{q} 代表反层子。另外，中子星内部可能已从核物质相变成层子物质，但是从层子模型看，即使限于色禁闭（即只准许存在无色态）条件下，可能存在的多层子体系也决不限于上述几种，例如可以有 $qq\bar{q}\bar{q}$ ， $qqq\bar{q}\bar{q}$ ， $q\bar{q}q$ 和 $qqqg$ 等体系（ g 表示胶子），这些多层子体系统称为奇特多层子态。

如果考虑到 $q\bar{q}$ 对激发或海层子混合，那么通常介子、重子态中就可能混有 $qq\bar{q}\bar{q}$ 、 $qqq\bar{q}\bar{q}$ 等成分。

类比于电子偶素 e^+e^- ，我们把 $p\bar{p}$ ， $n\bar{n}$ 等重子反重子态叫重子素。曾有人从唯象势模型和介子交换模型讨论过重子素，预言了一些束缚能级和共振能级，因此当有几家实验室报道观察到 $N\bar{N}$ 束缚态和共振态时，曾一度引起重视，可惜后来的实验又否定了这些结果。但是，这方面的理论和实验研究并未因此而停止下来，相反，由于层子集团模型的介入，这个问题依然是大家极为关心的。从层子模型看来，重子素 $qqq\bar{q}\bar{q}$ 很容易通过湮没一对 $q\bar{q}$ 而过渡到 $qq\bar{q}\bar{q}$ 奇特多层子态，Chan Hong-Mo 等人指出^[8]， $qq\bar{q}\bar{q}$ 有两种存在模式：一种是一对层子和反层子都处于对称态（色六重态）；另一种是一对层子和反层子都处于反对称态（色反三重态）。后者很容易从层子海中拣起一对 $q\bar{q}$ 而转化成两个无色重子，前者即使从层子海中拣了一对 $q\bar{q}$ ，也还只能产生色激发态重子。由于色禁闭而仍然囚禁在一起，因此这种模式不易直接衰变成无色重子。这些理论估计和当时实验初步观察到两类 $N\bar{N}$ 迹象是一致的。如果这类现象真能肯定下来，那将是有色层子模型的又一重要论据。

四、问题与展望

非相对论的层子势模型及在核物理中的层子集团模型在解释强子谱时相当成功，在解释核力等物理基本问题上也取得了一些进展。但是，目前普遍认为，这个模型还存在一些根本性的问题有待澄清。

1. 强子内层子的运动（特别是和核物理现象有关的轻层子的运动）中，即使按层子势模型本身来估计，相对论效应也是显著的。例如，取 $m = 336\text{MeV}$ ，核子均方根半径 $r_0 = 0.8\text{fm}$ ，由测不准关系也可估计出 $v/c = mv/mc \sim \hbar/mcr_0 \sim 0.7$ ，何况从其他模型看，层子质量可能更小。这样就必须回答，为什么一个相对论系统可用非相对论近似？

2. 前面已经提到，单道波函数(6)式并非哈密顿量的本征态。更准确的近似必须考虑隐色 C-C 等道的耦合。许多作者用不同方法计算了隐色道的影响，他们发现，考虑隐色道后， r^6 型囚禁势将在无色强子间产生 r^{-4} 型色 Van der Waals (VdW) 力。而现有强子相互作用的各种精确实验结果表明，强子间不太可能存在比 r^{-5} 衰减得更慢的长程力，因此囚禁势(1)应用到强子间将产生和实验矛盾的结果^[9]。考虑到这个问题的重要性，加上现有讨论 VdW 力的方法都是近似的，我们严格解出了(7)式那样的 N-N 和 C-C 两道耦合方程的长程解，证实了 r^6 型囚禁势确实产生 r^{-4} 型 VdW 力。但是，当我们用 Green 函数方法分析了此两道耦合方程解的性质时，发现长程 VdW 力来自有色核子间的高激发相对运动能级的耦合。考虑到相对论限制，应该剔除那些激发能非常高的相对运动能级，这样就可消除虚假的色 VdW 力^[10]。当然这个方案尚不是最终解决问题的办法。

类似的问题还可列举出不少，如层子势(1)并未考虑 $q\bar{q}$ 对产生的影响，即当两个层子相距越来越远时，层子势不会无限增长下去，而是必然引起真空极化，产生 $q\bar{q}$ 对。估计这种效应将

改变层子势长距离处行为,可能这是消除色VdW力的一种机制。

虽然有上述种种问题,但是目前国际核物理学界还是普遍认为,把层子模型引入原子核将是核物理研究的一个转折点,它有可能成为统一核物理和粒子物理的起点。它也许会给核物理的一些基本问题(例如核力)加深认识,对核物理的一些疑难问题(例如多体力)给出启示。它预示的一些新现象,例如双重子共振、奇特多层子态、核物质到层子物质的相变等,也许会展示物质结构的一些新面貌。它的基础还不稳,但是正因为今天的粒子物理还不成熟,这方面的研究也许会促进粒子物理的发展。

参 考 文 献

- [1] 胡宁,高能物理, 3(1982), 20; 朱洪元,高能物理, 3(1982), 21.
- [2] O. W. Greenberg, *Ann. Rev. Nucl. Sci.*, **28** (1978), 327.
- [3] 王凡、和音,物理学进展, **2**(1982), 178.
- [4] S. J. Brodsky and G. P. Lepage, *Nucl. Phys.*, **A353**, (1981), 247C.
- [5] M. Chemtob, *Nucl. Phys.*, **A358**, (1981), 57C.
- [6] A. Yokosawa, *Phys. Rep.*, **64C**, (1980), 47.
- [7] R. H. Dalitz, *Nucl. Phys.*, **A353**, (1981), 215C.
- [8] Chan Hong-Mo and H. Høgaasen, *Nucl. Phys.*, **B136**, (1978), 40.
- [9] G. Feinberg and J. Sucher, *Phys. Rev. D*, **20** (1979), 1717.
- [10] 王凡、和音等,原子核物理, **3**(1983), 263; 物理学进展, **4-1**(1984), 34.

(上接第 468 页)

一方面是学生的思想境界比较狭隘,但在当时,大学的教学和对学生的思想灌输也是使学生形成这种偏见的重要原因。我对目前大学物理系的教学思想了解不多,但在我这里做论文的学生,他们的想法和我当时的想法仍然相差无几。

除此之外,物理工作者很少到开发领域、工厂去工作,还有其深远的社会根源。许多人事部门、厂长、经理对于物理系学生的“价值”了解甚少,有人误认为物理系毕业生的唯一出路是教书。还有一个重要的原因,少数分到这些单位的学生,也往往发挥不了正常的作用。除了个别学生不安心工作以外,有时环境也不太好。物理工作者搞工作有自己熟悉的一套方法,例如看文献,进行理论推导,解决问题希望探本穷

源等,这些在有的单位有时候得不到的理解和支持,在个别单位,这些做法被视为左道傍门。而他们对于工作条件的一些起码要求(例如实验室等)常常得不到满足。至于进修,出国工作学习等机会,更比高等院校、科学院少得多。因此也难怪相当一部分已经分配到这些单位的物理系毕业生,后来又想方设法调回高等学校。我所认识的人中,这样的例子不胜枚举,其中还包括一些在这些领域中作出贡献者,我觉得这是一种损失。

近年来,上述情况有所改善。今年六月由教育部和中国物理学会联合召开“物理学人才作用报告会”,从各方面开始重新估价物理学人才在经济建设中的作用,这是很可喜的现象。

1984 年第 9 期《物理》内容预告

光泵、光泵磁共振及其进展(李大年等);溶解发光(苏剑尘等);夸克与核力(侯逸民等);从在大庆油田参加测井协作谈物理人才在技术部门中的作用(王明达等);从电视摄像管偏转聚焦线圈赶超世界水平看物理人才在技术性课题中的作用(赵启正);半导体工业需要物理人才(胡志道);北京无线电磁性材料厂使用物理人才情况(卢迁);谈在汽车工业中发挥物理学作用的体会(柏建仁);物理人才在企业部门的工作情况(潘

根);谈谈物理学在技术工作中的作用(戈仲禹);傅里叶变换光谱术及其应用(虞宝珠);利用脉冲强磁场测量稀土钴永磁合金的磁滞回线(杨伏明等);杠杆式金刚石对顶砧高压装置的压力校正(车荣铨等);白矮星和中子星(乔国俊);银盐记录介质在光学信息处理中的应用(王玉堂等);分子振动及其喇曼光谱(庄志诚);精勤研学艺,艰辛育英才——朱福忻教授回忆原浙江大学物理系(洪震寰)。