

核物理研究新进展

姜承烈

(中国原子能科学研究院,北京 102413)

核物理研究领域正在不断扩大。原来一些由高能核物理研究的领域现在也都归到核物理研究范围中来了,核天体物理学蓬勃发展,放射性束加速器技术正在受到极大重视。本文所介绍的内容,以传统核物理为主,但也涉及一些新的和特别有意义的方面。

一、用重离子核反应研究核结构

1. 高自旋态的超形变

这是当前核结构研究中的最大热点。超形变带的发现是英国 Daresbury 的 Peter Twin 在 1986 年的 Harrogate 会议上宣布的。这几年来有关超形变的研究有了很好的发展。

首先是又发现了一批超形变核,并测出了一些核的四极矩。发现的新超形变核集中在三个区域。第一个是 $A=150$ 区域,在这个区域, ^{152}Dy 是 Twin 发现的第一个超形变核,见图 1。接着在这个区域里先后共发现了九个超形变核,它们的椭球轴之比是 2:1:1; 第二个是 $A=130$ 区域,已发现了八个超形变核,它们的

椭球轴之比是 3:2:2; 后来在 $A=190$ 区域,人们又发现了八个超形变核,它们的椭球轴之比是 1.6:1:1。当初,确认存在超形变带的证据是观察到能级间距很小,说明它们有大的动力学转动惯量 $J(2)$ 。现在,好多实验利用多普勒位移法测量了这些核的能级寿命,发现这些核的能级寿命确实都非常低,测出了它们有大的四极矩。例如,在 $A=150$ 区, $Q_0 \sim 17-19 \text{ ebar}$, 这与超形变形状预言的数值很一致。

其次是较好地研究了超形变核粒子的组态,从转动惯量出发,对超形变的粒子态的组态确认。大致的结论是:高 N 壳的少数核子起着重要作用。对 Gd, Tb 和 Dy 这三个核的质子的组态分别为二个、三个和四个 $N=6$ 的质子; 对 neutron 数 $n=86$, 是二个 $N=7$ 的中子,对 $n=87$, 可能是三个 $N=7$ 的中子。

第三是对超形变带的布居有了较仔细的研究。在 $A=150$ 附近,所有超形变带的相对强度数据都非常相似,它们在最高自旋处的 4—5 个跃迁里有一个快的上升,跟随着一个近似常值的强度分布,然后是带的退激发的一个快下降。这种布居的特性与通常的形变转子的 Yrast 态的情况有明显的差异。另外,实验上还发现,当入射粒子能量增高时,一般增加了平均的入射道自旋,但是对于 ^{152}Dy , 超形变带的布居并不改变,即使最大角动量增加了 $10\hbar$, 还是一样。

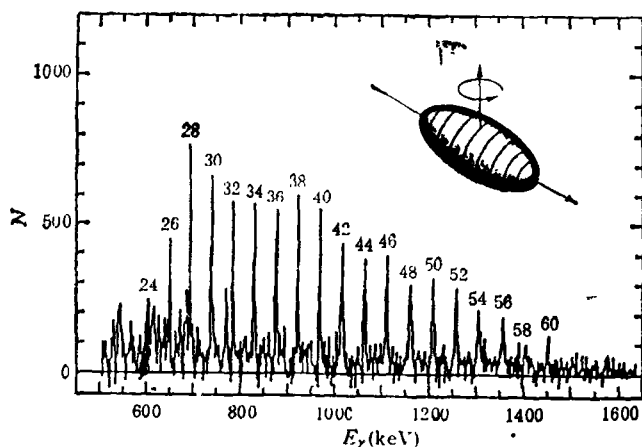


图 1 当高速旋转的超形变核 ^{152}Dy 变慢下来时发射的 γ 射线的谱 (在这种体系里, γ 射线的能量正比于转动核的自旋,因而才产生了这样有规则的图形,每一步自旋下降二个单位;从二个峰间的距离算得椭球形的轴长比为 2:1;图中 N 为计数)

看来角动量究竟能记录到多少值,并不决定于什么核,而主要决定于测量仪器的水平。

到目前为止,所找到的超形变核,它们的长短轴之比多数是接近于2:1,这种超形变核叫做“Superdeformation”。下一步的任务是找长短轴之比为3:1的形变核,叫做“Hyperdeformation”。这种带的布居会更弱,因此必须提高实验设备的探测效率。相应的计划已经提出。美国已决定做一个 γ -球,由110个锗酸铋-超纯锗反康谱仪组成,立体角为 4π 的50%,同时用480个小的BGO晶体构成了多重性滤波器和其它信息源。此设备拟投资二千万美金,三年完成。欧洲也打算做一个Euroball。这些设备的奋斗目标是使五重符合计数效率能相当于现在的三重符合计数的效率。

2. 用冷聚变合成超重核

从历史上看,大型重离子加速器建造的最初动力来自制造超重元素。近年来的一个主要方面是用冷聚变来造超重核。通过研究,人们已经认识到冷聚变方法成功的两个要素:一个是两核子打在一起时形成的复合核体系的激发能很低;二是 ^{208}Pb 作为一个集团能在两个核碰撞过程中钻得很深。即在很长的路程里仍然保持它的稳定性。到目前为止,GSI的Peter Armbruster等人已找到很多 Z 高到109的新核,如图2所示。共看到 $Z=107$ 的38个链事例, $Z=108$ 的四个以及 $Z=109$ 的三个链事例。他们曾试图制造 $Z=110$ 元素,但是没有成功。

3. 其他

在新核素方面,已找到了双幻数核 ^{100}Zr 。看到了放射 ^{24}Ne 和 ^{28}Mg 的奇异放射性。测量到了 ^{11}Li , ^{11}Be 和 ^{17}B 核有大的半径。另外,在巨共振和分子共振等方面都有新的进展。

二、重离子核反应

1. 垒下融合反应

这是近些年来在低能核反应研究中的一个热点。

前几年,在融合反应中,发现,能量在库仑

物理

位垒以下或附近时。融合反应截面远比用单维势垒穿透因子计算出来的要大,甚至大几个数量级。这就是所谓的垒下融合反常现象。人们已经认识到这是由于两核碰撞过程中有种种别的自由度被包括进去的结果。例如,核的激发使得有效势垒下降,从而使穿透增加,于是截面就增高了。近年来,人们又研究了一些更细致的问题。

(1) 融合发生在哪里?

过去在较高入射能量时,人们已经总结出来,当两核相碰撞时,两核间的距离 r 满足 $r < r_F(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})$, $r_F \sim 1\text{fm}$ 时才可引起融合。现在认为,即使当两核接近到 $r \sim r_F(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})$,而 $r_F = 1.4-1.5\text{fm}$ 时,就发生中子流动,就可以对融合有所贡献。原来认为集体激发对垒下融合反应的贡献很大,这是对的。现在认为, σ_{fus} 在小于10mb范围它起主要作用,而在 $10\text{mb} < \sigma_{fus} < 100\text{mb}$ 范围里,中子结合(neutron binding)是主要贡献,即对转移的作用强调得更多了。

(2) 关于融合的光学模型

融合反应的截面是各个角动量贡献之和,即

$$\sigma_{fus} = \sum_l \sigma_l = (\pi \lambda^2) \sum_l (2l+1) T_l(E).$$

现在往往很多理论都能拟合融合反应的激发函数,实际上角动量分布才是对理论的一个更加严峻的检验。对角动量分布,现有的理论还没能很好地回答实验,见图3(a)。有些人认为,在计算时如采用随能量变化的光学势阱,就可以较好地描述角动量的分布。R. Satchler提出一个新概念,把光学势的虚阱分成为两部分:

$$W(E) = W_F(E) + W_D(E),$$

$W_D(E)$ 表示直接反应吸收部分, $W_F(E)$ 表示距离在库仑位垒以内引起的融合的吸收。按过去的概念,融合只发生在1fm以内,如果再认为直接反应部分很小,实际就过渡到一维势垒穿透模型。如果把 $W_F(E)$ 扩展到较大的半径区域,如 $r_F = 1.4\text{fm}$,角动量分布的计算结果就上移很多,与实验一致,见图3(b)。实际上

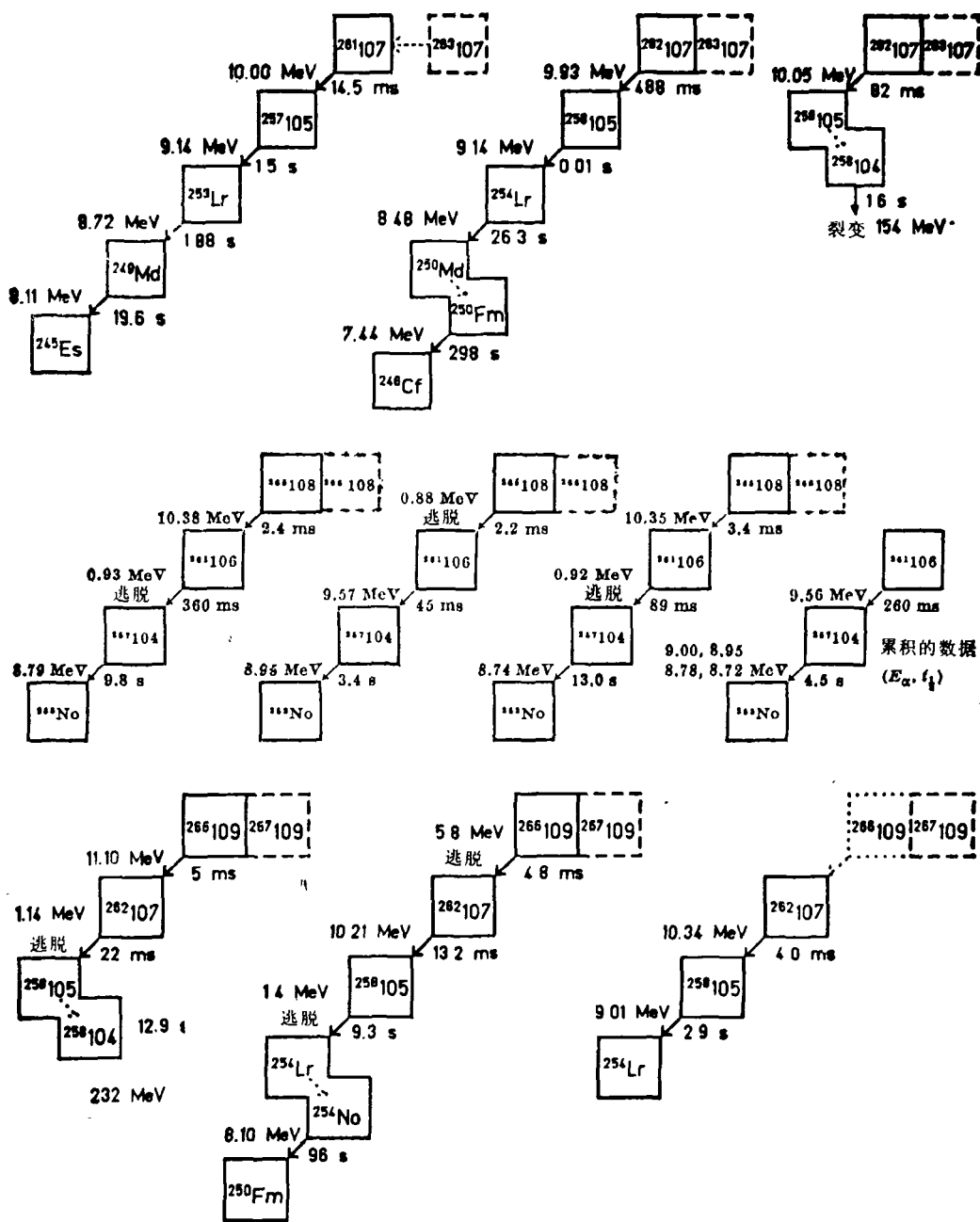


图2 标志着发现107~109号元素的一些衰变链

认为虚势阱需增加一个表面分量，这个分量在 $r_F \sim 1.4\text{fm}$ 时首先引起中子流动，然后引起熔合。

(3) $A = 100$ 附近的熔合反应

在 $A = 100$ 附近，现有的理论远不能很好地解释熔合反应实验。例如， $^{100}\text{Mo} + ^{100}\text{Mo}$ ，

$^{100}\text{Mo} + ^{110}\text{Pd}$ 和 $^{110}\text{Pd} + ^{110}\text{Pd}$ 三个体系的激发函数，其形状和数值之间在阈附近有极大差异，但质量间的差异仅为10%。看来是由于溶合位垒的形状有急剧变化的缘故。对于 $^{58}\text{Ni} + ^{100}\text{Mo}$ 的熔合反应激发函数，现在的理论也不能很好给以解释，必须把形变参数 β 不适当地增

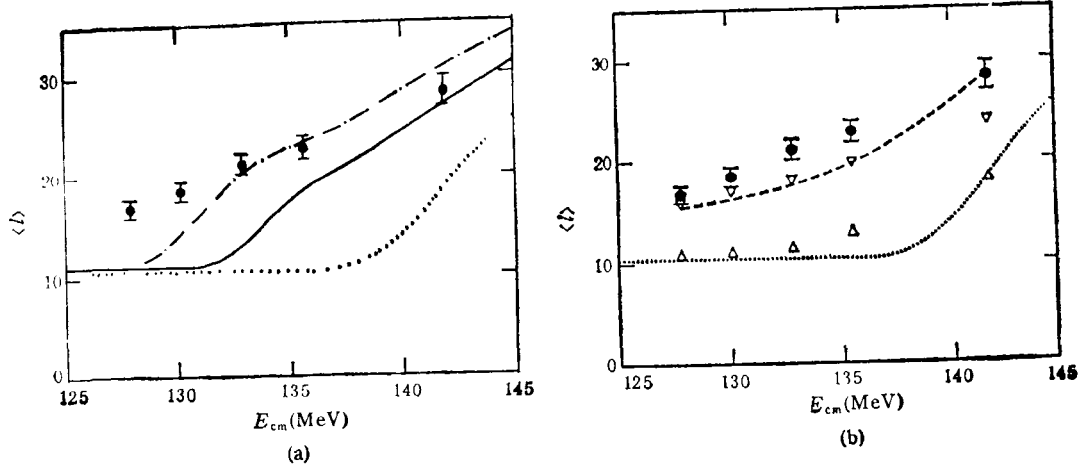


图3 $^{58}\text{Ni} + ^{100}\text{Mo}$ 融合的平均角动量
 (a) 实线和点线分别表示有和没有耦合的情况, 虚线是任意地把耦合强度增加 50% 的结果;
 (b) 在光学模型的计算中, 点线是用 $r_F = 1.0\text{fm}$, 虚线用 $r_F = 1.44\text{fm}$

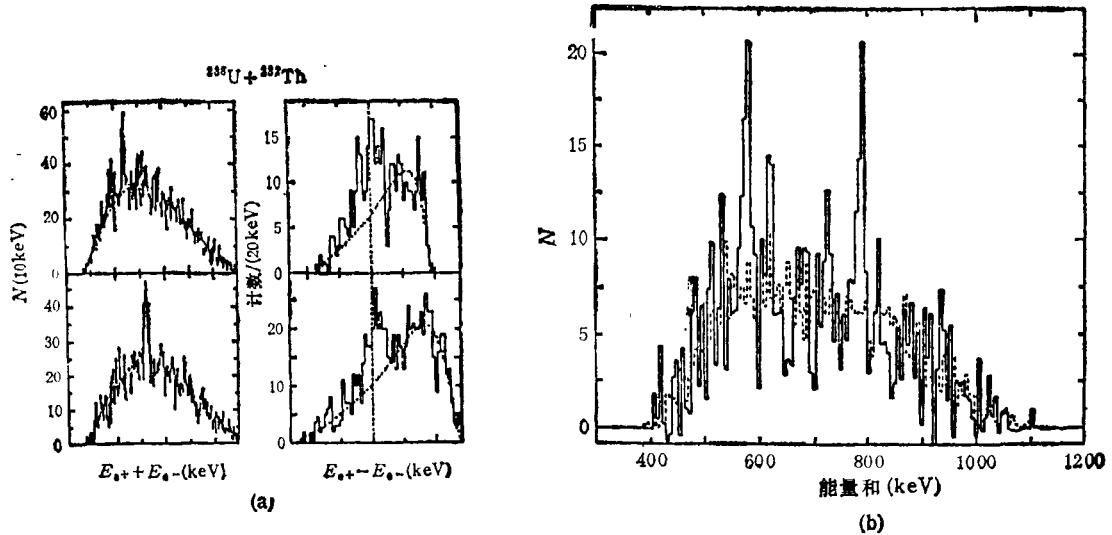


图4 在 GSI 的重核碰撞中看到的符合的正电子-电子的窄的谱线
 (左边是 EPOS 协作组对 U + Th 的实验, 右边是 ORANGE 协作组对 $^{208}\text{Pb} + ^{238}\text{U}$ 的实验; 图中 N 为计数)

加 50% 才能拟合实验, 见图 3(a). 另外实验测得的转移反应的截面又很小, 很难用转移的耦合去解释, 因此还是一个难点.

2. 正电子峰

两个低能重离子相碰时产生非常强的电场, 足够把真空极化推向极限, 导致电子-正电子对的产生. 过去十年里, GSI 对此现象进行了详细的研究, 除了连续的正电子谱外, 还看到了意外的窄的正电子谱线. 这些窄的正电子线是与电子相符合且向相反方向发射的. 人们曾

认为这可能是一种低质量的中性粒子. 当核的强库仑场消失后, 其在自由空间继续存在有足够长的寿命, 然后衰变. 然而, 如同从图 4 所见到的, 这种线不止一条, 于是排除了用一种简单粒子来解释这种现象的可能性. 虽然至今已有两家独立的实验组报道了这种符合的数据, 但这些结果仍是令人迷惑而需要进一步研究的.

3. 阈下的 π 介子、K 介子和反质子产生

阈下 π 介子生成是个老问题, 即两核子相碰时, 需要 300MeV 能量才能产生 π 介子. 但

是,实际上在入射能为 20MeV/核子时,就已经产生了 π 介子。这显然不是粒子-粒子作用的结果,而是一种集体效应。这一点人们早就知道了,但至今仍没有能给以圆满的解释。

更使人们感兴趣的新现象是 K 介子的阈下产生和反质子的阈下产生。这些问题现在都没有得到解释。图 5 给出 K^- 和 \bar{p} 的产生,上图给出的是 $^{28}\text{Si} + ^{28}\text{Si}$ 和 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 的结果。按理, $^{28}\text{Si} + ^{28}\text{Si}$ 产生的 K^- 的截面值应是 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 产生的 5.4 倍,即 $(28/12)^2$,而实际观察到的是大 20—30 倍。图 5 给出的是 $^{28}\text{Si} + ^{28}\text{Si}$ 与 $\text{P} + ^{63}\text{Cu}$ 产生的反质子截面的比较,虚线是从 $\text{P} + ^{63}\text{Cu}$ 截面,用已有理论算出来的 $^{28}\text{Si} + ^{28}\text{Si}$ 的产额,比实际小几个量级。

4. 其它

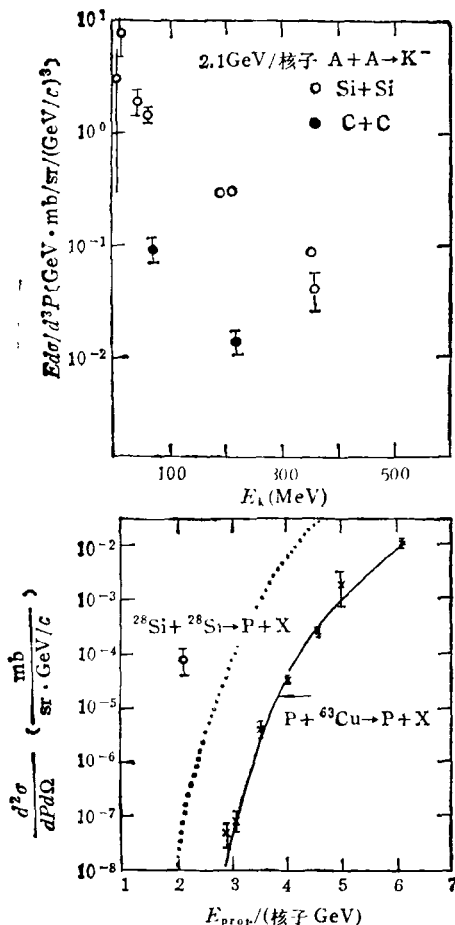


图5 产生 K^- 和 \bar{p} 的实验结果
(在 \bar{p} 产生方面,点线表示从 $\text{p} + \text{Cu}$ 的数据算得的动量分布来算 $\text{Si} + \text{Si}$ 情况应有的产额)

重离子光学势方面近来看到了阈反常现象,观察到了较低能量下的深部非弹性散射。另外,在转移反应中的 Josephson 效应和高自旋态的激发,不完全熔合反应,重离子核反应中的 Δ 共振,和高能量下的核阻止本领和集体运动等方面的研究,也有不少新进展。

三、超相对论重离子碰撞

超相对论重离子碰撞的中心问题是两核碰撞后产生夸克-胶子等离子体(以下简称 QGP),即用压缩、挤压的办法在真空中从原子核中挤出这种东西来。这种东西的核密度相当于普通核子密度的 3—15 倍。如何实现 QGP 呢?无非就是加压或挤压,用 π 介子填充所有的自由空间。实验主要是在两家进行的:用 CERN 的 200GeV/核子的 ^{16}O 和 ^{32}S 束,以及 Brookhaven 的 14.5GeV/核子的 ^{16}O 和 ^{28}Si 束。他们认为可以在能量(温度)很高、密度又很高的区域产生 QGP。但是, A. Faessler 担心,如果在很高温度和密度的时间太短,就可能产生不了。

那么怎么判断是否产生了 QGP 呢?或者说产生 QGP 的痕迹是什么?现在有两类最引人注目的研究课题。

一类叫 J/ψ 抑制 (J/ψ suppression),是 CERN 的研究者做的实验。 J/ψ 粒子有三种衰变方式,即变成两个电子 e^+ 和 e^- 、两个 μ 子 μ^+ 和 μ^- 或者衰变成强子。在高能碰撞中,同样可由强子产生 J/ψ 粒子。如果在高能碰撞中真的产生了 QGP,那么就会阻止产生 J/ψ 粒子,或者说使 J/ψ 产生机率下降,这就叫 J/ψ 抑制。道理是这样的, J/ψ 粒子可看作是由 c 和 \bar{c} 粒子组成的,自由的 $c\bar{c}$ 对有束缚态,当有 QGP 时,就有 Debye 屏蔽效应,使 1S 态能量上升。当屏蔽到一定程度时就不再出现 $c\bar{c}$ 束缚态了,也就组成不了 J/ψ 粒子。

实验是用 200GeV/核子的 ^{32}S 打 ^{238}U 。形成的体系可能发射 K 介子和 π 介子,也可能发射 J/ψ 粒子。而 J/ψ 粒子可以衰变成 μ^+ 和 μ^- 。以测量关联的 μ^+ 和 μ^- 来找 J/ψ 粒子,

把那些不关联的 μ^+ 和 μ^- 作为本底。对于周边碰撞,测得的 J/ψ 产生与本底之比为 9.3,对于中心碰撞,为 5.9。因此,认为在中心碰撞中见到了 J/ψ 抑制,即有产生 QGP 的迹象。但更多人认为,目前 J/ψ 抑制的实验证据尚属含糊不清的。

第二类实验是做 K^+/π^+ 比例,是 Brookhaven 的研究者进行的实验。他们认为,若产生了 QGP,则这个比例要得到加强,因为从与上面相类似的讨论中可以看到,当有 QGP 存在时, K^+ 产生加强,而 π^+ , K^- 和 π^- 的产生减弱或维持不变,那么 K^+/π^+ 应当加强,而 K^-/π^- 应大致不变。Brookhaven 的实验是用 14.5GeV/核子的 ^{28}Si 束打 Au 靶,观测相对于质子打质子的 K^+/π^+ 比例的变化。得到的结果是, ^{28}Si 打 Au 的 K^+/π^+ 比例由 0.07 上升到 0.20,而 K^-/π^- 的比例与质子打质子时一样,都是 0.04,因此认为产生了 QGP。但是有个问题,由于 K^+ 在核子里的平均自由程很长,约 6fm,而 π^+ 和 K^- 等平均自由程很短,小于 1fm,因此看到的 K^+/π^+ 比例增大,可能并不是真正的加强,而是由于产生的 π^+ 被阻止了。只不过是自由程的差异引起的假象,这个判据也就不充分了。

美国现在正在制造相对论重离子对撞机,主要目的就是研究 QGP 是否存在。

四、一些其它问题

1. 核子在核内是否肿胀

从分析 $^{40}\text{Ca}(e, e')^{40}\text{Ca}^*$ 实验看,有人认为核子肿胀了,其半径增加 15%;也有人认为增加 4%。但是,实际上这可能是一种核结构效应导致了以上的结果。因此,肿胀现象到现在为止还没有得到确证。

2. 质子的自旋在哪里?

现在有一套理论计算,认为若质子是由夸克组成的,则夸克的自旋就变成质子的自旋。分析实验和计算结果,得到由夸克来的自旋是 0.114 ± 0.09 ,大大地小于质子的自旋 1/2。究竟是实验问题还是理论问题,尚不清楚。目前关于质子自旋从哪里来,有三种提法,即内部运

动的轨道角动量,从胶子来,和从夸克海来。

3. 其它

一个核子由三个夸克组成。当两个核子间距为几个 fm 时,核子-核子相互作用的图像很正确。但是,当两个核子的间距为 0.5fm 时,一般处理是把六个夸克反对称化。现在有人提出的问题是,此时无法定义核子的中心。氘是由两个核子组成的,它从来是研究核子-核子相互作用的重要对象。从对它的波函数研究可以看到,既要坚持有正确的束缚,又要在原点保持“有限”的特性。这方面的问题现在还没有彻底解决。在下一步研究中,二级张量力是关键。

1. 最近几年来核物理研究方面有一个很瞩目的情况,即核天体物理学研究得到了很大发展,用核物理学的观点和方法去研究宇宙的形成、演变、星系的演变和元素的合成。在 1989 年的国际核物理学大会上二个 Keynotes 报告中的一个,就是 G. E. Brown 作的《核物理和宇宙》。目前国际上掀起一个热潮,要建立放射性束的加速器,其目的之一就是用于测量放射性核素的反应截面。这是了解宇宙发展必不可少的基础数据。当然放射性束加速的意义远不止于此。它可以大大地扩展传统核物理研究的领域。完全可以预言,有了放射性束以后,必将把核结构和核反应研究推向一个新高潮和发现很多新现象。另外,它对于核技术应用也是非常有意义的。

中国原子能科学研究院有的同志已提出了一个新方案,在他们的 HI-13 串列加速器的前面加建一个 50—100MeV 的强流质子回旋加速器。用质子束打靶,产生放射性核,然后通过同位素分离和离子源引入串列加速器加速。如果这个方案得到批准,并且这一加速器得以建成,那么一定会对我国的核物理研究发展起到极好的推动作用。

2. 美国在去年由核科学顾问委员会为能源部和核科学基金会撰写了一个长期计划——《90 年代的核科学》。里面提到九个前沿课题:(1) 核内的核子;(2) 核物质中的强子;(3)

(下转第 406 页)