

现代物理知识

(增刊)

现代物理知识与教学现代化



《现代物理知识》编辑部 编



现代物理知识

1996 年 增 刊

主 编: 郁忠强

副主编: 厉光烈 李国栋 吴思诚 江向东

编 委: (以姓氏笔划为序)

王 龙 卞毓麟 叶云秀 叶春堂
厉光烈 朱永生 江向东 李国栋
吴思诚 汪雪瑛 郁忠强 张肇西
刘竞青 崔砚生 谢治成 蒋树声
程鹏翥 谭树杰

编辑部主任: 江向东

编 辑: 濮焕顺 黄艳华 朱卫东

美 编: 李博文

* *

封面 山东大学研制的部分晶体

..... 张晓阳 / 供稿

封二 山东大学晶体材料实验室简介

..... 张晓阳 / 供稿

庆祝高能物理创刊 20 周年更名 7 周年

..... 张树梓 / 篆刻

封三 航空母舰 侯建军 / 供稿

封底 北京西客站 李博文 / 摄

卷 首 语

郁 忠 强

《现代物理知识》是一份中、高级科学普及杂志,它主要介绍现代物理知识,物理学的最新成就和研究动态,有关的新技术及其应用,以及科学史和科学家。读者对象为科学家、科技工作者、科学管理干部、大中学校教师、研究生和其他物理学爱好者。

为了促进全国高等院校理工科物理教学现代化的工作,本刊曾出版了《现代物理知识》1994 年增刊,起名为《现代物理知识与教学现代化》,得到了广泛而热烈的响应,也得到了有关部门和专家们的充分肯定。

普及现代物理知识和物理教学现代化是一项长期而艰巨的工作,需要多方面的努力。本刊希望能为这一具有深远意义的活动做出应有的贡献。本期《现代物理知识》1996 年增刊主要包括两部分,一部分文章是从《现代物理知识》1989—1994 年的文章中选择出来的,具有一定的参考价值,另一部分文章来自科技界和物理教学第一线工作的学者和教师的来稿。我们希望,这本 1996 年增刊能为理工科物理教学现代化贡献一份力量,也为广大的物理爱好者提供一本有价值的参考资料。

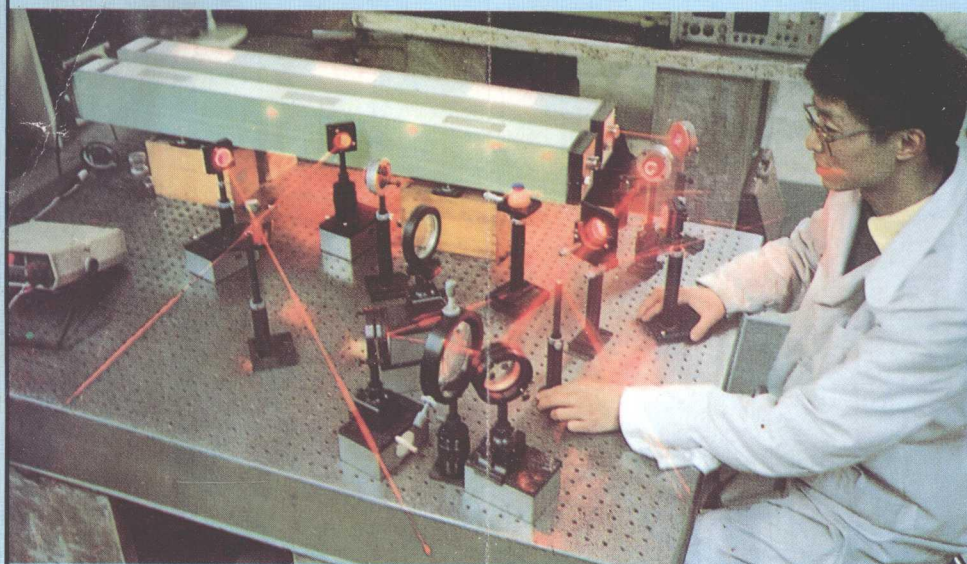
主 办 中国科学院高能物理研究所
编 辑 《现代物理知识》编辑部
100039 北京 918 信箱
出 版 科 学 出 版 社
北京东黄城根北街 16 号
邮政编码 100717

印刷装订 中国科学院印刷厂
发行订购处 中国科学院高能物理研究所
《现代物理知识》编辑部
北京 918 信箱 邮政编码 100039

广告许可证

增刊(1996)

— 山东大学晶体材料实验室简介 —



山东大学晶体材料实验室，主要研究晶体生长的基本过程和晶体的物理性能，以及新功能晶体材料的探索与薄膜晶体材料的制备。已经研制成多种晶体材料，其中包括DKDP、LAP、KTP、ATGsAs、NYAB、KNSBN。封面照片是该实验室研制的部分晶体，本页照片为该实验室的研究人员正在进行光学测试。

张晓阳/供稿



庆祝高能物理创刊
20周年更名7周年



张树梓/篆刻

航空母舰

侯建军 / 供稿

→ 尼米兹级航空母舰（美国）



↓ 无敌级航空母舰（英国）



↑ 库兹涅佐夫级航空母舰（俄罗斯）



← 克莱蒙梭级航空母舰（法国）

目 录

卷首语	郁忠强 (i)
物理知识	
取之不尽用之不竭的理想能源——激光惯性约束核聚变	王淦昌 (1)
高能物理学发展的回顾与展望	朱洪元 (4)
粒子物理学和核物理学的相互交叉	黄 涛 (9)
同步辐射光源史话	沈鼎昌 (12)
宇宙线研究的过去、现在和将来	霍安祥 (15)
世界何处没有磁	李国栋 (18)
激光及其相关学科的发展	王祖康 (20)
中子星——一个巨大的汤姆逊原子	陆 焱 (22)
当代的光物理学与原子分子物理学	叶佩弦 (26)
C ₆₀ 简介	李荫远 (28)
太阳物理研究的新成果	章振大 (31)
黑洞的“解剖学”	卞毓麟 (34)
关于小行星的谈话	卞德培 (38)
大气气象的理论概况	胡 波 (39)
浅谈介观物理学	蒋 平 (42)
固体离子学概述	薛荣坚 (45)
信息光学概论	陈树岭 (47)
对混沌学的基本认识	丁有瑚 (49)
多重分形及其描述	敖力布 (50)
波粒二象性验证实验和结论	陶作花 (51)
漫话中微子	习景元 (52)
声波垂直入射在两种媒质分界面处的反射和透射	陶绪德 (55)
神奇的 K 介子	傅思欣 (56)
潮汐的成因及其对天体所产生的影响	孙克恕 (58)
谈谈辐射	吴康健 许寿兰 (60)
浅谈固体间的滑动摩擦	孙克恕 (61)
夸克与三种基本相互作用	渠基雷 夏洪川 (63)
物理实验中常用的计量名词	欧阳九令 (64)
物理前沿	
高能物理 21 世纪展望	郑志鹏 (69)
为什么要建造各种各样的加速器	郁忠强 (71)
超核	厉光烈 钟嶷生 (73)
浅谈 τ -charm 工厂的物理	吴济民 (76)
Tau-Charm 粒子工厂	马基茂 (80)
相对论重离子碰撞中会产生夸克胶子等离子体吗?	赵维勤 (83)
原子物理的现代实验方法	郭振华 (86)
内耗与固体缺陷研究	葛庭燧 (89)
浅谈非线性光学	谢诒成 (91)
非晶半导体基本理论及目前发展概况	陈光华 (93)
物理科学与脑科学的联姻——脑与精神奥秘的新探索	郭爱克 (96)
人工神经网络简介	张承福 (100)
液晶生物膜模型	欧阳钟灿 (102)
走出地球	黄志洵 (107)
理论生物物理学的几个研究热点	王吉华 张连顺 姜万禄 杨学锋 (111)

重力阱与宇宙航行·····	苏中启 (112)
光速极限被打破了吗——超光速之谜浅谈·····	苏中启 (116)
AlGaInP 半导体发光器件的光谱研究·····	刘明海 (119)
高能核乳胶实验中的事例分类与粒子鉴别·····	段麦英 王春娟 (121)
简析 $SU(3)$ 群在粒子物理学中的应用·····	游阳明 张国庆 (122)
γ 射线的康普顿散射和逆康普顿散射·····	陈有恒 (125)
电子动量空间分布的计算与实验方法·····	陈有恒 (129)
关于夸克物质的几个问题·····	段麦英 (133)
阻尼谐振子·····	王 薇 (134)
相对性原理与对称性破缺·····	赵国求 (137)

科技经纬

STM 在微加工中的应用·····	王大文 白春礼 (141)
高技术领域的一颗明珠——人工晶体·····	陈万春 (147)
物理技术在农业上的应用·····	金仲辉 (149)
红外物理和红外技术·····	王吉有 (152)
夜视技术及其物理基础·····	南秀华 彭宏庆 (154)
全息技术及实用前景分析·····	邱淑荣 (156)
电子发现的效应·····	钟生海 胡必禄 (158)
激光特性及其军事应用·····	王保成 杨恩智 (160)
高功率微波武器及其应用的物理原理·····	黄海清 李维民 (162)
生物磁学及在医学上的应用·····	王幼珍 (163)
磁与人体健康·····	王心芬 (164)
磁水除垢和结石症的防治·····	徐 军 (167)
小议语音自动识别技术·····	鲁俊生 张金美 (168)
C_{60} 衍生物超导特性·····	王保成 (169)
粉末交流电致发光屏使用寿命的延长·····	李晓琳 (172)
电磁感应与电磁炮·····	朱 峰 肖胜利 (173)
遥感技术的物理基础及其应用·····	南秀华 (174)
对离焦法信息贮存的讨论·····	李晓琳 王春娟 (175)

物理教学

从跨世纪人才的培养看基础物理教学的现代化·····	程民治 (176)
关于面向 21 世纪物理实验课程的几点思考·····	谷晋骐 王惠棣 (178)
应把传感技术适当引入工科物理实验·····	贾贵儒 戴允盼 (180)
更新教学内容 改革教学方法·····	左淑华 (181)
物理教学与四个现代化·····	王德云 (183)
在普通物理教学中要重视对学生思维能力的培养·····	南秀华 高君芳 (185)
浅议普通物理教学改革·····	胡国驹 (187)
论物理教学中渗透现代物理知识的优势·····	黄国雄 (189)
物理教学中思维品质的培养·····	胡卫平 (190)
关于加强演示实验教学改革的分析·····	陶绪德 (191)
试论物理教学原则·····	谢 璞 (192)
浅谈普物实验对学生能力的培养·····	张连娣 (195)
工科物理实验教材内容现代化的一点尝试·····	范志新 (196)
提高普通物理教学质量的做法和体会·····	南秀华 (197)
以广阔的视野看待物理实验及其应用·····	邱淑荣 (198)
从现代科技中获得学习动力·····	朱海星 (200)
试论物理教学任务·····	谢 璞 (201)
试论物理教学中思维的基本结构·····	胡卫平 (203)

从高新技术发展看工科物理教学	刘东红 夏思澍 (204)
关于麦克斯韦方程组教学的讨论	薛志宇 (205)
谈谈“非线性物理”课的开放	汪克义 陆同兴 (208)
关于在基础物理教学中引入非线性概念的思考	杨学锋 姜万禄 王吉华 张连顺 (209)
关于磁感应强度的几种引入方法	王心芬 (211)
等效原理与惯性参照系	张永照 张淑艳 (213)
对工科大学物理波动光学内容教改的一点尝试	陆俊发 刘义保 (214)
偏振光干涉的课外探讨	邱 平 (215)
变力作功的几种求法	王茂林 钱叶枝 (217)
浅谈光在单轴晶体中的传播速度	孔令文 赵宗贤 (218)
小学语文教学要注意联系科技知识	王虹美 朱海星 (219)
工程物理课程设计刍议	彭宏庆 南秀华 (220)
物质波的群速度与德布罗意关系	张永照 张淑艳 杨万明 (221)
转动圆盘上物体静摩擦力的方向	郭润章 (222)
不同惯性系间电磁场变换关系的特殊推导方法	张永照 张淑艳 杨万明 (223)
热力学第二定律教学的现代化	张连顺 王吉华 姜万禄 杨学锋 (224)
“电势佯谬”浅析	谢 璞 (225)
热力学特征函数	张宏彬 (226)
物理实验设计思想五法	徐留春 (228)
温度梯度对涂敷材料扩散的影响	张绍鹏 (229)
大学物理习题现代化建设之我见	王长荣 (230)
教科书中关于电子伏的概念需再修正	陈协洋 (232)
军校课堂教学实战化	王保成 杨恩智 (233)
地球与太阳、脉冲双星相撞的半定量讨论	王承平 孙剑彪 孙长山 孙家宁 (234)
国际物理课程改革的趋向	张 敏 战 青 (235)
能流与光的多普勒效应	邓小玖 (236)
中学物理《电磁感应》知识系统化初探	余官清 (237)
中学物理教学要重视物理学方法教育	陈龙法 (240)
物理演示实验教学中的几个问题	陈龙法 (241)
把电教媒体引进物理教学中	徐成华 (243)

科学源流

现代原子结构探索的历史考察	刘乃汤 (244)
量子理论的发展过程与浅评	王禾文 (247)
实验物理学家基科因	徐载通 (256)
影像诊断先河的开拓者——伦琴	程民治 (258)
库仑在弹性力学上的贡献	童正印 (261)
库仑定律是怎样建立起来的——纪念库仑定律建立 210 周年	张东壁 (262)
卓越的天体物理学家——爱丁顿	程求胜 俞 成 (264)
麦克斯韦如何建立涡旋电场的概念	原所佳 于国安 (266)
亥姆霍兹与能量守恒定律	童正印 (268)
明天物理学的构想	厚宇德 张德林 (269)
全息辩证思维在研究信息时代物理中的作用	陈 堃 (270)
麦克斯韦怎样提出电位移与位移电流假设	杨晓段 陈鸿林 郭忠達 (276)
物理学与数学	厚宇德 马国芳 (278)
物理学史与物理教学	王吉有 (280)
近代物理学中一些名词的诞生	王延凤 刘生春 (281)
1901—1995 年诺贝尔物理学奖获奖者简况	江向东 黄艳华 (283)
诺贝尔物理学奖统计分析 with 评述	郭振华 王清君 强志军 郭应焕 (290)

取之不尽用之不竭的理想能源

——激光惯性约束核聚变

王 淦 昌

能源,是人类生存活动中不可缺少的、重要的资源。几千年来人类为了求得生存和发展,不断地探求向大自然索取能源。20世纪以来,人们开发利用了太阳能和原子能。原子能又分裂变能和聚变能。从40年代起,裂变能已为人类所掌握和利用。50年代开始,人们又在进一步探索聚变能的利用问题,已经有不少国家建造了受控核聚变研究装置,而且近年来的研究工作都有不同程度的进展,尤其是惯性约束核聚变的研究,目前又有新的突破。从前认为利用聚变能是遥远的事,而现在看起来要比从前乐观了许多。

我国人口众多,能源缺乏。在人口稠密、工业发达的地区,常因能源问题、工厂开工不足致工业生产和人民生活,带来困难。因此,开发利用聚变能既是相当迫切、又是非常实际的问题。因为它是一种取之不尽、用之不竭(燃料从海水中提取的最干净、最完整、最经济的理想的能源。我国在这方面已经建立了磁约束聚变装置和惯性约束聚变装置,进行了多年的研究工作,取得了很好的研究成果,可以这样自豪地说:我国受控核聚变研究工作已经有了很不错的基础。

一、惯性约束核聚变

今天我将向大家介绍激光惯性约束核聚变的新进展,讲这个题目之前,先向大家简单讲一讲什么是聚变能。

大家知道,氢有三种同位素,即氢、氘、氚,氘和氚聚合在一起产生 α 粒子(氦核)和中子,同时发出17.6百万电子伏特的动能。令D, T, n, He, H^+ 代表氘,氚,中子,氦,氢等核的粒子:



两个粒子有一定的相对速度聚合在一起就能产生那么多的能量,应该充分利用。这种能量就叫核聚变能。但要得到这种能量却不是简单的问题,全世界先进的国家都在致力研究、探索得到这种能量的办法,激光惯性约束核聚变的研究就是探索的途径之一。什么是激光惯性约束核聚变呢?简单地说,它是利用高功率的脉冲激光均匀地照射氘氚燃料靶丸,由靶石物质的熔化喷射而产生的反冲力使靶内物质受到约束,并迅速被压缩到高密度和热核燃烧所需的高温,从而发生热核爆炸,释放聚变能(见图1)。

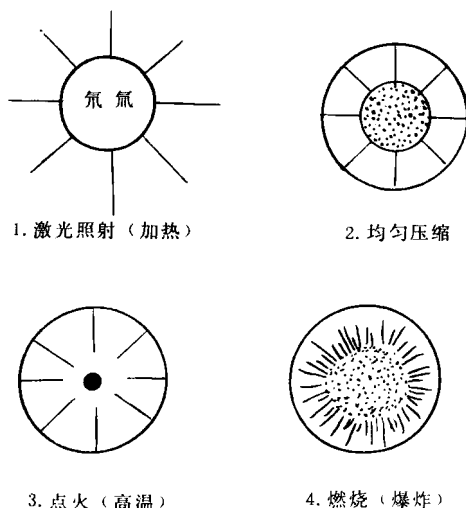


图1 激光惯性约束核聚变的基本过程示意图

科学家通过研究了解到:要得到聚变能,其基本条件一是高温,一是满足劳逊判据。

先说高温条件。我们知道原子核都是带正电荷的,因此,为了使氘核和氚核聚合在一起,就必须克服库仑斥力,使两个原子核彼此靠近到核力的作用范围以内。但是核力的作用范围小到 10^{-15} 米的量级,在这样的距离上库仑斥力变得非常之大。为了克服这样大的库仑斥力,氘和氚应当有足够大的初始动能,这相当于把它们加热到4万度以上的高温状态。氘和氚在这样高的温度下已不再保持原子状态,而形成了等离子体,一种由正离子和电子组成的特殊的物质形态。

当等离子体的离子和电子温度超过某个特定值(我们称为点火温度)时,通过核聚变反应释放出来的能量将会超过等离子体场由于韧致辐射而消耗的能量,等离子体的温度才能维持下来。对于氘-氚系统来说,这个温度为 5×10^7K 。

再说劳逊判据。所谓劳逊判据,指的是这样一个关系式:

$$n\tau > 10^{14}cm^{-3}秒。$$

式中 n 是等离子体每个单位体积里的粒子数目, τ 是等离子体在这个密度下的约束时间, $10^{14}cm^{-3}秒$ 是对

D+T 反应而言的.也就是说,等离子体必须在足够高的密度下约束足够长的时间,以保证足够长的氘核和氚核相互作用发生聚变反应.这个关系式是根据聚变反应释放的能量和等离子体消耗能量之间的平衡而推导出来的.按照劳逊判据, n 和 τ 的乘积必须不小于 10^{14}cm^{-3} 秒,才能得失相当.具体说,就是核聚变反应释放的能量应该相当于或大于激光器所给出的能量.惯性约束聚变燃烧时间 τ 很短,大约只有 2×10^{-10} 秒,这就要求粒子密度 n 越大越好,为此需要高压. n 值越大,燃烧进行得越快,充分燃烧的时间就越短,释放的能量就大于激光用去的能量.目前 $n\tau$ 已达到 10^{14}cm^{-3} 秒,这是很令人兴奋的进展.当然,这与实现点火的条件还差一个数量级,要把燃料小球压缩到液体密度的 1000 倍,才能得大于失.

怎样实现高温高压呢?必须有驱动器,把装有 T、D 粒子的小囊,驱动压缩如图 1 所示,使它的密度增加,同时也增加了粒子的温度.到现在为止,科学家们认为有四种驱动器是很有希望的.

(一)钨玻璃激光.它是目前功率和能量水平最高的脉冲式激光器.它的激光波长为 1.06 微米,属红外激光.这种波长太长,近来找到了一种缩短波长的办法,这就是通过“倍频晶体”把频率提高到二倍到三倍,波长减半为 0.53 微米的绿光和 0.35 微米的近紫外光.

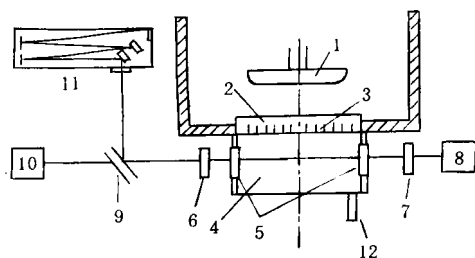


图2 KrF 激光产生装置及测试设备

1.阴极 2.阳极膜 3.有支撑结构的电子入射窗膜 4.激光腔体 5. $\phi 80 \times 8$ 石英窗 6. $\phi 80 \times 8$ 石英半透镜 ($R=58\%$) 7. $\phi 80 \times 8$ 石英全反射镜 ($R=96\%$) 8.光电管 9.分光镜 10.能量计 11.光谱仪 12.真空、充气系统
倍频晶体(KDP):

$$2\omega\lambda = 1.06 / 2 = 0.53\mu\text{m}$$

$$3\omega\lambda = 1.06 / 3 = 0.35\mu\text{m}$$

$$4\omega\lambda = 1.06 / 4 = 0.265\mu\text{m}$$

这种波长的激光能够较好地被等离子体吸收.它们不足之处是效率不够高,价钱昂贵.尽管这样,它作为激光驱动器,仍是很有前途的.

(二)KrF 激光(见图 2),它是准分子激光也是气体激光的一种,波长为 0.25 微米,发光效率较高,其总效率接近 5%,作为高功率的激光源是很有希望的.造价估计比钨玻璃激光约低一个数量级,因此,前途似是

乐观的.

轻离子束作为驱动器,有效率高($>30\%$)造价低(<50 美元/J),在靶上的能量沉积行为比较简单,也不会对靶中心热核材料产生预热及产生超热电子等优点.轻离子束最主要的困难在于离子束的传输和聚集.近年来各方面都在努力,但进展不大.

重粒子作为驱动器,理论上设想很多,美国伯克利大学和西德一起搞,仍在预制阶段.虽然从理论上看起来很有希望,但花钱太多(估计在十亿美元以上),中国近期不会搞.

激光驱动有两种办法,一种叫直接驱动,另一种叫间接驱动(又叫黑泪靶).

直接驱动是激光直接照射燃料小囊(见图 3)产生很大的压力,使小球压缩到很小,小到一定程度就产生核反应.发出很多能量.

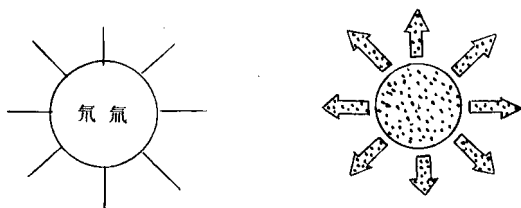


图3 直接驱动示意图

间接驱动是在氘氚燃料小球外面加一个外球壳(见图 4),激光从外球壳的小孔进入后,首先被外球壳的内壁表面吸收了,产生 X 光,均匀地压缩燃料小球并提高它的温度,到了一定程度小球就燃烧爆炸,产生聚变能,它的主要优点是利用 X 光的效率高,能够进行均匀的压缩.现在美国、日本都在用间接法,结果很好,科学家们认为黑泪靶的应用是激光核聚变研究中一件很有前途的新事物.

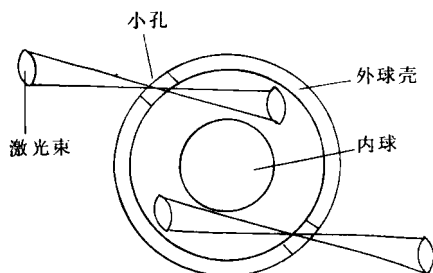


图4 间接驱动示意图

综上所述,道理看来很简单,但为什么做了好几年还是没有成功呢?经过摸索,现在基本上找出了关键所在,这些关键是:

1.高温高压,高温要求达到五千万度以上,高压使密度从每立方厘米 0.21 克增加到 200 克.

2.压缩的均匀度要求达到 1% 以内,只有用间接驱动法产生的 X 光才能达到这个均匀度.从前不大知

道,现在摸索出来了。

3.最关键的是短波长.从前美国人用 CO_2 激光,波长 10.6 微米,太长.现在的钹玻璃激光,波长 1.06 微米,还不够短,可以三倍频到 0.35 微米的紫外光.KrF 激光波长达到 0.25 微米,到目前为止,这个结果已经很不错了.为什么要短波长呢?因为波长太长,超热电子太多,被小球吸收后即发热.因而压不紧.短波长,超热电子少,可以进行冷压,达到需要的高密度。

4.中心点火.不是整个球都点火,那样花的能量太大.只是中心点火(全球的 0.02),向周围热导。

这四个关键解决了,惯性约束核聚变反应就成功了。

全世界先进的国家都在寻求解决这四个关键的办法,美国、法国、日本做了许多试验,得到了很好的结果.例如在短波长试验方面,美国 LLNL 的 Argus(相当于中国的神光装置)激光以三种不同的波长分别照射金靶和钹靶所得的结果表明短波长的吸收效率高,超热电子少,可见短波长就是能解决问题.现在我们也找到了达到短波长的办法,就是前面说的靠 KDP 晶体(见图 4),这是世界上最好的晶体,由我国福建物质结构研究所及山东大学做的,纯度高,效率好,也可以说是我们的王牌之一。

顺便讲一讲燃料小球的做法.小球外面还加一层东西,是低 Z 低 P 泡沫材料,激光打到泡沫材料上来压缩燃料小球,这样效率比较高,小球里面的氘氚燃料是液体的(见图 5).是在低温(约 -200°C 以下)下做的.当然在压缩到一定程度时,点火燃烧的温度是很高的,达到几千万度以上。

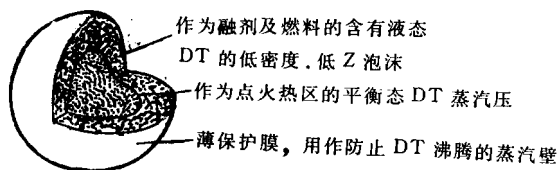


图5 氘氚燃料小球示意图

二、国际上激光惯性约束聚变的新进展

国际上激光聚变研究的最新结果是令人非常高兴的.以前 $n\tau$ 曾经长期停留在 $10^{12}\text{cm}^{-3}\text{s}$,现在已经达到了 $2.4 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}\text{s}$, n 已达到 $5 \times 10^{24}\text{cm}^{-3}$,相当于液体密度的 100 倍,温度达到 1.7keV,中子产额在 10×10^{10} 以内,不算高(高了不一定好),使人更高兴的是这些数据都与一维计算符合得很好,表明用间接法进行球形压缩很好.试验用的能量是 20kJ,波长 0.35 微米(3ω),约束时间 1 毫微秒.得出这个结果是很了不起的.从前无论如何达不到.将来还有希望提高到 $n\tau \rightarrow 2 \times 10^{15}$,温度也提高到 4keV(在中心点火范围内).用直接驱动法试验的结果是温度高到 8—10keV, $n\tau$ 值小

了, n 也小了,中子产额增高,这种结果不太好,不是我们所希望的,因为温度高了,压不起来,要用很多能量,但它可以做诊断用。

从前因为波长问题,压缩不理想,体积很大,就没有办法达到聚变反应,有压缩的必要。

美国新近才部分解密的名叫 Halite-centurion 的一系列地下核试验,也做了相似于室内微型聚变装置的试验,结果也完全符合一维理论计算,表示 10MJ 甚至 1.5MJ 就足以点火,使小球燃烧起来,得到相应的增益.他们根据这些试验的数据,设计了实验室微型聚变装置,亦叫实验室微型氢弹.氘氚小球总重量为 10 毫克,压缩前的直径为 5mm.液态正常密度为 0.21 毫克,压缩后,小球直径减少到原来直径的三十分之一至四十分之一,密度达到 200 克/cc 左右,相当于原来的 1000 倍,温度提高到约 5000 万度.输入能量是 10MJ,输出能量为 1000MJ,相当于四分之一吨 TNT,这样,受控核聚变反应基本成功。

因此,美国科学院在 1986 年的惯性约束核聚变计划中认为,约需五年时间(即到 1991 年)可以完成他们的计划,现在由于 LLNL 的 NOVA 工作的进展,这个计划超前三年完成,促使美国能源部雄心勃勃地决定发展室内微型聚变装置.看来实现标志纯聚变(即没有裂变,没有三废,不需要后处理)的核电站的可能性已经在望了。

三、激光惯性约束核聚变的应用

应用有三个方:军用、基础研究、发电。

1.军用.激光惯性约束聚变比磁约束聚变在军用上有其独特的优势,磁约束聚变不可能用于军用,因为它的工作速度慢.惯性约束聚变速度很快,它可以做模拟核爆,进行各种效应试验,还可用于电子学、器材等的加固工作。

2.基础研究,应用的范围很广,可以用来做高温高压试验,天体星球物理的研究,激光原子物理前沿的研究及其他。

3.发电,脉冲式的每秒钟二次,发 0.25 吨 TNT 能量,一天二十四小时,相当于 125 万千瓦热功率的核电站.关键是怎样才能实现持续的一秒钟二次或数次, KrF 激光有可能做到,因为它是气体,可用循环的方法多次重复,是最有希望的一种。

四、我国激光惯性约束核聚变研究工作的现状

我认为国内的研究工作是很不错的,做了许多工作,有了很好的基础.上海光机所的激光技术非常好,他们已进行了 10 多年的研究工作,有很强的、很有头脑的领导骨干队伍.他们已建立了单路、二路(又叫神光)六路激光器,具有一定的规模,并且进行了独创性的工作,在国际上已有一定的影响,但他们理论队伍较弱.核工业部九院的物理理论很强,实验和诊断技术也很好,但他们没有激光技术.大家知道,中国民间有个

高能物理学发展的 回顾和展望

朱洪元

从电弱统一理论提出到现在已经过去了 23 年,量子色动力学从诞生到现在也已经历了 17 年.在这期间 CERN 建成了 $E_{cm}=60\text{GeV}$ 的质子对撞机 ISR; FNAL 和 CERN 分别建成了能量为 500GeV 和 450GeV 的质子同步加速器.以后又建成了 E_{cm} 从 3GeV 到 100GeV 的正、负电子对撞机 SPEAR、DORIS、CESR、PEP、PETRA、TRISTAN、SIC、北京正负电子对撞机、LEP、CERN 和 FNAL 又将它们的质子同步加速器扩建为 E_{cm} 分别为 900GeV 和 1800GeV 的 SPPS 和 TEVATRON.用这些加速器和对撞机进行了大量实验研究,对标准模型理论进行多方面的检验.在去年 8 月在新加坡召开的第 25 届高能物理国际会议上总结了检验结果.结论是:

标准模型理论令人注目地成功地经受了所有实验的检验.超出标准模型理论的实验结果一个也没有得到.

这个结论当然令人非常高兴.这是半个世纪以来全世界高能物理界努力探索和研究的结晶.可以说:标准模型理论的建立是探索微观世界基本规律这个漫长过程中的一个里程碑.当然,这不是终点,我们必须继续前进,在这个时候,回顾走过来的历程,并展望未来的前景,也许是一个适当的时机.

标准模型理论是一个具有

故事,说一个瞎子,有腿,但看不见走不了路,一个跛子,有眼睛,但腿不行,也是走不了路,这两个人一合作就可以取长补短,就能到处跑.故事中的道理同样可以用在上海光机所和九院这两个单位,他们联合起来,成立联合研究室就可以发挥很大的作用,做很多事情,可以跟踪外国,可以做室内微型聚变装置(LMF)实验,事实上这种试验已经在进行.

中国原子能研究所做的 KrF 激光(见图 2),它的最大特点前面已经说过,效率高,重复性能好,波长短,但由于资金不足,进展的速度不够理想.日本比我们晚好几年才进行 KrF 试验,由于资金雄厚,已经建了六个 KrF 装置,实验工作已大大地超过我们.

我认为我国激光惯性约束核聚变是完全有希望的,只要国家支持,认真投入人力、财力,就有可能突破.过去我们只是埋头研究工作,忽视宣传,所以外界

$$SU(3) \times SU(2) \times U(1)$$

定域对称性的量子规范场论,其中 $SU(2) \times U(1)$ 对称是自发破缺的.理论中的基本组元是:三代六种轻子

$$\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

和六种相应的反轻子、三代、三套、18 种层子

$$\begin{pmatrix} u^R \\ d^R \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u^G \\ d^G \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} u^B \\ d^B \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c^R \\ s^R \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c^G \\ s^G \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c^B \\ s^B \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t^R \\ b^R \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t^G \\ b^G \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t^B \\ b^B \end{pmatrix}$$

和 18 种相应的反层子.三类传递基本相互作用的粒子:

γ	传递电磁相互作用
W^+, W^-, Z^0	传递弱相互作用
胶子 8 种	传递强相互作用

最后是在实验上迄今还没有发现的,导致对称性自发破缺的希格斯粒子 H.

首先回顾一下实验和理论在发现这些组元时分别

对我国惯性约束聚变研究的状况几乎一无所知,实际上我们有很强的能力,有优秀的队伍,有齐全的设备,有这样好的基础而不去充分利用和开发,很可惜.裂变的核电站当然需要,但应把眼光放得更远点,聚变的核电站也不能忽视,希望也能重视惯性约束聚变研究工作,二方面都应重视.我想只要配备适当的人力、财力,我国的惯性约束核聚变研究一定能够做出成绩,赶上世界先进水平.

在结束我这篇报告时,我还要再说几句,我们不会忘记,磁约束聚变研究方面,也做了不少工作,取得了很好的成果.在实现核聚变反应方面,究竟哪一种途径更快些? 现在还很难断定,希望大家都努力工作,深入探索研究,争取早日实现我们的共同目标——和平利用核聚变能.

(转载自本刊 1989 年第 4 期)

现代物理知识

所起的作用。 e^- 、 μ^- 、 τ^- 的存在,在实验上发现以前,理论都没有预料到。但 ν_e 的存在,早在实验发现以前泡利根据 β 衰变中电子具有连续能谱的特点就预言了它的存在。但 ν_μ 是和 ν_e 不同的中微子,则是实验的结果。在 τ^- 轻子发现以后,理论就断定相应的中微子 ν_τ 不同于 ν_e 和 ν_μ 。

反粒子的存在是早就由理论预言的。在1928年狄拉克提出电子的相对论性波动方程的理论时就预言正电子的存在,四年以后才在实验中发现了正电子。

至于层子,迄今还没有在实验中发现处于自由状态的层子。但理论之所以能预言层子的存在则来源于实验。1952年建成了Cosmotron,1954年建成了Bevatron,1960年建成了AGS。利用这些加速器,发现了一系列强子。这些强子的性质具有许多规律性。1961年盖尔曼在理论上对它们进行分类,发现可以用 $SU(3)$ 群的一维表示、八维表示和十维表示来分类,并预言 Ω^- 粒子的存在。1962年在理论上提出强子多重态中的粒子的质量所服从的公式,从而预言了 Ω^- 粒子的质量。1963年在实验上发现了 Ω^- 粒子。1964年,理论分析发现,具有不同自旋的强子的性质之间也有联系。可以将自旋为0和1的介子纳入 $SU(6)$ 群的35维表示和1维表示,将自旋为 $1/2$ 和 $3/2$ 的重子纳入 $SU(6)$ 群的56维表示。1964年,盖尔曼根据用 $SU(3)$ 群表示对强子分类的成功,提出强子由三种夸克组成的假设。用 $SU(6)$ 对称性理论对重子中夸克的波函数进行分析,发现重子内部还隐藏着前所未有的自由度:色自由度。

在盖尔曼提出强子的夸克模型时,还不能确定夸克是真正存在的物理实体,还仅仅是理论中的数学框架,因此从文艺作品中借用一个字典中没有的一个字“quark”来命名。一部分中国物理学家从已经认识到的自然界的不同层次的结构断定,当时发现的那么多的“基本粒子”不可能是物质结构的终点,自然界存在着更深层次的结构。因此将组成强子的组元称为“层子”。

在盖尔曼1964年提出的理论中,夸克只有三种。但1974年发现了第四种层子:c层子。c层子的存在,理论早在1970年就预言到。当然这个理论上的预言也有它的实验基础。实验上始终没有发现改变奇异量子数的弱中性流过程,如:

$$K^+ \rightarrow \pi^+ + e^+ + e^-$$

1977年,实验又发现了理论没有预见到的b层子。b层子被发现后理论要求消去反常所导致的发散困难,从而预言t层子的存在,但t层子至今还没有在实验中被发现(于1995年被发现——编者注)。

已经发现的轻子和层子共有三代,到底有几代,理论并没有预言。最近在实验上详细地研究了 Z^0 的各种性质,测量了一系列衰变过程的部分宽度,从而推断中微子只有三种。去年8月在新加坡会议上给出的实

验结果是:

$$N_\nu = 2.96 \pm 0.06$$

至于传递相互作用的粒子的存在,都是理论首先预言的。光子的存在是爱因斯坦在1905年为了解释光电现象的实验结果而提出的。直到1923年这一预言才为康普顿散射的实验所证实。这是人们首次认识到微观世界中的波粒二重性。 W^+ 、 W^- 、 Z^0 的存在及其性质是电弱统一理论所预言的,1983年才在实验中被发现。至于胶子的存在则是量子色动力学所预言的,它的存在以后在高能强子碰撞中产生的喷注现象的特点中首先体现出来。

至于希格斯粒子的存在则是电弱统一理论早在23年以前就预言的,但是至今还没有在实验中被发现。

现在来回顾一下这些组元之间存在着的基本相互作用的发现及其规律的认识过程。首先是万有引力。人类在远古就开始天文观察,到16世纪末,已经累积了大量观测资料,相当系统和精确。在此基础上开普勒于1609—1619年间总结出了行星绕日运动的三条经验规律。约70年后,牛顿提出了万有引力的现象性理论,再经过200年爱因斯坦才在1915年提出经典的、基本万有引力理论,这就是广义相对论。广义相对论的一个重要的实验基础是Eötvös以一亿分之一的精度在实验上证明:引力质量等于惯性质量。到现在为止,广义相对论的实验检验和证实还只有四种。它所预言的引力波至今还没有被发现。广义相对论在量子化以后出现的发散困难迄今还没有找到处理的办法。万有引力的研究开始得最早,进展的步伐却很慢,这可能是因为万有引力非常弱,实验非常难做,大部分是天文观察,很难观察到极端引力条件下的现象,并对之进行系统的测量和研究。

人类早就观察到自然界的电磁现象。从18世纪到19世纪上半叶,对电磁现象进行了大量的、系统的实验研究。在此基础上,麦克斯韦于1864年提出经典的基本电磁相互作用理论。在光子的假说提出以后,在量子力学发展的推动下,1927—1929年间建立了量子电动力学,量子电动力学的最低次近似结果和实验结果符合得相当好。但在计算高次近似时得到了发散的结果。1948年终于提出了处理发散困难的重正化方法。

弱相互作用的存在是在实验发现了 β 衰变现象之后才认识到的。泡利提出中微子存在的假说以后,费米在1934年提出了四费米子弱相互作用的现象性理论。1955年实验上出现 $\theta-\tau$ 之谜,这使李政道和杨振宁对一系列实验进行系统的分析以后认识到:在弱相互作用过程中宇称可能不守恒。吴健雄很快于1957年初在实验中证明:宇称在弱相互作用中不守恒,而且电荷共轭不变性也被破坏。此后有相当多的理论家认为CP联合起来还是守恒的。但1964年实验发现在弱相互作用过程中CP也是不守恒的。 $V-A$ 型普适弱相互

作用现象性理论的提出也是导致电弱统一理论产生的一个重要环节,这是由于理论家对大量关于 β 衰变的实验结果进行了仔细的分析,发现支持弱相互作用中包含S、T型的实验结果不可靠的后果。

强相互作用的存在是在原子核实验研究中发现的。1935年汤川秀树提出核子力的介子理论。1947年发现了 π 介子。于是物理界认为这就是汤川所预言的传递核子力的介子,但以后在实验中发现了许许多多种和核子有强相互作用的介子。这才使人认识到汤川提出的理论不可能是强相互作用的基本理论。目前的强相互作用的基本理论:量子色动力学,是理论家对大量实验结果进行了系统的分析,发现了隐藏的色自由度的存在之后,才建立起来的。

上面所介绍的关于对基本组的元和它们之间的基本相互作用的探索和研究取得一系列进展,为标准模型理论的建立奠定了基础。最终导致标准模型理论诞生的还有两个理论上取得的重要进展:杨振宁和密耳斯提出的非阿贝尔规范场论,希格斯提出的规范对称性自发破缺的机制。

从以上简单介绍的发展情况看,实验研究和理论研究起着互相促进的作用。实验发现了当时理论所无法解释的新现象,促进理论向前发展。而理论的进展又导致超出当时实验结果的新的预言,促使实验进一步向前发展。当然,有些理论的发展来自理论的内部矛盾。例如:量子电动力学的发散困难导致重整化理论的建立。牛顿提出的瞬时相互作用的万有引力理论和狭义相对论否定了同时的绝对性之间的矛盾,导致广义相对论的诞生。

理论来源于实践。但在理论终于掌握了现象深处的本质,发现了客观世界的基本规律以后,就将反过来引导实验。看来目前高能物理研究正处在这样一个阶段。因为到目前为止,所有可靠的实验结果都和标准模型理论的预言相符合。这表明实验还没有能够冲出标准模型理论所表达的规律起作用的范围的边界。展望未来,首先必须进一步进行实验,对标准模型理论在更大的范围内进行更系统、更精密的检验。

当前高能物理实验研究的重要目标之一是发现 t 层子和希格斯粒子。根据最近一年来关于 Z^0 质量值的测量结果和 $\sin^2\theta_w$ 的精密测量值和理论分析,预测 t 层子的质量为

$$m_t = 137 \pm 40 \text{ GeV}.$$

看来用LEP和HERA产生不了 t 层子,用Tevatron也许能产生 t 层子。当然,在本世纪末LHC和SSC(已经停建——编者注)建成之后肯定能够发现。最近实验给出希格斯粒子质量的下限已经提高到

$$m_H > 41.6 \text{ GeV},$$

但上限始终没有能定下来。

标准模型理论中有18个参数。有一部分在实验上

已经定得很准,如 $e, G_F, m_e, m_\mu, m_\tau$,有一部分已经定得相当准,如 $\sin^2\theta_w, m_{Z^0}$ 、CKM矩阵元中的 $\sin\theta_{12}$ 。有些参数实验上定下来的准确度不够高,如: m_u, m_d, m_c, m_s, m_b 、CKM矩阵元中的 $\sin\theta_{23}$ 。有些参数的准确度定得还比较差,如CKM矩阵中的 $\sin\theta_{13}$ 和决定CP不守恒的相因子 δ 。有些定得不够精确的参数还必需用实验进一步提高其精确度。

与提高这些参数的精确度的同时,还必需在更宽广的范围开展实验,进一步检验标准模型理论,应该研究尚未研究过的现象和过程。有些刚刚开始着手研究的问题,如规范场的三次项和四次项的效应,亟需进行深入的实验研究,有些实验的精度还需要提高。例如在CERN和FNAL测得的CP不守恒现象中 $\frac{\epsilon'}{\epsilon}$ 的数值还是彼此矛盾的。 $B_0 - \bar{B}_0$ 的混合现象虽然已经发现,并测定相应的混合参数 r 的值为 0.21 ± 0.06 ,但CP不守恒在 β 衰变中的效应还没有在实验中被发现。

今后实验的精度必须提高,理论的精度也必须提高。例如:关于低能强相互作用过程和许多强子的性质在实验上已经测量得相当精确,但相应的理论研究的精度还很差,亟需提高。而且由于非阿贝尔规范论是非常美妙的非线性理论,有非常丰富的内容,有待在理论上进行系统和深入的研究,以便将来用实验来检验。

标准模型理论显然还需要提高。但今后一段时期的发展不会像50年代、60年代、70年代那样快,因为没有出现和理论相矛盾的实验结果来指引理论发展的方向,只能根据现有理论研究的长远目标和理论本身所包含的内部矛盾来进行探索。

回想在本世纪20年代,中子还没有被发现,认识到的基本粒子只有两种:电子和质子。当时已经发现的基本相互作用只有两种:万有引力相互作用和电磁相互作用。理论中的基本参数只有六个:

$$h, c, m_e, m_p, e, G_N$$

当时许多理论物理学家期望,假使能建立万有引力相互作用和电磁相互作用、电子和质子的统一理论,从中将三个无量纲常数

$$\begin{aligned} \frac{e^2}{\hbar c} &= \frac{1}{137} \\ \frac{m_p}{m_e} &= 1836 \\ \frac{G_N m_e m_p}{\hbar c} &= 3.2 \times 10^{-42} \end{aligned}$$

推导出来,那末我们就终于达到最终理论(Theory of Everything)。

爱因斯坦和爱丁顿在他们的后半生中致力于这种探索,但都没有成功。

从那时到现在又发现了两种基本相互作用:强相

相互作用和弱相互作用;发现了几百种前所未有的粒子,已知物质的“基本”组元从两种增加到 30 种以上.理论中的基本物理参数从 6 种增加到 21 种.理论上需要解释的无量纲常数从 3 个增加到 18 个.看来即使 20 年代最伟大的物理学家也将宇宙看得太简单了.在 20 年代提出来的问题到今天已经发展为:如何统一地理解轻子、层子、光子、 W^+ 、 W^- 、 Z^0 中间玻色子、胶子、引力子、希格斯粒子等一切粒子和它们之间的一切基本相互作用;如何建立一个基本理论,能统一地解释所有的实验结果,又能统一地将 18 个无量纲常数从这个理论本身中推导出来.显然,自从 20 年代以来,我们对自然界的认识扩充和深入了很多.在另一方面也使我们进一步认识到宇宙的深广和我们的无知.我想,认识到我们的无知是一大进步.这将激励我们更加努力地向着更高的目标去探索.

标准模型理论和广义相对论中的一小部分参数来自规范场和万有引力场部分,因此和物理规律的对称性有关.要减少来自这方面的参数,看来得探索物理现象深处是否隐藏着更大的对称性.目前理论探索中相当大一部分就属于这一个方面.如

大统一理论
超对称理论
超引力理论
超弦理论

在 18 个无量纲参数中,绝大部分来自希格斯场部分,因此和对称性的破缺有关,一切粒子的质量都和希格斯场有关.质量不仅是一切粒子的一个基本性质,而且是万有引力场的源.而且不同代的粒子之间的连系也是通过希格斯场实现的.在另一方面,理论中和希格斯场有关部分的形式还特别繁杂.这和希格斯场的耦合是和汤川型有关,没有规范场的耦合方式那样严密.例如希格斯场和轻子场、层子场的对角耦合常数为

$$\begin{aligned} g_e &= 2 \times 10^{-6} \\ g_\mu &= 4 \times 10^{-4} \\ g_\tau &= 7 \times 10^{-3} \\ g_b &= 2 \times 10^{-2} \\ g_t &\simeq 6 \times 10^{-1} \end{aligned}$$

大小相差竟达五个数量级.希格斯场和层子场间的非对角相互作用常数由 CKM 矩阵元表达,决定这些矩阵元的参数的目前的实验值为:

$$\begin{aligned} \theta_{12} &= 12.6^\circ - 12.9^\circ \\ \theta_{23} &= 1.7^\circ - 3.3^\circ \\ \theta_{13} &= 0.057^\circ - 0.4^\circ \end{aligned}$$

它们相差最大也达两个数量级.因此弄清楚希格斯场的实质是什么? 对称性自发破缺的物理机制是什么? 是非常重要的问题.目前进行的如:

对称性的动力学自发破缺理论,
人工色理论

等等的研究就是属于这方面的探索.

希格斯场部分之所以包含有如此多参数的另一个原因是:轻子和层子各有三代.假使只有一代,那末这部分的参数就只有 5 个.其中的无量纲参数的大小也就不会相差如此多的数量级.我们对于“代”这个自由度的实质是什么,几乎一无所知,必须对之进行探索.

三代轻子和层子的一部分性质虽然差别很大,但不同代中的轻子的超荷和同位旋相同,不同代中的层子的超荷和同位旋也相同.而且轻子和层子的电荷又相互匹配得恰巧能使标准模型理论具有内部自洽性.可以将轻子和层子排列成为下表:

ν_e	e	u^R	d^R	u^G	d^G	u^B	d^B
ν_μ	μ	c^R	s^R	c^G	s^G	c^B	s^B
ν_τ	τ	t^R	b^R	t^G	b^G	t^B	b^B

这种表在形式上和化学元素周期表有些类似.因此正在探索:轻子和层子是否也是具有内部结构的复合粒子.人工色理论则在探索希格斯粒子是具有内部结构的复合粒子的可能性.也有人在探索 W^+ 、 W^- 、 Z^0 中间玻色子也是具有内部结构的复合粒子的可能性.因此探索物质结构的下一个层次也是当前高能物理基础研究的一个方面.

从物理学发展的历史看,这两个研究方向从来就是物理学中两个非常重要的,而且又相互密切连系的研究方向.

认识到空间和时间是一个不可分割的四维统一体,将空间的对称性和时间的对称性结合起来,扩大为庞加莱对称性,导致了狭义相对论.

引进空间和时间的定域平移对称性导致了万有引力相互作用的基本理论:广义相对论.而引力相互作用决定星系的结构和太阳系的构造.

电磁相互作用来源于内部自由度中的定域 $U(1)$ 对称性;它决定原子的结构、分子的结构、以及宏观物体的微观结构.

内部自由度中的色空间中的 $SU(3)$ 定域对称性导致强相互作用的基本理论:量子色动力学.而强相互作用则决定原子核的结构和强子的结构.

将内部自由度中的同位旋空间中的定域 $SU(2)$ 对称性和超荷空间中的定域 $U(1)$ 对称性结合起来,并引进规范对称性的自发破缺,导致电弱相互作用的统一理论.而弱相互作用最后决定轻子、层子、强子、原子核是否稳定.这决定现阶段中宇宙中物质存在的主要形式.

看来当前理论探索中的这两个基本方向是对的.但是迄今为止,这些探索所取得的成就很有限,而且同时带来了新的问题.例如:

大统一理论有可能解释电弱统一理论中的一个重要参数的值:

$$\sin^2\theta_w = 0.230.$$

但它所预言的质子衰变至今在实验上还没有发现.而且它的规范场部分虽然变得简单了,但其希格斯场部分却变得更复杂了,不仅在理论中带进了更多的参数,而且还带来了“等级问题”.高次近似的辐射修正将低次近似的理论结果修改得面目全非.

“等级问题”可能通过引进“超对称”来解决.但超对称所要求的费米子和玻色子之间的对称性迄今在实验上还没有发现任何迹象.超对称粒子一个也没有发现.此外,即使引进超对称,还无法解决量子万有引力理论中的发散困难.

超弦理论将一维弦的概念取代点粒子的概念.为了保证理论的自洽性,将表达外部自由度的时空流形从四维扩大到10维,将表达内部自由度的流形从12阶群 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 的表示空间,扩大为496阶群 $E_8 \times E_8$ 或 $SO(32)$ 的表示空间.一部分理论物理学家曾经期望:超弦理论能成为表达物质的所有基本组元和它们之间的所有基本相互作用的规律的基本理论,其中包括万有引力相互作用,而且在量子化以后不出现发散困难.但要在这种理论推导出可以和现有的实验结果比较的理论结果,还有很长的路要走.如何将外部自由度和内部自由度的流形紧致化到目前实验上观察到的流形,如何将对称性破缺到现在实验上观察到的对称性都还是有待解决的问题.现在已经在担心:超对称怎样会破缺?怎样会从理论中得到

$$\frac{M_{\text{pl}}}{M_{\text{pl}}} \simeq 10^{-17}$$

这样的质量等级?怎样能得到

$$|\lambda| < 10^{-120} r_{\text{pl}}^{-2}$$

这样小的宇宙常数?其中 M_{pl} 和 r_{pl} 分别代表普朗克质量和普朗克长度.

至于复合模型的研究,目前还处于更原始的阶段.

看来要在这两个方向上的理论探索取得实质性的进展,还需要物理概念上的创新和突破.这种创新和突破看来还得由突破性实验来指引探索的方向,可惜迄今为止,实验还没有能冲出标准模型理论所反映的物理规律起作用的范围的边界.现在美国已经批准建造 $E_{\text{cm}} = 40\text{TeV}$ 的 SSC. CERN 正在筹划将 LEP 扩建为 $E_{\text{cm}} = 16\text{TeV}$ 的 LHC.正在讨论建造 B 介子工厂、 D 介子工厂和 ϕ 介子工厂.这些规划中的工程建设不仅是为了能在实验上发现 t 层子和希格斯粒子,将标准模型理论中的参数定得更准,进行更精密的实验来更严格地检验标准模型理论,还希望在比目前高得多的能量领域的实验中、在现有能量领域中精密度比现有实验更高的实验中发现突破标准模型理论的新现象.甚

至原子物理实验技术和理论计算技术现在也已经提高到能够进行宇称不守恒的原子电磁跃迁的研究,用来定标准模型理论中的某些参数.在精密度进一步提高以后,这类实验还可以用来对标准模型理论进行严格的检验,希望实验研究在本世纪末以前能取得突破性的进展.

历史上也出现过这样的情况:关键实验结果早就出来,但理论家长期没有认识到它的重要性.例如:早在1890年,厄缶就发表了他的关于引力质量等于惯性质量的精密实验结果,但直到1915年爱因斯坦才建立了广义相对论.其重要的实验基础之一就是厄缶的实验.其实已经出现了许多问题有待理论解答.如:

- (1) 希格斯场和希格斯机制的实质是什么?
- (2) 量子万有引力理论的发散困难不能重正化,问题出在哪里?
- (3) “代”自由度的实质是什么?
- (4) 是否存在其他尚未发现的自由度?
- (5) 是否存在其它尚未发现的相互作用?
- (6) 相互作用的传递者:光子、中间玻色子、胶子、引力子的存在及其所属群表示由定域对称性决定,是什么原理决定轻子和层子的存在及其所属的群表示?
- (7) 为什么有些对称性是定域性的,而有些对称性是整体性的?
- (8) 为什么轻子和层子的质量谱如此特殊?
- (9) 狭义相对论表达了外部自由度空间流形和时间流形之间的连系.定域规范不变性表达了外部自由度流形和内部自由度流形之间的连系.电弱统一理论表达了内部自由度中同位旋空间和超荷空间之间的连系.是否在表达一切物质存在形式的流形,包括外部自由度流形和一切内部自由度流形之间都存在着有机的连系?如何在理论上统一地反映所有这些连系?
- (10) 广义相对论反映了物质存在的普遍形式.动量和能量如何影响外部自由度时、空流形的结构,物质存在的特殊形式是否也会影响内部自由度流形的结构?
- (11) 能否给予已知的一切粒子和它们之间的一切已知的相互作用统一的理论反映?

以上只是我们所面临的、有待解答的一部分问题的罗列,远不是全部.有些问题已经在理论上进行探索.这些探索虽然还没有取得显著的进展,但是这种探索应该继续下去.不能因为十几年来的努力没有取得突破就放弃.在人类认识客观世界的过程的历史长河中,十几年只能算是小小的一段历程.

北京正负电子对撞机在高能物理将来的发展过程中应该能够作出有意义的、系统的贡献.在这一能区中的探索虽然已经进行了16年,但仍有相当大的领域有待深入探索,当然在聚粒子物理这一领域,竞争也还是

粒子物理学和核物理学的相互交叉

黄 涛

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

自从 1911 年卢瑟福用 α 粒子作为炮弹轰击金属薄箔发现了原子核,核物理学发展为物理学的一个重要分支.进入 20 世纪 50、60 年代以后,由于高能加速器的迅速发展,人们对物质结构的认识又深入到更深层次,基本粒子的种类多达几百种,粒子物理学成为探索微观世界的最前沿的一个学科.粒子物理学的诞生和发展深受核物理学的影响,而粒子物理学的发展反过来又影响着核物理学的某些基本问题的研究.

一、原子核内新自由度

1932 年查德威克发现了原子核内除了有质子外还有中子,接着海森堡提出了原子核是由质子和中子组成的,质子和中子一直是组成原子核的基本组成成份.原子核内的质子、中子结合很紧,那么是什么样的核力使它们聚集在一起.1935 年汤川秀树提出了 π 介子传递了这种相互作用,这就预言了原子核内除了质子、中子以外还有 π 介子.随着粒子物理学的发展,实验上揭示了原子核内还有更多的新成份,例如 π 介子, ρ , σ 粒子介子,各种核子的激发态 Δ 粒子等.原子核内除了质子、中子传统自由度,还有更多的新自由度,这一思想在今天有了进一步发展.人们正在从理论上和实验上寻找核内夸克自由度,核内胶子自由度以及核内颜色激发自由度等.这就更丰富了原子核物理学的基本内容.

原子核由质子和中子组成,质子、中子又分别是由

三个带颜色的层子(夸克)组成的.例如质子 p 内部的三个夸克分别是两个上(u)夸克和一个下(d)夸克,中子 n 内部的三个夸克分别是一个上夸克和两个下夸克组成.三个夸克分别携带不同的颜色,使得质子和中子处于颜色单态(即无色态),简单记为

$$p=(uud)_1, n=(udd)$$

这样,由质子和中子组成的氦核 d 可以记为

$$d_1^{(1)}=(pn)=((uud)_1(udd)_1)_1$$

这表明氦核是由六个夸克组成的,三个夸克一团构成色单态的质子和中子.显然若三个夸克重新组合成团,仍能构成氦核的新形态,例如

$$d_2^{(1)}=((uuu)_1(ddd)_1)_1=(\Delta^{++}\Delta^-)$$

这就是通常所说氦核中可能存在的 isobar 成份.其实,由于原子核内夸克自由度的存在,氦核的内容就更丰富了.例如氦核内三个夸克一团不是构成颜色单态,而是处于颜色激发态(八重态),总的构成颜色单态的氦核,即

$$d_1^{(8)}=((uud)_8(udd)_8)_1=(p_8n_8)_1$$

$$d_2^{(8)}=((uuu)_8(ddd)_8)_1=(\Delta_8^{++}\Delta_8^-)_1$$

又如氦核内三个夸克成团还产生一对正反夸克对($q\bar{q}$)也形成新的形态 $((uudq\bar{q})_1(uddq\bar{q})_1)_1, \dots$, 再如传递夸克之间相互作用的胶子 g 也可以参与每一团之中形成氦核的新形态 $((uudg)_1(uddg)_1)_1, \dots$ 因

激烈的.固定靶实验在 D 介子研究方面正在作出很好的贡献.甚至美国的 CESR 和德国的 DORIS 也正在对粲粒子物理作出贡献.因此必须尽力竞争.

目前在国际高能物理界就有中国、日本、西欧、美国、俄国、德国这几个国家和地区有自己的高能加速器或对撞机.过去作出贡献的主要是美国和西欧.其次德国在 B 粒子物理实验研究方面也作出了一系列贡献.但日本并不成功. TRISTAN 的能量虽然比北京正负电子对撞机高十倍,性能也相当好,但不幸这一能区下面没有“矿”,正像 PEP 和 PETRA 一样,做不出什么有重要意义的工作.至于俄国,在高能物理实验研究方面投资相当可观,但在科学上的贡献不多.我国的北京正负电子对撞机能量虽然不高,但亮度高,而且在相应能区下面有“矿”.只要能够充分发挥这一优势,是能够

作出系统的、有意义的贡献的.只要做出了这种贡献,我国就能在国际高能物理界占有有影响的一席之地.

在出成果的同时,一定会出一大批人材.现在高能物理实验研究是一个科技涉及面广,需要一个大集体承担的科学研究领域.参加国际合作当然也能作出贡献,但贡献的面比较少而且窄.北京正负电子对撞机要在科学研究上取得成功,需要全面的高水平.从对撞机到谱仪到数据获取和分析都需要全面的高水平.估计在这一过程中,我们的队伍一定会感到很累,但攀登高峰哪有不累的?!正是在这种全面攀登的过程中才能锻炼出各兵种齐全、各层次人材齐全的队伍,这对持续保持并进一步提高我国在国际高能物理界的地位是至关重要的.

(转载自本刊 1991 年第 4—5 期)

此量子色动力学理论给出核核有无穷多种的新形态。然而并不是这样多种新形态对核核都很重要,其实传统的

$$d_1^{(1)} = (pn)$$

是占有绝对主要的成份, $d_2^{(1)} = (\Delta^{++}\Delta^-)$ 只占百分之几,而其余的新成份在正常情况下则可以忽略不计。人们正在研究在什么样的条件下可以使这些新形态表现出来。最简单的核核如此,庞大的原子核家族的所有成员也是如此复杂,如此丰富多彩。

二、核力新探

自从发现中子以后,原子核由质子和中子组成也得到了实验的证实,但人们不知道是什么样的力量使质子和中子聚集在一个很小的空间而密度又那样地大。事实上原子核的大小仅是原子大小的十万分之一,而它几乎集中了原子的全部重量。人们称使质子和中子聚集在原子核内的作用力为核力,显然核力很强,称为强相互作用。强相互作用不仅作用强度强而且力程短,仅在原子核大小范围内起作用,也就是说力程约是 10^{-13} 厘米。正是根据这一点,1935 年日本著名理论物理学家提出传递核力的媒介子是质量约为 140MeV 的 π 介子。质子、中子间是通过传递 π 介子而紧密地结合在一起,这的确在探讨核力起源上起了很大的作用,它解释了核力的长程部分。

随着实验研究的深入,发现核力的力程虽短,但随着核子(质子和中子的总称)间的距离变化呈现复杂的关系,分为短程、中程和长程部分(见图 1)。核力的单 π 介子交换给出合理的长程部分;双 π 介子交换或 σ 介子交换给出合理的中程部分;矢量介子(ρ 和 ω 介子)交换可以部分地解释短程部分,但远不能解释短程排斥心。

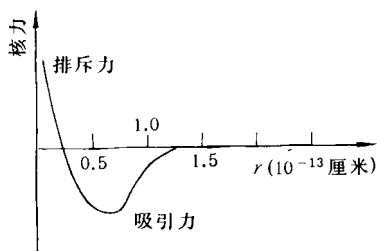


图 1 核力随距离的关系

既然 π 介子、 ρ 介子、 ω 介子、 σ 介子都是由正、反夸克组成的,而夸克之间是通过交换胶子进行相互作用,近年来人们试图从物质的基本组成夸克间的相互作用来探讨核力。大家知道,夸克和胶子相互作用遵从的动力学是量子色动力学理论。按照该理论,夸克和胶子在小距离下是渐近自由的,而在大距离下是囚禁的。因此所有的夸克和胶子都被囚禁在强子(所有参与强相互作用的粒子的总称)内部,人们无法观察到自由的夸克和胶子。正是由于囚禁的动力学还没有一个可靠

的理论,因此人们还不能精确描述在强子内部的夸克和胶子的动力学规律性,也就不可能从量子色动力学基本理论出发来得到核力的基本理论。然而,由于重夸克(例如粲夸克和底夸克)的势模型理论很好地描述了由重夸克组成的强子态,近几年来人们利用势模型理论在夸克模型的基础上对核力进行了新的探讨。

简单地说,重夸克之间的相互作用势是由两部分组成的:短程的矢量库仑势和长程的标量线性势,前者是由渐近自由性质决定的,后者是由囚禁性质决定的。在夸克模型基础上,考虑到交换胶子,正、反夸克对效应等,对核力的中程和短程排斥心部分有了新的认识。可见原子核物理中早在 30 年代就提出的核力问题与现今的粒子物理学中的量子色动力学理论是紧密相关的,核力新探正吸引着核物理学家和粒子物理学家去共同完成。

为了检验量子色动力学理论,人们常利用电子或中微子去打击核靶,这就必然涉及到原子核的结构问题。随着实验的精确测量,也揭示出原子核的内部结构的新现象。例如著名的 EMC 效应就揭示出原子核内的核子可能变“胖”这一奇妙现象,这就是说原子核内的核子要比自由核子的半径大。关于原子核内结构是否存在新现象还可以在质子打击靶核的 Drell-Yan 过程中进行检验。人们正试图在量子色动力学理论基础上对核力和核结构进行新的探讨。

三、核物质的新形态

量子色动力学是强相互作用的基本理论。它描述了组成强子物质的夸克和胶子间的相互作用。原子核内的核子是由夸克组成的,核子间的相互作用将由量子色动力学理论确定。这种相互作用的强度在动量迁移很大时变小,可以应用微扰量子色动力学方法处理,然而对于动量迁移小的软过程,相互作用强度变得很大,微扰量子色动力学不再适用,非微扰量子色动力学的一个基本方法——格点规范理论——已取得了重要的进展。例如格点规范理论预言当强子物质体系的温度 T 高于某一临界温度 T_c ($T_c \sim 200\text{MeV}$) 时,强子内夸克可能会解除禁闭,成为夸克、胶子等离子体。这就是说核物质从普通的强子相转变为夸克、胶子等离子相。

按照大爆炸理论,早期宇宙在大爆炸的 10^{-5} 秒内,其温度高达 200MeV 以上,很可能就是夸克、胶子等离子体,逐渐冷却后才转变为普通的强子物质。

近几年来,人们对高能重离子碰撞实验给予了足够的重视,美国布鲁克海文实验决定建造相对论重离子对撞机(RHIC),投资约 4 亿美元,将于 1996 年建成。一个重要的目的在于研究在高温、高密度的条件下是否存在从普通核物质到夸克、胶子等离子体的相变。目前实验上正在进行的高能重离子碰撞能量已经实现每核子能量大于 10GeV 的重原子核之间相撞,实验结