

核化学的进展

——从核化学看高能物理*

朱永毅(美国布鲁克海文国立实验室)

一、核化学是一门联结化学和高能物理学的学科

化学是一门研究物质的结构及其变化的学科,高能物理学也是一门研究物质的结构及其变化的学科.两者的区别只是所涉及的能量不同,化学研究中遇到的能量很低,大约电子伏量级,而高能物理研究中的能量可高达 10^9 电子伏(GeV)、甚至 10^{12} 电子伏(TeV)量级.核化学的研究目的与化学、高能物理学相同,亦是研究物质的结构及其变化的学科.核化学的具体任务是将化学和高能物理学联结起来,做这种搭桥工作的人,必须通晓化学和高能物理两方面的知识,这是我们核化学家的重任.

在讨论核化学的进展之前,先让我们考察一下核化学家涉及的能量范围.对化学家来说,常用温度和热能等概念;对高能物理学家,则常用能量这一概念.已知

1°K $\sim 10^{-4}$ 电子伏
1 千卡/克分子 ~ 0.04 电子伏
钠原子中价电子的结合能 ~ 1 电子伏
原子核中核子结合能 $\sim 10^7$ 电子伏
1984 年发现的 Z 和 $W^\pm$ 的质量 $\sim 10^{11}$ 电子伏
美国酝酿建造的超导超高能对撞机 $\sim 4 \times 10^{13}$ 电子伏,
(SSC) 的能量

因此,核化学家涉及的能量范围极宽,约跨十几个量级.

考察科学发展的历史,晓得科学的发展是和可用的能量紧密相关的.中世纪的炼金术师企图将贱金属炼成金,但他们当时可用的方法只是加热,能量太低,不足以引起核反应.在核化学发展史中,值得重点提一下的是 1920 年 Aston 发现了氦的两个同位素,从此打开了一个新的领域,我们面临的就不仅仅是几十个元素,而是比元素数目多得多的核素.另一个杰出的成就是 Hahn 和 Strassman 在 1938 年发现了核裂变,这是他们利用精细的放射分离方法实现的.

到本世纪三十年代,可获得几个 MeV 的能量,从而观测到了新的核现象.当可用的能量更高时,就可更深入地了解物质的结构.

1963 年, Gell-Mann 和 Zweig 提出了夸克模型,这一模型可以解释所有的强子,并如同 Mendeleev 在

编排元素周期表时,根据元素的化学性质的周期性,预言了 T_c 和 P_m 的存在一样,他们也预言了 Q^- 的存在.果然,第二年便发现了 Q^- . 随后,电子-质子和质子-质子散射实验展示了夸克存在的可能性.

随着高能加速器的建造,可用的能量越来越高,核化学的研究也就随之而发展.

二、高能核化学的家谱

化学家是从元素周期表入门的,将已发现的元素,根据它们物理的和化学的性质,编排出了一个元素家谱,并用演绎法预言了未知元素的存在.那末,目前基本粒子的情况如何呢? 现在也有了一个与元素周期表相似的标准模型(见表 1).

表 1 描述基本粒子的标准模型

力	规范粒子	相对强度
强相互作用	8 种胶子	1
电磁相互作用	光子	10^{-2}
弱相互作用	Z 和 $W^\pm$	10^{-7}
引力	引力子	10^{-45}

组成	夸克		轻子	
	U	d	e	ν_e
	c	s	μ	ν_μ
	t	b	τ	ν_τ

由表 1 可见,根据标准模型,我们有八种胶子、一种光子、一种 Z 和两种 W 粒子、一种引力子、六种夸克、六种反夸克、六种轻子、六种反轻子等.

迄今为止,核化学家要打交道的有 109 种元素、2000 多种核素、以及上述三十余种基本粒子,这就是我们核化学的家谱.

三、核化学家要了解的高能物理的两个参数

第一个参数是距离.距离和能量有关,能量越高,

* 本文由柴之芳根据朱永毅教授 9 月 6 日在中国科学院高能物理所核化学室的演讲整理而成.未经讲演者审阅,若有错误由整理者负责.

表2 距离与能量的对应关系

源(尺寸)	能量 (质心系)	波长 $\lambda = \frac{hc}{E}$
X射线管(1英尺长)	2keV	$6 \times 10^{-8} \text{cm}$
AGS 加速器(圆周长1公里)	4GeV*	$3 \times 10^{-14} \text{cm}$
CERN 的 $P\bar{P}$ 对撞机(圆周长5公里)	540GeV	$2 \times 10^{-16} \text{cm}$
SSC (圆周长约80—100公里)	40TeV	$3 \times 10^{-18} \text{cm}$

* AGS 可加速质子能量至 33GeV, 这里指质子打固定质子靶时的质心系能量。

距离越小,即意味着探测精度越高。表2列出了部分有代表性的能量与距离的对应关系。

由表2可见,不同的能量好比外科医生用的不同尺寸的手术刀,要做微血管手术,必须用极为精细的器具;要研究物质更深层次的结构,必须用更高的能量。根据这一推理,增加能量应当有可能找到夸克,但是实际上却没有发现新的现象。能量增高时产生的碎裂产物和反应截面等都和能量较低时的相差不多,似乎有一种能量饱和效应。对 $E_B \leq 2A \text{ GeV}$ 时核-核碰撞产生的束流碎裂和靶碎裂,存在着下面两种现象。

(1) 极限碎裂 (Limiting fragmentation)

即 $B + T \longrightarrow F + X$

入射粒子 靶核 碎裂产物 出射粒子

这一反应的单粒子单举截面和反应谱变得与能量无关。

(2) 因子化 (Factorization)

即 $B + T \longrightarrow F + X$

反应的 $\sigma_{BT}^F = \sigma_B^F \cdot r_T$, 不产生新的变化。因此单考虑能量这一参数还不够,尚需考虑另一个参数。

第二个参数是密度。

已知核基态的能量密度 ϵ_0 为

$$\epsilon_0 \cong \frac{A}{\frac{4\pi R^3}{3}} = 0.17 \text{GeV}/\text{fm}^3 \cdot c^2$$

式中, A 为核质量数, R 为核半径。

核子的密度 ϵ_0^B 为

$$\epsilon_0^B \cong \left(\frac{4\pi}{3} (0.8)^3 \right)^{-1} = 0.47 \text{GeV}/\text{fm}^3 \cdot c^2$$

那末,能量密度应高达多少,才有可能观察到夸克呢?

四、如何释放夸克?

已有很多实验说明夸克应当存在,但迄今为止,还没有哪一个实验观测到了夸克。夸克似乎被强烈地束缚在“口袋”里。为了将禁闭在强子口袋中的夸克释放出来,必须使不同核子的夸克波函数互相重叠。有人认为,必须将“口袋”的半径压缩到 0.8fm , 或者甚至小到 0.6fm 。这样,有可能实现一种所谓的“由夸克和

胶子组成的等离子态”。为此,所需的能量密度 ϵ 应为 $\epsilon/\epsilon_0 \geq 3$ 到 7

根据标准动力学方程

$$\epsilon/\epsilon_0 \cong \left[2 + 2 \frac{E}{A \cdot m_N} \right]^{1/2}$$

式中, E/A 是每个核子的实验室能量, m_N 是核子的静止质量,等于 0.935GeV 。由该式可计算,当束流能量达 15 和 $60 \text{GeV}/\text{核子}$ 时,它们的 ϵ/ϵ_0 值分别为 5.9 和 11。这样的能量密度是为了形成夸克-胶子的等离子体所期望的。

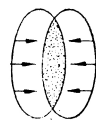
然而,用能量密度符合上述要求的质子轰击靶核,却没有产生预期的结果。人们不得不转向利用重离子。

为什么重离子比质子有利呢?这与时空体积有关。时空体积与 R^4 成正比,约为 $A^{4/3} \text{fm}^4$ 。对于典型的强子,约为 1fm^4 。因此,用电子、介子或质子等基本粒子束流轰击时,只能将能量和动量沉积在很小的体积范围内,也就是说,这些基本粒子适用于研究基态核对局部分布的响应,它们无法使整个核受激。

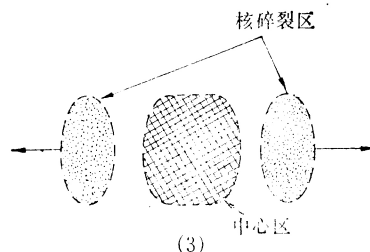
重离子束则不然。它可以使核态在相当大的时空体积范围内发生巨大的变化,并可用来检验重子和能量密度的显著变化。这是因为重离子可沉积的能量比



(1)



(2)



(3)

图1 在碰撞参数为零时,高能核碰撞中核受阻和核穿透之示意图

(1) 碰撞前的初态 (2) 能量恰好使核受阻,沉积的能量密度高到产生夸克-胶子等离子体 (3) 能量更高时,核与核相互之间成为可穿透的。

基本粒子的高得多。当能量适中时,在质心系中碰撞核将被完全受阻而停止。如果能量更高,则会发生某种“穿透”现象(见图1)。

在用这种能量合适的重离子核碰撞后的 10^{-23} 秒,有可能产生夸克-胶子等离子体(见图2)。

那末,夸克释放相跃迁的基本特征是什么呢?

1. 温度效应。随着能量增加,温度迅速增加,增加程度取决于单举谱斜率 E_0 。此外,多重性和横向中性能流也可提供这方面的信息。

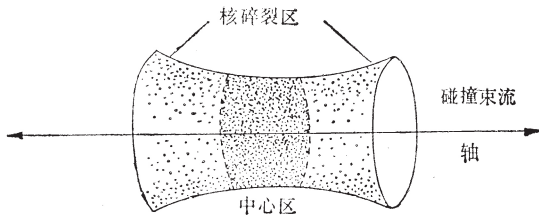


图2 夸克-胶子等离子体形成示意图

在重离子对头撞后 10^{-23} 秒,可观察到一个由夸克-胶子的等离子体组成的不断膨胀的“火管”(firetube),其管轴与入射核的方向相同。碰撞点附近的中心区温度极高,该区内的夸克和反夸克的数目大体相等,大体上为受激的真空状态。在中心区两旁为碎裂区,该区内形成不同的夸克-胶子等离子体,其净重子密度比正常值高1个量级

2. 熵增加效应。根据质量数为2、3或4的碎裂核的生成截面,可提供熵增加的量度。

3. K 、 ϕ 等奇异粒子的数目增加。

4. 反重子数目将增加。

五、核化学与核物理合作的高能重离子对撞实验

上面提到,用高能重离子打靶核,有可能把禁闭在强子口袋里的夸克释放出来。目前,全世界计划进行这类实验的有两个实验室。一个是西欧核子研究

中心 (CERN), 另一个是美国布鲁克海文国家实验室 (BNL)。下面以 BNL 即将于今年十月进行的 AGS E802 实验为例,来说明核化学家如何与核物理学家合作,以揭开夸克的奥秘。

图3示出了该实验的装置情况。实验所用的主要测量手段有:

1. 单臂磁谱仪。用于测量核碰撞时产生的粒子,并用来记录表征碰撞参数、沉积能量、或者终态中某种粒子组态的各种事件。

2. 用于测定动量的 T_1 至 T_4 4个径迹室。

3. 用飞行时间测量法鉴别 $P^\pm$ 、 $\pi^\pm$ 、 $K^\pm$ 。其中使用的仪器有: (1) 由闪烁体组成的飞行时间墙,距离碰撞点7.5米,时间分辨率为100 PS。 (2) 气凝硅胶契伦柯夫计数器。 π 阈能为 $0.8 \text{ GeV}/c$, 分成100段。 (3) 气体契伦柯夫计数器。充有4个大气压的氟利昂气体, π 阈能为 $2.0 \text{ GeV}/c$ 。

用这两种契伦柯夫计数器,可鉴别能量达 $4 \text{ GeV}/c$ 的 $P^\pm$ 、 $\pi^\pm$ 和 $K^\pm$,可探测丰度约比 π 介子小20倍的 K 粒子。

4. 契伦柯夫复合探测器。离碰撞点10米,立体角小,在 10° 到 0° 之间为1毫球面度。可鉴别动量从 $4 \text{ GeV}/c$ 到 $20 \text{ GeV}/c$ 的粒子。

5. 事例选择在线触发器。由四部分组成:

(1) 总多重性阵列 (Total Multiplicity array)。用500个截面为 1×1 厘米²的正比计数器围着碰撞点排列,可准确地在线测定多达几百个带电粒子的终态。

(2) 铅玻璃墙。由340块铅玻璃组成,用于测定在 γ 质心系 $= 0$ 附近比较大的立体角范围内的总的中性能量。

(3) 束流计数器。由小的闪烁体组成,用来确定电荷 Z^2 和束流的几何形状。它放在靶子后面,因此可用作相互作用触发器 ($Z_{\text{终态}} < Z_{\text{束流}}$),或中心触发器 ($Z_{\text{终态}} \approx 0$)。

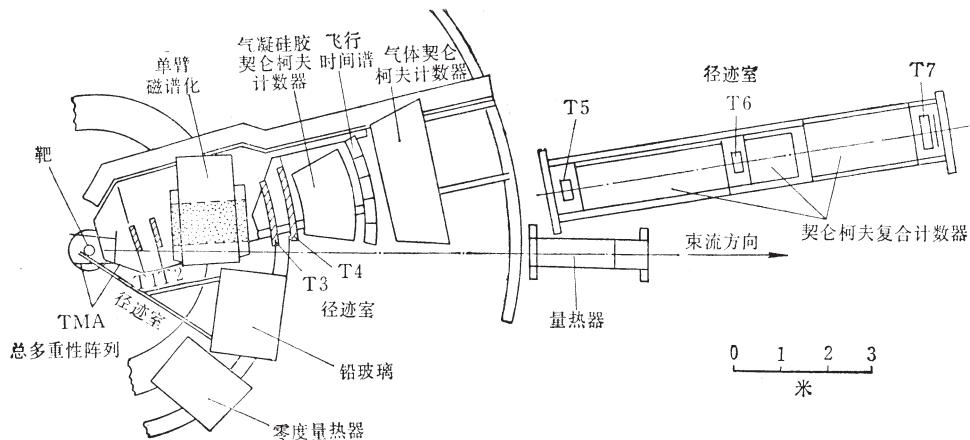


图3 AGS E802 实验装置示意图(具体说明见正文)

(4) 零度量热器，是一种小角度 ($< \pm 2^\circ$) 的全吸收取样量热器，用来测定非中心碰撞后所有碎片的总动能。

这一实验的基本示意图是揭示重离子对撞以释放夸克所产生的粒子的特征，其中包括共振产生、由源尺寸引起的次级干扰效应。在这一实验中，仔细控制与碰撞参数和能量沉积有关的所有碰撞性质，并且有可能选择稀罕事例中极端的热力学条件。

在这一庞大的实验中，核化学家与核物理学家密切合作，设法揭示夸克的奥秘，其结果如何，尚有待分晓。