



# 谈谈高能物理

勾亮

(中科院高能物理研究所 北京 100039)

## 一、高能物理学科的产生和它的根本目的

高能物理又称粒子物理(又称粒子物理,因为在高能物理研究的能量区域,一切物质现象都可归结为构成物质的基本组份在基本作用力作用下产生的现象),它是研究物质的基本组份及其相互作用的基础学科,是当代物理学前沿。其根本目的是,试图在更深层次的物质结构和基本相互作用的基础上统一解释物质现象,认识和掌握物质运动变化规律,以寻求发展生产力的新途径。

人类对构成物质基本组份的探索,据文字记载最早要追溯到公元前五世纪。当时古希腊哲学家留基伯,以及后来他的学生德谟克利特,为了统一解释发生在周围的纷繁杂乱,千变万化的自然现象而提出“物质是由什么构成的”问题。他们认为,只有在基本组份和基本过程的基础上才能统一解释自然现象。因此,人类必须进行超越自然界呈现的现象所给予我们直觉

的研究,才能达到统一解释自然现象的目的。他们认为,一切物质都是由不可分的所谓‘原子’组成的。

这种物质观念毕竟是他们只运用纯哲学思辨而得到的。他们的原子理论只是反映了他们对物质世界看法的一种朴素的唯物主义观念。‘原子’究竟是什么?只有建立在实验测量基础上的物理学的产生和发展,才可能真正回答这个问题。‘原子’学说的一个重要意义在于,它引导人们去追求和研究支配物质运动变化的普遍规律。这种探求未知世界的努力,导致了人们不断地认识和掌握物质运动变化规律,进而推动了科学技术的不断进步。促进了生产力和人类社会的迅速发展。

建立在实验测量基础上的物理学的产生和发展,迅速加快了人类对物质现象的认识。从17世纪至本世纪20年代的三个世纪左右时间里,物理学家先后建立了描写宏观物体在力的

界假设预言的宇宙在早期阶段的暴胀意味着,宇宙必须以非常接近为避免坍缩所需要的临界速率膨胀,这样它在很长时间内才不至坍缩,如果情况不是这样,那么到宇宙坍缩时期,所有的恒星都会烧尽,而在其中的质子和中子可能会衰变成轻粒子和辐射。此时,宇宙将处于几乎完全无序的状态,这时就不会有明显的热力学时间箭头。由于宇宙已经处于几乎完全无序的状态,无序度不会增加很多。然而,对于有智慧的人类行为来说,一个明显的热力学时间箭头

是必要的。为了生存下去,人类必须消耗能量的一种有序形式——食物,并将其转化成能量的一种无序形式——热量,所以智慧生命不能在宇宙的收缩相中存在,这就解释了,为何我们观察到热力学和宇宙学的时间箭头指向一致。并不是宇宙的膨胀导致无序度的增加,而是无边界条件引起无序度的增加,并且只有在膨胀相中才有适合智慧生命生存的条件。

(主要材料来源《New Scientist》与霍金著《时间简史》)

作用下运动规律的经典力学(即牛顿力学);描写电磁场运动的产生和变化规律的经典电动力学(麦克斯韦方程)和描写微观低速粒子运动变化规律的量子力学(薛定格方程和海森堡矩阵力学),以及爱因斯坦建立的阐述物理观测与时空观念的关系的狭义相对论。这些物理学基本理论的建立,不仅使人类在原子水平上统一认识和解释了物质现象,而且直接导致了近代的工业革命和现代的电子工业、以及当今的信息革命的产生与发展。从而使人类认识到,基本物理的研究不再只是为了解决人类的好奇和实现统一解释物质现象的欲望而从事的活动,基本物理研究的成果还会在人类改造物质世界方面起到巨大的能动作用。实际上,只有当基本物理研究成果广泛地应用于社会生产,人类社会生产才能从利用自然资源为主的工业时代发展至今日的以利用智能为特征的信息时代。科学技术的发展不仅能利用机器代替人类的某些体力劳动,而且还可利用机器(电脑)代替人类的某些脑力劳动。从而在深度和广度上大大地解放和提高了生产力,并且给人类社会的生活方式和结构带来了深刻的变化。

到1932年发现中子为止,人类对物质结构的认识已深入到原子核。人类认识到,一切物质都是由原子或由原子结合成的分子组成的,原子是由原子核和电子组成的;原子核是由质子和中子组成的。用电子、质子和中子可以构成自然界中发现的一切物质。那么高能物理是怎样产生和发展的呢?它产生的根本原因在于人类对基本物理的不断深入地探索,而它的迅速发展,政治起到了推波助澜的作用。

物理学是实验科学。基本物理的探索包括实验现象的研究和描写它的理论探索。在研究原子层次的微观物理时,实验上就已发现了原有理论不能解释的原子核自发衰变现象和由质子和中子组成的密度极大的原子核存在的稳定性问题。实际上,这种现象反映了除了日常生活中人们可感知的引力和电磁力这种长程力外,自然界还存在着两种日常无法感知却在物质现象中起作用的、新的、力程极短( $<10\text{cm}$ )的

力——弱作用力和强作用力。显然,人类对这两种基本力的性质以及粒子在它的作用下产生的现象,和如何描写它们等诸问题都还不清楚。对这些未知问题答案的寻求和探索,在对原子核性质的实验研究和理论探索、宇宙线研究的成果以及对物理观念的一致性探索的基础上,导致了物理学的一个新领域——高能物理的产生。

这个领域的一个突破性进展是关于现代物理学的两大支柱——量子论和相对论相结合的理论形式的研究。这就是狄拉克在1928年研究相对论不变的量子理论时,得到的描写自由电子的相对论量子方程。该方程不仅能描写非相对论量子理论不能描写的电子所带的内禀角动量-自旋,而且还预言了正电子的存在。

实验上的突破,来自宇宙线的研究。在本世纪二三十年代,在研究大气带电性质基础上发展起来了一个新领域——宇宙线研究。到30年代,由于计数器,核乳胶和云室等探测器的成功使用,大大提高了识别宇宙线粒子的能力。于1932年在外加磁场的云室里发现了电荷与电子电荷相反,质量与电子相同的粒子-正电子,这恰恰是狄拉克的相对论量子方程所预言的粒子。这样以相对论量子方程的建立和正电子的发现为标志,基本物理研究已经进入到了以研究高能粒子的产生、衰变和湮灭现象为内容高能物理研究领域。相对论量子方程经过二次量子化,导致了把粒子作为基本场来描写的量子场论的产生。量子场论的可重整性的证明以及由基本相互作用所具有的对称性来决定描写相互作用的理论形式的规范原理(杨振宁)的建立,使得量子场论成为研究高能物理的基本理论。量子场论的一个成功范例,是描写在电磁作用下粒子产生、衰变和湮灭现象的量子电动力学。在现在实验所能达到的精度下,它被证明是完全正确的、非常准确的理论。

随后,在宇宙线中又接连发现了 $\mu$ 、 $\pi$ 和K这些构造我们日常生活中遇到的物质并不需要的粒子。在这之后,发现新粒子和研究这些新粒子的性质成了物理学家追逐的热点。利用宇

宙线来发现新粒子的这种靠天吃饭的方式已不能满足物理学家的需要。因而，在 30 年代初设计制造的粒子加速器的基础上设计研制了能够产生数量多、能量越来越高的粒子加速器。与此同时，不断发展的电子学探测技术和能迅速处理大量信息、速度快容量大的电子计算机技术，大大地提高了科学家发现和识别粒子的能力，使得科学家能够发现质量越来越大，寿命越来越短的粒子。从 30 年代到 90 年代加速器的能量提高了五个量级，所发现的粒子的质量也提高了两个量级。相应的经费投入也越来越大。高能物理之所以能如此迅速的发展，国家的支持是非常关键的。

二战期间，在基本物理研究发达的英国成功地研制和使用了与其国家命运相关的雷达技术。在二战结束前夕，美国成功地爆炸核弹所显示核能的巨大威力以及它对战局发展的影响，使得战后的一些大国形成了一种共识：物质现象的基本物理的研究对其科学技术的进步和保持强国的地位是至关重要的。如果说二战期间苏联人民的贡献显示出维护正义的精神力量的威力，那么美英人民的贡献明显地显示出现代科学技术的发展在维护正义上的巨大威力。因此，无论是苏联还是西方大国，对科学家提出建造和改进可能与核能研究有关的粒子加速器和研制粒子探测技术的计划，在人力，物力和财力上都给予其他学科无法比拟的支持。为了适应研究的需要，设计制造的粒子加速器的能量和流强越来越大，要研制的探测技术也越来越高精复杂，因而所需资金越来越多。不像经典物理，高能物理实验研究不仅个人无力进行，甚至一些大学和国家也无能为力。致使出现了几个国家联合建造研究中心 (CERN) 的情况。虽然花费如此巨大的经费，几乎没有直接经济回报，但由于新粒子的不断发现，以及对它们的性质的巧妙确定，并因此高能物理研究的一些成果不断获得诺贝尔物理奖，从事高能物理研究的一些国家并没有因投资巨大而停止对高能物理研究的支持。

## 二、描写粒子行为的标准模型

表1 上、下和奇异夸克的性质

夸克味	$Q/ e $	$I_3$	S
u(上)	2/3	1/2	0
d(下)	-1/3	-1/2	0
s(奇异)	-1/3	0	-1

在建立粒子物理标准模型的研究中，电磁作用与弱作用统一和强子结构的发现。是两个重要的突破性进展；

自从原子核 $\beta$ 衰变现象发现以来，经过漫长的实验研究和理论探索，到 60 年代对弱作用的性质已经有了比较清楚的认识。从弱相互作用的某些性质与电磁相互作用的一些相似性中物理学家萌生了电弱统一思想。能使规范粒子带上质量的希格斯机制的发现，非阿贝尔规范原理的建立及其可重整性的证明，最终建立了描写电弱作用的电弱统一规范理论。

与此同时，对强相互作用的研究所花费的力量，无论在实验上还是理论研究上，要比电弱大得多。到 60 年代，从宇宙线中和粒子加速器的实验中相继发现了上百种参与强相互作用的所谓“强子”。尽管实验结果如此丰富，物理学家在理论探索上进行了巨大努力，量子场论仍不能解释包括原子核在内的强相互作用现象。在一些实验分析的启发下，一些物理学家怀疑，这些数目比当初排列元素周期表时的元素数目还多的基本粒子难道都是“基本”的吗？于是，就借鉴研究原子结构的研究方法，从两个方面探索强子的内部结构。

一个是类似于编制元素周期表的方法，将已发现的强子按其性质分类。研究表明，如果存在三种带分数电荷以及其他一些特性的更基本的粒子存在(见表 1)，那么用三种“夸克”就可以构造出已发现的所有的强子，并且在这之后不久又发现了该模型预言的由三个奇异夸克构成的 $\Omega^-$ 粒子。

另一方面又运用类似于有 $\alpha$ 粒子轰击原子发现原子的核结构的方法，用只参与电弱作用的轻子(e 或  $\mu$ )轰击核子(P 或 n)的所谓轻子-

核子深度非弹性散射实验来探测核子的内部结构。对实验结果的分析表明,轻子与核子的深度非弹性散射,可归结为轻子与核子内部的类点组份的散射。而且,这些类点组份恰好具有表1所示的夸克性质。综合以上两方面的分析得出,强子是由更基本的粒子——“夸克”构成的。发现夸克之间存在的强相互作用具有SU(3)对称性的之后,利用规范原理,建立了描写夸克之间强相互作用现象的量子色动力学(QCD)。它与电弱统一理论一起构成了粒子物理的标准模型。

概括起来,粒子物理的标准模型是建立在SU(3) × SU(2) × U(1)对称性基础上的规范理论,它包含三代费米子(三代夸克和三代轻子):  $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$  以及一个中性希格斯粒子H,描写这些费米子在弱电和强相互作用下产生的现象的理论分别是具有SU(2) × U(1)对称性自发破缺的弱电统一理论和具有SU(3)对称性的量子色动力学。弱电统一理论中质量不为零的规范玻色子W, Z传递弱作用,无质量规范矢量粒子 $\gamma$ 传递电磁相互作用;具有SU(3)对称性的量子色动力学描写带色夸克和带色胶子参与的强相互作用。每个夸克可带三种不同的颜色(色荷相当于电磁作用中的电荷,电荷有正负两种,而色荷有红、黄、蓝三种,三种颜色混合一起为色中性,类似于电中性)。可带八种颜色的胶子除传递夸克之间的强相互作用外,不同颜色的胶子之间也存在相互作用,因而,胶子不仅能束缚成无色的胶子球,而且还使得夸克之间的强相互作用具有渐进自由的性质。反过来说,夸克之间的强相互作用随距离的增加而无限地增大,使得夸克将永远囚禁在强子里,而观察不到自由的夸克。

迄今为止,高能物理研究的内容基本上可概括为:一方面,利用轻子、强子和光子之间的高能碰撞现象来研究和认识轻子和夸克的性质,以及在弱电强相互作用的作用下,它们的产生、衰变和湮灭的规律;另一方面利用描写轻

子,夸克在弱电强相互作用的作用下它们产生、衰变、湮灭规律的-粒子物理标准模型来解释轻子,强子和光子之间在高能碰撞中产生的现象。

### 三、高能物理研究的现状

标准模型建立之后,一方面理论研究者用它来计算一些物理过程以预言和解释实验;另一方面实验物理学家又利用各种可能的实验来检验标准模型的计算结果。尽管标准模型不断遇到尚未核实好的实验结果的挑战,但最后都证明,所有实验结果都与标准模型相符。迄今为止,没有一个实验与标准模型相冲突。从这个意义上讲,标准模型统一描述了高能粒子现象。但物理学家对它并不满意,因为它还存在一些问题。除了它至少含有19个像粒子质量,相互作用耦合常数以及混合角那样的理论不能预言的、太多的参数的缺点外,还存在些实验上尚待确认的问题。

1. 中微子质量是否等于0?
2.  $\nu_\tau$  存在否?
3. 希格斯粒子是否存在?

除此而外,还存在一些它不能回答的关于粒子物理的基本问题:

1. 为什么只存在三代费米子?
2. 轻子和夸克是否有内部结构?
3. 电与磁是统一的,电磁与弱作用是统一的,弱电强是否也是统一的? 是否也能把引力统一起来?
4. CP破坏是怎样产生的?
5. 观察到的天体都是由粒子构成的,是否存在由反粒子构成的反物质天体? 构成我们观察到的天体的多余粒子(多出反粒子的粒子)是如何产生的?
6. 暗物质是否存在? 它是什么?

由于存在以上诸多问题,物理学家对标准模型并不满意。许多物理学家认为标准模型可能不是描写高能粒子现象的完备理论,它可能只是一个完备理论的低能近似。相信一定存在着超标准模型的新物理。因此,实验上除了继续观测研究标准模型尚待确认的问题外,一个重要方向是对新物理的探索。为此,现正在对

标准模型进行全面、系统和精确地检验。为了获得高能量数目多的事例以研究与  $W, Z, t$  夸克和希格斯有关的物理,设计制造了 PP 高亮度粒子对撞机 (Fermilab, CERN), 为了获得数目多, 本底少的干净事例以适应精确检验和对稀有事例的研究需要, 设计制造了阈能在 B 产生阈的  $ee$  对撞机——B 工厂 (SLAC, KEK, Conel) (其中一个重要目的是研究 CP 破坏问题)。还有人们期望但还未设计制造的  $\tau$ - $c$  工厂; 还有用来仔细探测强子结构以检验 QCD 的  $ep$  对撞机 (DESY)。

近年来一个新的发展是关于非加速器物理的研究。它是利用设计制造性能独特的探测系统来探测宇宙线, 期望从中发现性能独特的新现象。例如, 观测太阳中微子、大气中微子的设备; 在水中布设体积巨大的探测系统以探测超高能中微子的设备, 以及安装在卫星上探测宇宙中反物质的  $\alpha$  磁谱仪。最近日本超神冈宣布探测到了大气中微子振荡, 如果被确认, 中微子质量不等于 0, 这将对基本物理产生重要的影响, 因而这将是非加速器物理研究的具有重要意义成果。

在理论上, 为配合实验上系统和精确地检验标准模型, 运用标准模型, 进行唯象的理论研究仍然是主要的、大量的。但是由于对标准模型某些方面的不满意, 甚至在建立标准模型的研究的同时, 一些理论家就进行了一些非标准模型的理论探索, 构造这种理论的一个共同原则是在低能下给出标准模型的结果。这些超标准模型都是在量子场论和规范原理的框架下, 基于粒子可能存在内部结构、或者基本相互作用可能具有的对称性的考虑来构造的。相继出现了人工色理论 (一种取代希格斯机制的理论), 水平对称性, 左右对称性, 弱电强大统一理论, 超对称大统一以及粒子复合理论。虽然这些理论大都能回答些标准模型不能回答的问题, 但是, 由于它产生的新问题, 或者给出与实验不符的预言, 至今没有一个成为描写高能粒子现象的完整理论。比较起来, 最好的仍然是标准模型。

然而, 存在一个例外, 这就是超弦理论。在这个集规范原理、超对称和克鲁查-克莱因观念之大成的量子场论中, 用一维弦来代替原来量子场论中的点。该理论只有一个参数, 并且是能统一描写所有粒子和包括引力在内的所有基本相互作用—描写“一切”的理论。虽然它十分复杂深奥, 并且至今不能做到在一定条件下自然得到标准模型, 也不能进行可预言实验的定量计算, 但对它的研究仍在继续。原因是该理论有一个重要的吸引人的性质, 只有在 10 维时空的情况下, 它才能自洽地描写包括引力在内的所有相互作用, 并且只存在五种模型。研究表明, 这五种模型还存在着某种联系 (对偶性质)。因而一些处在前沿的研究者感觉到, 可能存在一种非微扰量子场论——M 理论, 它可以统一描写这五种模型。研究和寻找 M 理论成为这方向研究热点, 是目前基本理论相当活跃的领域。

#### 四、困难与前景

无论是实验, 还是理论, 目前都处于攻坚阶段的困难时期。其原因有如下几点:

1. 实验规模宏大、周期长、结果少、投资多。进行每个实验几乎都需要上百人。从实验项目论证, 加速器和探测器的设计制造, 到取数据大都需五年时间, 一个人能参与具有新发现的实验, 一生也就几次, 投资之巨大更是空前的。而且, 获得物理结果随能量增加的速度远远低于它所需投资增加的速度。如何组织这么巨大系统才能全面有效地分析所获资料, 有效而又正确地认识自然规律, 是个相当复杂而又困难的问题。

2. 高能粒子物理学所研究的对象太复杂。比如原子系统一般我们只考虑原子核与电子的电磁作用就可以了, 而高能粒子, 比如强子, 它可同时参与弱、电、强三种相互作用。而且实验测量的物理量可能不是基本理论直接描写的量。这样给描写粒子行为带来很大困难。致使参与粒子物理研究的众多研究者, 由于他们研究的具体物理现象和理论问题之不同, 彼此很难了解各自的细节。

3. 经典物理所研究的现象是普通人日常

见到的现象。即便研究成果不能很快应用于实际,但它涉及到人们共同见到的现象的解释而与人们的思想观念相关,普通人也是关心的,而高能粒子物理只限于极少数研究者所了解,研究成果的意义平常人很难了解,因此,它很难在普通人群里产生人文社会效益。

但是,高能物理毕竟是建立在现代科学技术之上的实验科学,其理论是建立在严格的数学逻辑基础上的。因此,尽管遇到这么大困难,只要人类对未知的基本物理的追求存在,高能物理研究就应当继续。而且,高能物理研究现在已经显示出它的“基础”意义,高能物理研究在推动高科技发展和带动其他基本物理研究上起到了重要作用。

(1) 在天体物理研究中的应用,来自宇宙的高能 $\gamma$ , $\nu$ 以及原子核带来了产生它的天体的物理信息。因此,天体物理学家广泛地利用探测到这些粒子的性质和粒子物理来分析这些信息以研究天体的形成,演变。

(2) 已应用于宇宙学的研究。按照宇宙学标准模型,早期宇宙是由处于高温高密的高能粒子组成的。它的演变过程势必经历粒子物理研究的各个能量标度。因此,粒子物理已自然地应用到早期宇宙的研究。而且,天体物理研究,宇宙学研究和高能物理研究已产生相互结合的倾向。

(3) 核子之间的强相互作用是夸克构成核子后剩余的强作用力。因此,研究核现象势必要考虑量子色动力学和夸克结构的效应。

(4) 量子场论方法已应用于统计物理的研究。

(5) 对凝聚态物理研究已产生重要影响。

(6) 超弦理论的研究促进了可积模型,量子群,共形场论的研究,推动了微分几何和拓扑学的研究。

(7) 对人类文化素质的影响。高能物理现在已探索到尺度在 $10^{-15}$ 厘米的物理深度,研究的现象是粒子在 $10^{-22}$ 秒极短时间的行为。对这种观测难度非常大的现象的研究,不仅要求研究者具备扎实的科学基础知识和经过严格

的训练,而且还必须具备勇于创新,敢于求真的精神才能取得真正的进展,因此,高能物理研究取得的任何进步都是人类认识未知世界的能力的标志,都将对人类精神产生健康而深刻的影响。

另一方面,高能物理研究的开展推动了高科技的发展:

(1) 高能物理研究要求其设备所具有的精密的控制技术,要求探测器所具有的高灵敏度和分辨能力,以及大量的数据处理,大大地推动了电子学技术和电子计算机的硬软件的发展。

(2) 加速器的设计和制造,直接导致了具有广泛应用前景的同步辐射光源的设计制造;并且为医疗和诊断提供了新的手段。

基本物理研究的突破最终取决于实验。突破性的物理观念来源于实验。针对目前高能物理研究现状,实验上,有可能在精确系统地检验标准模型基础上发现新物理外,我们也寄希望于 SLAC, KEK, FERMILAB, CERN, DESY 的新型实验上能够获得超标准模型的新发现。另外非加速器物理中关于 $\nu$ 的探测,也可能获得新的结果。历史经验告诉我们,物理研究中的实验观测时常会产生奇迹。一些例子可以说明。由于来自探测大气带电探测器的信号的突然中断,范阿仑发现了电离层;60年代贝尔实验室的彭齐亚斯和威尔逊在研究电话杂音的时候,发现了宇宙2.7K本底辐射;安装在地下的探测质子衰变的探测器,突然记录了许多来自宇宙的中微子事例(探测质子衰变的本底)而发现了超新星1987A。这些例子都说明,实验上意想不到的发现常常是可能的。理论上,除了继续分析研究检验标准模型的实验结果以寻求建立完备理论的突破口外,M理论研究的进展或许会带来新的物理观念。总之,在今后的十几年里,粒子物理研究可能处在关键时刻。或者产生新的物理观念以建立粒子物理的完备理论,或许新的实验结果继续与标准模型相符。如果是后者,我们就不得不重新认识我们的“物理学基本理论”的含义。