

目 录

前言

物理学家自然概念的发展	(1)
认识物质结构的三个阶段	(12)
物理学和天体物理学目前最重要和最有意义的问题是什么?	(21)
奇异的超光子	(38)
基本粒子物理学展望	(46)
基本粒子相互作用的统一理论	(57)
强子的袋模型	(70)
质子与中子的结构	(80)
继续寻找夸克	(94)
寻找部分子的组分	(103)
宇宙是核物理学与基本粒子物理学的热实验室	(105)

物理学家自然概念的发展

P. A. M. Dirac

〔编者按〕 1972年9月在意大利里亚斯特国际理论物理学中心举办了一次关于物理学自然概念发展的国际讨论会。会议从历史角度评述了本世纪内物理学自然概念的发展和现状,并展望了未来。下面译出的文章就是狄拉克在这次国际讨论会上所作的演讲。狄拉克是量子力学的创始人之一,对近代物理学的发展有重要贡献。他在这篇文章中根据物理学发展中的几个关键问题,反复阐明了物理学的重大发展在于克服成见,在于创新,并指出物理学将来的任何发展必然要改变某些现有的概念,这是这篇文章的积极方面,有一定的参考价值。另一方面,他对物理学的发展与生产实践的关系缺乏唯物主义认识,对新的自然概念的形成和发展根源作了不正确的论述,夸大了物理学家个人的作用,数学的作用。这篇文章具有一定的代表性,我们全文刊出,以供读者在探讨和分析现代物理学的发展时参考。

在回顾物理学的发展时,我们看到,物理学的发展可以描绘为一个由许多小的进展所组成的相当稳定的发展过程,再叠加上几个巨大的飞跃。当然,正是这些大飞跃构成了物理学发展中最有意义的特征。作为背景的稳定发展大都是逻辑性的;这时人们得出的一些思想都是按照标准的方法从以往的结果推导出来的。但是一旦有一个大飞跃时,这就意味着必须引入某种全新的观念。

这些大飞跃经常是在于克服某个成见。我们曾有自古以来形成的种种成见,我们曾经不加思索地接受了某些东西,只因为它们似乎是如此显然,不容置疑。然而物理学家发现,必须对这些成见提出疑问,必须以某种更精确的东西来替代这些成见,从而导出某种全新的自然概念。

在这些飞跃中狭义相对论提供了一个最好的范例。狭义相对论表明,我们必须抛弃同时性有绝对意义的观点。两个事件是同时的这句话有精确的意思,绝对的涵义,这一点在以前的物理学家看来是显而易见的。但是,当人们开始做涉及光传播的精密实验时,考虑到光传播的有限速率后,他们就认识到不得不放弃上述观念。正是爱因斯坦真正抓住了放弃同时性绝对概念的必要性,并代之以新的时空图象,其中时间表现为第四维,空间与时间要合在一起考虑,空间与时间服从一些变换,在这些变换中时间轴方向是可以变动的。这就向前迈进了非常大的一步。它导致了几乎整个物理学都有改造的必要。

在此以前,我们已习惯于三维空间中的矢量与张量的概念。张量是一个明确的物理概念。从数学上看,只要指定了一个张量相对于某个坐标系的各个分量,就能够描述这个张量。张量的性质是:当我们变换坐标系时,它的各个分量的变换是线性的。然而,我们

可以认为张量的存在完全不依赖于任何坐标系。张量正是以某种方式嵌入空间中的某种东西,而坐标只是对它进行数学描述才是必须的。

随着狭义相对论的诞生,所有三维空间中的矢量与张量都必须变成在四维的时间和空间中的相应量。这就意味着这些矢量和张量都必须有更多的分量。物理学家过去认为一个矢量是嵌在三维空间中的,从而要求有三个分量来确定它,现在变成了嵌在四维空间中的某种东西,就要求有四个分量了。所有的物理概念都必须依照这样的方式加以改造。

如果我们考虑三维空间中的动量概念,那么它必须用一个第四分量来扩展它,这个第四分量正好就是能量。在此以前,我们有动量守恒定律,还有一个独立的能量守恒定律。而现在这两个定律统一起来了。我们有了动量与能量的统一概念,也就有了一个适用于整个概念的统一的守恒律了。

现在我们可以考虑更为复杂的一些量。例如在三维空间中的应力张量,当过渡到狭义相对论时,就应把它们加以扩展而加进几个分量;这些分量具有动量流与能量流的性质。

联系到角动量时发生了一点问题。在普通三维空间中角动量是一个矢量,但应该作为一个轴矢量来处理,轴矢量是两个普通矢量的矢积。当我们把这样的矢量变换到四维时,就形成一个二秩张量的一部分,这个二秩张量对它的两个脚标是反对称的。这就要求增加三个新的分量,从而问题就来了:“这三个外加的新分量究竟是什么呢?”角动量本身当然是一个颇为重要的概念,可是为了对它进行四维描述而新添加的三个分量却不那么重要;因为它们具有对四维空-时的某个轴的转矩性质,所以它们具有瞬变的特性。我们有角动量守恒定律,它在非相对论性理论中起着重要的作用。而三个附加的新分量也是守恒的,但是,由于它们的瞬变性,也就没有任何持久性,因而它们是不重要的了。只有在非相对论性的意义上,也即是我们有了一个有意义的特殊时间轴后,角动量才有重要的应用。

我们这里讨论了狭义相对论所引起的一些变化,这些变化全都是由于纠正了绝对时间这种成见而来的。当进入广义相对论时还有进一步的变化,其情况大体类似。这里我们必须克服的成见是:认为欧几里德空间适用于物理世界。欧几里德的一些公理,在许多世纪以前就已经确立了,如果你只是假定它们,并进而推出各种结果,那么它们当然是好的公理,这些结果就构成了欧几里德几何学。但是,成问题的是:这些公理真的适用于物理学家所量度的任何距离吗?人们一向总是假定它们的确是如此,因为许多观测结果表明,至少它们可以适用到很高的精确度,于是人们就有了成见,主张它们是完全精确的。

然而,原来这是一种必须抛弃的成见。物理学家所量度的距离并不符合于欧几里德几何学。我们怎样知道这一点呢?这个差别是极微小的,以致不能用直接观测量显示出来。或许在将来某个时候,当人们能够以高得多的精确度进行观测时能证明这种差异。我们现在只是从间接方式发觉了修改欧几里德几何学的必要性。

这种对欧几里德几何学的背离,涉及到假定的空间应当被描绘为在一个更高维空间中的弯曲空间。在这里又是爱因斯坦引了路,他感到必须使引力适合于相对论。牛顿曾假定,平方反比定律支配着所有的物体,但是,由于它涉及到超距作用而受到了非难。哲学家认为,一个物体不能在它所不在之处起作用。因此,牛顿定律就一定存在某种错误。其实这并不是一个有力的批判。我们可以引进场的概念嘛。

当某一物理量在空间所有各点上都有它的值，而且通常是连续地从一点变化到相邻点时，在物理学上我们就说存在一个场。于是我们发现，利用具有牛顿势的场，牛顿引力定律就可以表述为另一种形式；用了这种场的表达方式，我们就避免了超距作用。一个粒子只在它邻近的场的作用下运动。

这种场表达法使哲学家感到满意，但对物理学家而言，场表达方式与超距作用表达方式是完全等价的，因为只需通过一种数学变换，就可以使两种表达法相互变换；而且在应用于实例时，两种表达方式总是给出相同的结果。但是，也有一些其他方面场表达方式显得更为优越些。

现在让我们进而考虑一下电动力学。一些基本定律，例如库仑定律，都涉及到超距作用。这些定律是不准确的，必须重新加以表述。麦克斯韦给出了改进过的定律，这些定律涉及场的表达方式，它导出了电磁波的存在。在这里大家看到，用场表达方式可能有一个发展，而用超距作用的表达方式是不能得到的；这就证明了场表达方式是优越的。

这样，按照爱因斯坦的广义相对论，为了描述引力，场表达方式就成为必要的了。于是建立了包含若干场量的新方程，其中以十个势代替了牛顿理论的一个势。然而，关于这一点我不打算多谈它的细节。

这样，在我们的空间概念上有了一个十分大的发展。首先，从三维过渡到了四维，然后，引进了弯曲空间的概念。这样得到的空间就是黎曼空间。人们有时怀疑，物理学家修改空间概念的过程是否就停止在这一阶段了？我们还有电磁场，它在许多方面类似于引力场。这两种场都涉及长程力，正是在这一点上，它们和原子理论物理中的其它场不相同。

人们曾经设想过，在电磁场与引力场之间应当有某种统一性。自从爱因斯坦证明了引力场能够用几何概念加以阐述后，人们就猜测，电磁场也有可能用几何概念来阐述。黎曼几何是爱因斯坦引力理论的基础，而要解释电磁场就需要有比黎曼几何更为普遍的一种几何学。沿着这些途径曾做过大量工作，但结果还都不能令人满意。我不想去谈物理学概念中许多不成功的发展，而只谈谈那些成功的方面。在这种条件下，我们应当保留爱因斯坦空间，即四维黎曼空间，它一直保留到今天，仍然构成了物理学的基础空间，所有物理学过程都必须认为是嵌在这个基础空间之中。

所有这些构成了物理概念一个方面的发展。近代出现的另一个主要发展是量子理论，或者说原子结构理论。

然而，如果我们讨论量子理论这个问题，我认为我这演讲的题目就有点不恰当了。这个题目是：《物理学家自然概念的发展》。这个题目有可能暗示，所有物理学家对他们的概念的发展都具有相同的观点。实际上对于量子理论，情况并不是这样。有许多新的概念并不是像相对论的情况那样容易解释。这些新概念是更难理解的；而且对于这些概念中哪些是重要的，哪些是基本的这个问题，各个物理学家的看法也是极不一致。我想，把这次谈话的题目改为《一个物理学家自然概念的发展》也许更恰当一些。我要讲出我自己的观点，但是，一开始我就要说，我并不认为这是唯一可取的合理观点。还有其他的观点也是许可的，也有人为之辩护。我之所以采取如下的观点，是因为我已经发现它是我自己认为最为成功的观点。

量子理论的发展已经通过了几个大的阶段。其中第一个当然是普朗克引入有限大小

的能量量子来描述电磁场；这曾是物理学家难以接受的概念，然而实验证据迫使他们不得不接受它。接着是光谱学提供了大量数据，这些数据在开始时是非常令人困惑不解的。一直到出现了里兹光谱组合法则，指出每一条光谱线的频率可以表示为两个谱项之差，才算是从中找到了一些规律。但这只不过是一种权宜之计，只是在玻尔建立了他的原子模型之后，才真正提供了一个理论。玻尔的这一模型也许是原子理论进展中最大的一步；因为它表明可以把经典力学应用于原子内部，应用到原子中运动的电子上，只要我们加上某些额外条件和作出某种近似。所作的这种近似是忽略辐射阻尼，必须加上的额外条件是决定玻尔定态的量子条件。这些的确是物理学家对于自然概念的非常巨大的进展。这些进展也许是太激烈了，不能认为只是克服了一些成见而已。

在引进了玻尔定态后，物理学的进一步发展指出了需要有一些联系两个态的量。而引出了玻尔频率条件的里兹组合定则指明，谱线的每一频率都同两个态有联系。以后爱因斯坦引进了发射系数与吸收系数，也都是同两个态有联系的。这样，有关同两个态有联系的物理量的想法就得到了发展。有一个重要的克拉末-海森堡（Kramers-Heisenberg）色散公式全是用同两个态有联系的物理量构成的。

这一点促使海森堡向前迈出了他确有见地的一步，从而产生了新的量子力学。他的思想是建立一种理论，可以完全用与两个态有关的量来表述。与两个态有关的量可以写成一个矩阵行列，因此我们必须考虑由数字组成的整个矩阵。这样，海森堡的真正重要贡献不仅在于他引进了所有这些矩阵元，而是在于他认识到，矩阵这一整个复合体是同力学变量一一对应的重要物理概念。

由此得出的结果是，力学变量都要服从一种与矩阵代数类似的代数，其中我们可以实行加法与乘法运算，但乘法一般是不对易的，即 $a \times b$ 通常不等于 $b \times a$ 。因此我们不得不同服从这种代数的力学变量概念打交道。

从一开始，当我第一次看到海森堡提出这些思想的原始论文时，我似乎觉得，其中最重要的思想就是：我们必须去处理服从不可对易代数的力学变量。我给这些力学变量引入了一个新名称，叫做 q 数；而数学中通常的数需要与 q 数相区别时，我称之为 c 数。 q 数变成了物理学家必须熟悉的一个新概念。它代替了物理学家从前经常运用的力学变量。它们两者遵从不同的代数。一开始在我看来 q 数似乎是某种很神秘的东西。正是为了发展理论，并把它应用于实例，我曾经对它们作了几个假定。这些假定虽然一度是错误的，但是， q 数的概念终于得到了发展。

当初， q 数的数学性质是我们完全不知道的。但是，从它与海森堡的形式体系联系中可以清楚地看出， q 数有时候可用矩阵来代换。以后弄明白了 q 数总是可用矩阵来代换的，就像我们今天常说的， q 数可以用矩阵表示。但是， q 数用矩阵表示可以有多种不同方式。矩阵应看成是 q 数的一组坐标，正如张量的各个分量构成张量的坐标一样。我们可以把张量看成是不依赖于任何坐标系而独立存在的量，同样地，我们也能认为 q 数是不依赖于任何矩阵系而独立存在的量。

一旦清楚地了解了 q 数总是可用矩阵表示，它的数学性质自然也就不再神秘了。我们可以对它进行任何工作，由此也能够改正我早期的一些错误。对 q 数剩下的问题只是找出具有物理意义的某种概念，它不依赖于任何矩阵表示，从而可以如同张量一样地进行运算。

关于 q 数的早期工作正是运用含有不对易乘法法则的适当代数来进行代数推导；当然，对这些推导结果的解释那时是很模糊的。人们在解释一些简单例子中曾作了一些猜测。他们发现某种解释能给出正确的答案，这种解释就以这种方式逐渐地被推广并建立起来。

量子力学的普遍诠释曾得到了另一发展的巨大帮助。这一发展主要应归功于薛定格按照德布罗意的思想所进行的工作。由此在物理学中引进了一个新的概念，即原子理论中态的概念。

在经典力学中我们已经有过态的概念。当我们考虑一个给定的经典系统时，从运动方程的各种解中可以得到各种可能的运动状态。但是，特殊之处在于，一个量子态并不正好对应于一个经典态，它可以对应于一组经典态，我们称之为一族经典态；一族中的各态相互间有特殊的数学关系，这种数学关系是哈密顿在一百年前发现的。哈密顿只是考虑到数学上的完美，并尝试对运动方程给出强有力的表达，才发现了经典态之间存在这种特殊的关系。然而，哈密顿的这个工作正是理解量子态所需要的一种准备。每个量子态对应于一个哈密顿的态族。

此后，惊人的事物出现了：量子态之间有叠加关系。这就意味着，可以把它们描绘为某种矢量。它们是这样一种量，能与同类量相加，得出之和仍为同类量。严格地说，一个量子态不是对应于一个矢量，而是对应于一个矢量的方向，不过这一点并不重要。在量子理论中对应于一个物理状态的矢量，一般是在一个无限维数的空间里；引进适当的收敛条件后，这些矢量就变成希尔伯矢量。

于是我们得到了一些在物理学中已变得很重要的新矢量。每当一个新的概念变得重要时，我就喜欢给它一个新名称，就像 q 数的名称那样。为此我把这种新矢量命名为“态矢” (ket)，我不想多谈这一命名的理由。这样，我们就有了这些对应于物理状态的态矢，而且有了 q 数与态矢之间的关系。一个 q 数可以乘在一个态矢上给出另一个态矢，或者换一个说法，也可以称 q 数是能够作用于态矢上的一种线性算符。

物理学家曾不得不去习惯这些有关 q 数与态矢的新概念。

q 数能用矩阵表示。当我们这样做时，也就可得到态矢的相应表示式，这就是说，我们对每一态矢得到一组坐标。这些坐标就是我们通常所说的波函数。称它们为波函数的理由是：在早期的实例中，如薛定格第一次所表述的，当我们把这个理论用于单个粒子，并且采用了适当的表象后，态矢的这些坐标正好在三维空间中构成一个波状函数。现在人们已十分广泛地采用波函数这个术语来表示态矢在任何坐标系中的坐标了，甚至当其结果与波没有一点联系时，也称之为“波函数”。

这就是波进入量子理论的过程。波是表示物理状态的一个方式。目前，有些物理学家倾向于认为，波可能是原子理论中最根本的东西，而粒子则是比较次要的。我本人并不同意这个观点。我们用波描述事物可以用得很广，但我不认为，试图把它用在全部过程中是方便的。我愿意采用我这里向你们介绍的这种图象，即粒子的变量由 q 数组成，粒子可以处于不同的态内，而这些态是由波函数来描述的。

用了这些概念就能得到量子力学的一种强有力的物理诠释。我们就可以得到一些普遍规则，用来计算对一个特定态某力学变量取某些值的几率。

到现在为止我谈到的重要事情是，我们计算的是几率，我们并不能从一些给定的初始

条件计算出某一事物一定会发生。它意味着这种解释是统计性的。我们没有经典力学中的决定论,这是物理学家不得不去习惯的又一概念。他们必须放弃偏爱决定论的成见,而放弃这个成见却是非常困难的。有些人还在希望以某种方式重新引进决定论,例如也许可以采用隐参数或某种类似的东西,但这些并不是按照一般认可的观念进行的,我还可以补充一点,我个人仍然持有这样的成见,不主张在基本物理学中有非决定论。但我不得不接受这种非决定论,那是因为在目前我们还没有任何比这更好的东西。有可能未来的某种发展又可以使我们回到决定论,但这只能以放弃某些东西为代价,即放弃某种目前我们还非常强烈坚持的成见。

然而,对于未来会怎么样,现在可以猜测到的不多。在这里我只是想说,如果你对物理学基本定律中存在非决定论感到不安,那决不只是你一个人有这种感觉,很多人都是如此,我也是这样。薛定格和爱因斯坦就一直强烈地反对这种非决定论。但是,我们必须承认,它是我们目前的知识状态下所能做到的最好办法。

在引入了这些态矢或波函数之后,接着的一个巨大发展就是有关理论应用于许多同类粒子的问题。波函数将包含所有这些粒子的变量,并且可以认为,波函数在这些粒子之间是对称的。倘若自然界开始的一个状态在这些粒子间是对称的,那么它就总是保持着这种对称性。于是我们得到了一个自然规律,即在自然界中只出现对称波函数。这是一种新类型的规律,它同经典理论中所能想到的任何东西都是完全不相关的,我们也不能把它看成是克服了某一成见而得到的东西。

另一种可能性是,只有反对称波函数出现于自然界。

看来自然界的确是按照这样两种可能性构成的。有一些粒子只出现对称波函数,称之为玻色子;另一些粒子只出现反对称函数,称之为费米子。

现在,我想回到 q 数的概念,并略讲一点这一概念可能有怎样的发展。引进 q 数首要的是使它们起着类似于经典力学中变量所起的作用。我们需要知道它们之间的对易关系。如果我们已知 ab 不等于 ba ,我们就需要某种假定来告诉二者之差 $ab - ba$ 是什么。对于具有经典类比的那些力学系统,不难猜测出这个量就是泊松(Poisson)括号。通过这种联系,量子力学形式体系就成为经典形式体系的推广。如果我们有一个经典力学中的特定系统,它包含一些特定的粒子按特定规律的力相互作用,我们就可以谈论量子力学中的相应系统了。

然而,这样一来,就有可能发展 q 数的概念,把它应用到作用于态矢上任意线性算符上。按照这种方式,我们可以引进一些在经典力学中没有任何类比的 q 数,而这样就可以使量子力学形式体系的能力大为增加。

我可以举一个例子。如果我们取一个波函数应用于几个同类粒子上,那么它将包含 n 个粒子的变量 $q_1, q_2, \dots, q_n$,其中单变量 q 集中代表描述一个粒子所需的全部变量。然后,我们可以考虑一个排列算符,它使这些变量有一个特定的排列,例如,它可以是只把 q_1 与 q_2 互相交换。现在每一个这样的排列算符应当被看成是一个 q 数。它服从于一些运动方程,就像海森堡理论中其他力学变量的运动方程一样。但是这样一个 q 数同经典理论中的任何东西都大不相同。它没有经典类比。

现在,如果我们把这样的理论应用于那些对称波函数,那么,作用于这样一个波函数上的任何排列算符都会等于1,这就是说,我们有一个 q 数总是等于1,这是没有多大意

思的。同样地,如果我们将排列算符作用于一个反对称波函数,我们得出一个算符,按照它是偶排列还是奇排列而等于 ± 1 ,这也是没有多大意思的。但是,我们考虑一类更普遍的排列算符时,就可以得到一些有意义的结果。假定我们所考虑的粒子带有自旋,我们可以考虑一个排列算符,它只涉及粒子的位置,而不对自旋进行排列。现在这样的排列算符不是 ± 1 ,而将是某种更为普遍的东西,我们可以把它们看成是力学变量而建立有关这些排列算符的理论,从而得到一些有意义的结果。

我们能够以这种方式发展 q 数,从而引进一些完全没有经典类比的力学变量。

现在我想谈一谈另一方面的发展,即考虑一些改变粒子数的算符。它们把粒子数或者增加1,或者减少1。这样的算符就是发射算符或吸收算符。可以把这些算符引进理论中。它们和我们以前谈过的 q 数是完全相似的。它们也服从运动方程。把这些算符引进理论后,就允许我们建立一种形式体系,其中的粒子数目是能够改变的。在经典力学中我们没有这种可能性,而把这种可能性引进量子理论却是毫无困难的。

上面我所谈的内容向你们展示了量子力学的发展;你们看到,它的确是一个工作得很好的很有力的理论。它的唯一严重缺点是它不是相对论性的。全部过程我们都应用了海森堡最初的运动方程,这些运动方程包含 d/dt ,涉及一个特定的时间变量,而这一点是同相对论矛盾的。到现在为止,我们已谈到了物理学的两个方面的发展:相对论与量子力学。我们怎样把它们联结在一起呢?物理学必须统一起来。我们必须有一个既符合相对论原理又符合量子论原理的单一理论。我们怎样才能得到这种理论呢?

我们先取一个简单例子,即单个粒子的情况。我们可以建立这个粒子的波函数,它包含描述粒子位置的变量 x, y, z ,如果我们认为它是随时间变化的,还必须使波函数包含时间变量 t 。这样我们就有一个包含这四个变量的波函数,这样的波函数就是我们能够作相对论处理的对象,只要假定这四个变量描述空-时中的一个点就是了。我们可以尝试对这个波函数建立一个符合量子力学普遍原理的相对论性的波动方程。事实上这样做是可能的。而令人吃惊的是(它第一次出现时确曾使我大为惊讶!):这个问题的最简单的解并不出现于没有自旋的粒子的情况,而是出现于自旋为半量子的粒子的情况。半个量子的自旋看来在自然界中占据着一个特殊的地位,也就是说,对这样的粒子有可能建立一个相对论性的量子理论,它既符合狭义相对论的全部要求,也符合量子力学定律。

我们必须引进半量子的自旋。而这又涉及物理学家必须习惯的一个新概念,一个称之为“旋量”的新概念,它是张量概念的推广。人们把一个张量设想为嵌在空间中或空-时的某种东西,我们可以想象把转动算符作用在它上面。旋量也同样是嵌在空间或时-空中的,我们也可以把转动算符作用在它上面。但旋量的性质是:如果我们把它绕一个轴转动一周,我们所得到的结果将是在开始的旋量上加一个负号,而不是像张量那样,绕轴转动一周恰好回到开始时的张量。从数学上看,这样的量是完全可能的,即是嵌在空间中的量,若使它们绕一轴转动一周,它们就改变符号。为了描述半量子自旋,我们必须引进的正是这一类量。

在相对论性的波动方程中自然地出现的自旋半量子确是非常有用的,因为在自然界的基本粒子中有许多的确具有这种自旋,特别是电子和质子。这样,我们就有了一种理论,它特别适用于电子。

但是,从刚开始就出现了一个困难,即是当应用解释波函数的通常法则时,我们发

现,这个理论在正能态外还允许有负能态出现.这真是刚一迈步就遇到了绊脚石.然而结果却是,只要以改变我们对真空的概念作为代价,就能够以很巧妙的方式克服这一困难.

早先物理学家总是把真空设想为完全没有任何东西的一个区域,然而这又是一个我们必须加以克服的成见.一个较好的真空定义也许是能量最低的状态.这样一来,如果电子具有负能量是可能的话,那么为了得到最低能量,我们就要求有尽可能多的这种负能电子.电子服从对应于反对称波函数的费米统计.它们满足泡利不相容原理,意即在任何一个态上的电子数不能大于1.因此,我们就得到一个空间区域中的最低能量状态是所有负能电子态都被电子所占据,而且每一个态上有一个电子.这就是我们所能有的最大的负能电子数.

一旦抛弃了真空是一无所有的成见之后,上述图象就是为真空建立的一个合理图象,其结果是令人满意的.它使我们有可能以两种方式建立起偏离真空的态,或者是使正能态上有电子,或者是使负能态上有“空穴”.而在负能态中的这些空穴就表现为带有正能量和正电荷的粒子,后来这种粒子就被解释为正电子.

利用真空的这种新图象,我们就有了从辐射能产生出物质的可能性.如果一个电子从一个负能态跃迁到一个正能态,那么我们就得到一个普通电子,并且出现一个正电子,这一跃迁所需的能量已被转换成物质形式了.

还存在着真空极化的可能性.我们可以用电场或磁场来改变负能电子的真空分布,这样就会出现一种真空极化.所有这些发展都来自电子的相对论性波动方程.

前面我说过,只要我们把相对论同量子理论相配合,就使我们得到半量子的自旋.但是已知有许多粒子的自旋不是半量子,有特殊意义的当然是光子,其自旋为1.对于这些自旋不是半量子的其他粒子,我们怎么办呢?这里存在着严重困难.

对于这种粒子,我们也能建立一个量子理论,办法是联系于空-时中的特定时间轴来考虑各种态,并进一步考虑当改变时间轴方向时,这些态如何变化.但是,我们遇到了一个困难,这些变化是非定域的.对于粒子的一个系集,我们可以建立一些场量,它们的变化确实是定域的,但当我们把它们解释为粒子的几率后,我们又得到某种非定域的量.

的确,我感到有一些量以非定域的方式变换,是与相对论的精神相抵触的.这里的意思是,有某一个量在空-时中联系于时间轴的一个方向,当时间轴方向改变时,这个新的量就不与原来量所在点的邻域的条件有关了,而是与某一远处的物理条件有关.这一点颇类似于超距作用的理论.它是违反相对论精神的,但它是我们目前所能做到的最好办法.

当我们考虑有几个粒子相互作用的情况时也会出现这一困难.我们目前能够表述的唯一理论是非定域理论,当然,人们并不满意这样的理论.我认为应当承认,把量子理论与相对论协调起来的问题还没有解决.物理学家现在使用的一些概念是不充足的.当我们形式地应用这些概念时,它们就显得很不自然了.

当我们考虑到例如电子与电磁场间的相互作用时,这个困难就变得最为明显.如果我们假定这一相互作用是由点模型电子所引起的,那么就会在方程中得到无穷大.这些无穷大当然是不可容忍的,我们必须用某种方式加以消除;而消除无穷大的自然方法是设想电子不是一个点电荷,而是电荷分布于某一区域范围内.

有许多物理学家假定了点电荷,然后利用运算规则来消除这些无穷大困难.他们说,让我们抛开普通的数学吧!让我们略去方程中出现的无穷大,当我们不需要它们时.这种

形式体系有时确能推导出一些结果,与观测值符合得很好,因而有许多物理学家对这种状态感到高兴。但是,我对这一点却是最不高兴的。我感到若我们只应用运算的数学规则,我们决不能得到确定的物理概念,而对这种状况物理学家是不应当满意的。

我还想提到最近人们谈得较多的一种思想,即重正化概念。早在洛伦兹的电子模型的经典理论中就出现过这个概念。按照洛伦兹的意见,电子在它的周围有一个场,这基本上是库仑场,如果电子运动时则应加上某些修正。这个场具有惯性,必须把这种惯性附加到电子质量上,因此电子的质量应当被看成部分是来自与它周围的库仑场相关联的质量,也有可能全部质量都是以这种方式产生的。

在这里,我们又必须抛弃电子的点模型概念,因为在点模型情况下,围绕电子的库仑场的质量会是无穷大。

这样,由粒子产生的场使粒子的原始质量得到修正。这个效应在量子力学中也继续存在,结果使我们在方程中开始用到的电子的原始质量变得不同于观测到的质量。观测到的质量称为重正化质量。这里的麻烦问题是,如果我们采用点状的电子,重正化效应成为无穷大。类似地还有电荷的重正化,它来源于下列事实:当我们有一电荷,这个电荷就在它的周围引起真空极化,真空极化在一定程度上要中和这个电荷,而且这个效应对于点状电子又是无穷大。

上面谈的是量子理论建立以来的整个发展过程。它表明了我们目前的处境是远远不能令人满意的,因为我们还没有能使量子理论适合于相对论。

近些年来在物理学中继续不断地出现的许多发展,都与引进新的粒子有关。这里我们又看到了物理学家必须克服另一个成见。大约1930年以前,物理学家认为只存在两种基本粒子——电子和质子。其理由是只有两类电性——正电与负电,而对每一种电只需要一种粒子,有了这两种粒子也就够了。在那个时候,对于提出新粒子的假说有着非常强烈的反感。

当我第一次提出在电子的真空分布中存在空穴的思想时,这一点曾使我迷失方向。我当时感到这些空穴必定代表着质子,因为它们肯定带正电荷。在刚刚开始的时候我曾想到,我应当认为它们是和电子对称的,它们的质量与电子相同。但是,存在一种带正电荷的具有电子质量的新粒子这一点,在我当时觉得相当不可思议。我曾推想,如果这种粒子确实存在,实验工作者肯定地早已发现它们了。

为什么当时实验工作者并没有发现它们呢?因为他们抱有否定它们的成见。那时实验工作者对粒子在磁场中沿着曲线轨道运动已做了大量实验。如果我们知道了粒子的电荷符号,那么弯曲情况就指明粒子沿径迹而运动的方向。实验工作者习惯地看到,电子从一个源出来,其径迹有相应的弯曲。然而,他们有时也看到了反向弯曲的径迹,他们就把这些径迹解释为偶然有一些电子是朝着源运动的,而不认为是从源发射出的带正电荷的粒子。这是当时的一般见解。当时人们否定新粒子的成见如此之深,以致他们从未去考察一下这些射入源内的电子的统计数字,也就看不到这种粒子的数量真是太多了。

大约1930年以后,对于新粒子见解的气氛完全改变了。许多新粒子被发现了,实验工作者与理论工作者都非常愿意提出新粒子了,那怕只有最微薄的证据。

还有一个成见是认定自然界不会存在非整倍数的电子电荷。自从密立根对电子电荷进行了非常精确的观测后,物理学家便假定,自然界的所有电荷都是电子电荷的整数倍。

然而,近年来已建立了一些涉及称为“夸克”的某种新粒子的理论。这种新粒子所带的电荷是非整数倍的电子电荷,普通一类夸克带有 $2/3$ 的电子电荷。

我记得有一次遇见艾伦哈夫脱 (Ehrenhaft), 他当时做了许多测量小粒子上的电荷的工作,他一直坚决地认为,他已发现了他所谓的次电子,即带有电荷小于电子电荷的某种粒子。人们都认为他是一个怪人,没有认真地对待过他的意见,他对此十分抱怨。但是,近来我想到,既然有关非整数倍电子电荷的普遍见解已经改变了,就值得再看一看艾伦哈夫脱的那些结果。艾伦哈夫脱的早期工作是完全不准确的,对电荷给出了各种各样的数值。然而后来却变得比较确定一些了。但是,他的工作与密立根的工作比起来,总是显得很不够精确,很不仔细。

我看过他探讨电子电荷的最后一篇文章,发表在 1941 年《科学的哲学》(*Philosophy of Science*, Vol.8, p. 403) 上。那里他附有一个图,指明了一系列实验的结果(见图 1)。图上横轴画出了他所观测到的电荷值,纵轴画出了粒子数。他做的实验类似于密立根的油滴实验,然而用的是固体小球而不是油滴。文章中所谈到的那些实验用的是红硒 (red selenium) 小球。在这条曲线上你们可以看到有两个十分明确的峰。一个主要的峰处于略小于 4.7 (即电子电荷正确值) 的地方,另一个十分明确的峰大约在此主峰的 $2/3$ 地方。我发现这个结果是相当有意义的,然而,可以认为艾伦哈夫脱真的已经发现了夸克吗? 其中令人烦恼之点,是他得到的这种次电子太多了。我觉得这是很使人为难的,而且艾伦哈夫脱也不是一个好的实验工作者。你们可以从峰的宽度看出他的结果肯定是不精确的。

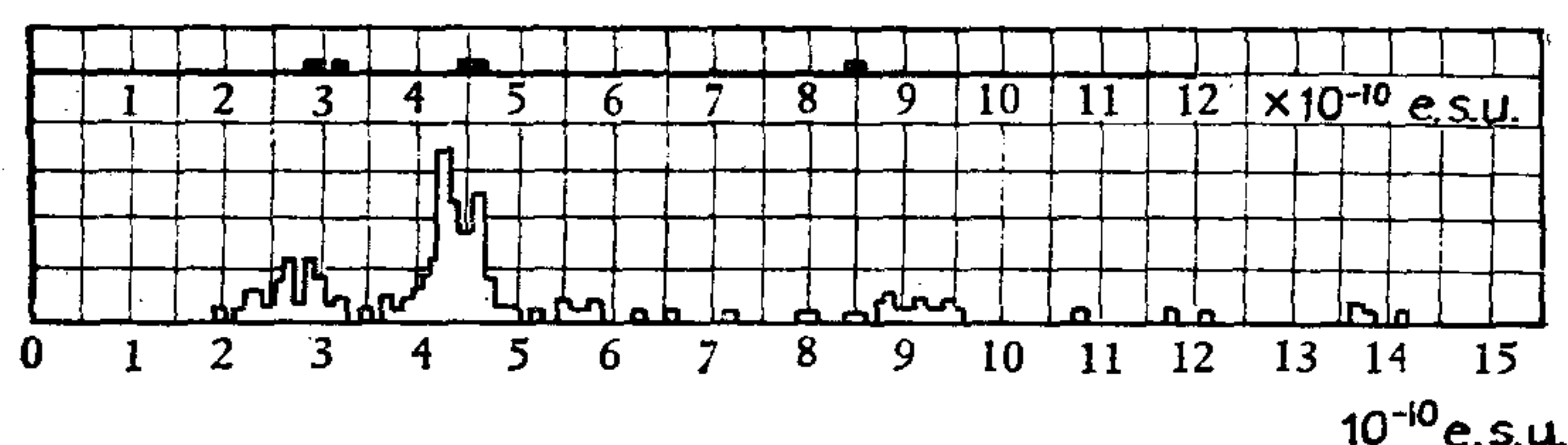


图 1

而且你在图上部还可以看到有几个黑方块。这些黑方块所代表的结果是他给出的粒子大小和粒子上的电荷。在这些结果中粒子的大小与其电荷间存在着一个相当确定的相互关系。粒子越小,所带电荷也越小。我认为这一点对艾伦哈夫脱是很不利的,当时他一定有过某种系统误差,致使较小的粒子表现为带较小的电荷。但是,恐怕我们将永远不会知道这两个峰的由来了,因为得出这些结果的全部实验具体记录在希特勒军队侵入维也纳时都已失掉了。

大约六星期前,在瓦伦纳(属意大利)有一个关于物理学史的暑期讨论班,出席这个讨论班的霍耳顿(Holton)博士讲到了测定电子电荷的一些老工作,他谈到了密立根的非常精确的工作,也谈到了艾伦哈夫脱的工作很不精确,在当时是很不受信任的。霍耳顿博士告诉了我密立根的一篇论文中的一个注解,我认为是十分有意义的,我愿意引用它。科学史家有时确实会发掘出埋没于文献中的某些有特殊意义的东西。密立根这一注解出现在他 1910 年发表的论文中,这篇论文描述了精确测定电子电荷的实验。我把密立根的注解引在下面:“我已去掉了在一个带电油滴上明显地看到的一次不肯定的没有重复出现过的观测结果,它给出这个油滴的电荷值比最终得到的 e 值大约要少 30%。”

从这个注解我们可以推知出两点：第一点是密立根的伟大的科学诚实。许多实验工作者每当得出一个结果与他们企图要得到的相抵触并与其它全部观测结果不相符合时，他们就简单地认为：“那一天我的仪器出了问题。我也不知道它究竟出在哪里，但是我无法重复这一结果，所以进一步去考虑它是没有任何意义的。在我发表我的工作时也不值得再提到它了。”然而，密立根却不是那样的人。他严谨而诚实，他必须提到那些和他企图要证明的结论不相符合的实验结果。其次我们可以推论出的第二点是，密立根只有一个油滴给出了不一致的结果。这一点使人怀疑是不是在那个油滴上有一个夸克？这一点我只能作为没有答案的问题留给你们去思考了。

最后，我愿对将来的展望略谈几句。物理学家的自然概念的发展当然不会就此止步。所以，对目前的一些概念赋予过分的重要性将是错误的。目前也许不过是一个中间阶段，我们必须认为将来的发展将是根本性的。我想将来的发展的根本性将不亚于从玻尔轨道到海森堡量子力学的发展过程。我不知道我们应该等待多久这些未来的发展才会出现。但是，它们肯定要出现，而且就像我在前面谈到的，这些将来的发展可能对决定论与非决定论的争论给予新的启示。

人们常常试图找出得到这些新概念的途径。有些人在当前量子力学的公理体系概念上下功夫。我认为这不会有任何效果。你们只要想像一下过去有人曾在玻尔轨道理论的公理体系上下过功夫，但并没有导致海森堡的量子力学。他们决不会想到把不可对易的乘法作为他们的公理之一提出来接受挑战。同样，将来的任何发展都必然会涉及改变某种东西，而这种东西到目前为止，人们还不曾提出过异议，它也不会由公理体系显示出来。

人们时常怀疑是否我们应该改变空间和时间的概念，例如，引进空间和时间的不连续性。但是，到目前为止还没有任何可以取代物理学中所采用的标准空-时的数学。我感到对这样一些问题过多的思辨是没多大用处的。因而我的讲话也就到此结束。

〔石雪译自《The Physicist's Conception of Nature》一书（Mehra 编，1973），

范岱年、喀兴林校〕

认识物质结构的三个阶段

原子和原子核的分类图象，提供了了解它们基本结构的钥匙。对于基本粒子是不是也是这样呢？

V. F. Weisskopf

一百年前，门捷列夫把各种元素排列在一张周期表内，使得杂乱无章的元素有了一定的规律性。但是，周期表所呈现的规律性仍是一个谜，这个谜一直过了五十二年，尼·玻尔根据原子的量子论，发表了他有名的“结构原则”之后才算解决。以后物理实验进一步深入到物质结构的内部，揭示了原子核的一些性质。当原子核按质子数和中子数排列时也发现了类似的周期性。1951年简森(J. D. Jensen)、迈耶尔(M. G. Mayer)、哈克尔(O. Haxel)和苏耶斯(H. E. Suess)提出了原子核的壳层模型，并以此解释了这些规律性。近二十年来用高能束流照射质子或中子本身，发现了许多新的短寿命的客体。近年来盖尔曼(M. Gell-Mann)、西岛和尼曼(Y. Ne'eman)在那些看来很紊乱的新“粒子”中发现了一些规律，但是，对这些规律性仍未找到解释。

我们深入认识物质性质的三个阶段是：第一阶段是认识原子的电子壳层结构；第二阶段是认识原子核作为中子和质子体系的结构；第三阶段是认识基本粒子的结构。在这三个研究领域里存在着有趣的相似性与明显的差异，每个领域都揭开了一个物理现象的新世界。

一、原 子

在十九世纪，物理学和化学是两门互不相通的学科。化学上处理的是“非物理的”概念，例如具有确定不变的特征形状与性质的不可分的原子，这些概念在当时的经典物理中是没有地位的。那一时期的物理学是研究固体、液体和气体的可连续变化的性质，它们决定于一些常数，例如弹性系数、粘滞性、介电性质、导电率及其他等，当时物理学不能解释这些常数的精确数值；它的目的只是在找出各种参数对物性的影响。

十九世纪的物理学还没有办法处理原子及其性质。诚然，已发现了电子，并且汤姆逊、洛伦兹和他们同时代一些人的工作，已猜测了电子在原子中的重要作用。然而，与电子有关的两个物理量——它的电荷 e 及其质量 m ，既不决定长度，也不决定能量。我们需要一个作用量子 h ，这是普朗克在1900年引入的，是他的一大贡献。

1900年是很重要的一年，不仅标志着世纪的转变，而且也标志着物理学的发展已达到了使化学概念“物理化”的高峰。量子力学是二十世纪的产物，证明了它是合理了解化学现象(例如原子的稳定性、它们的大小和激发能)的基础。它提供了长度和能量的原子单位，这

就是玻尔半径和里德伯常数，它们可根据电子受到原子核的库仑引力和电子在一确定空间区域中的量子力学零点能量之间的平衡而得到。量子力学还把一个“形状”因素引入了物理学，量子力学的基本方程决定了反映原子或分子状态内禀对称性的特征形状和式样。

量子力学也对化学键的空间排列给出了物理解释，并且发现了观察到的化学性质的稳定性和不可改变性，是由于存在着分立的、完全确定的量子态的结果。这样，化学的思想和概念就包含在量子物理学中了，于是化学不再是一门和物理学互不相通的学科。

1. 玻尔的直觉

原子的量子论是玻尔解释门捷列夫周期表的基础。但是，玻尔在1921年，在量子力学建立之前，甚至更为惊人的在泡利提出不相容原理（1925年）之前，怎么能够预料到了正确的解释呢？

玻尔构思他的原子的办法是，每次一个地依次把电子一个一个地加到元素上，逐步得到不同的元素。他的直觉想象力如此之强，以致他已猜测到了这样的规则：在每一轨道上不能放入两个以上的电子。玻尔从原子光谱的性质中了解到这一事实，他在研究门捷列夫周期表时想象到了这一点。为了努力地了解轨道的双倍占有数，他谈到了“厌恶接受量子数相同的更多电子”。他推测“只有当电子相互和睦时，才可能接受具有相同 m 和 k 的电子”。

泡利是一个伟大的评论家和严肃的人，他并不喜欢这种牵强的解释。早在1921年，他就已意识到，在这些规律性的背后隐藏着一个颇为重要的原理。作为泡利态度的一个有趣的证据，我想引用欧洲核子研究中心（CERN）泡利藏书中一本书上的批注。这本书内有玻尔的关于“结构原则”的一篇著名论文。当讨论到把第11个电子加到10个电子的闭壳层时，玻尔指出：“我们必须期望第11个电子（钠）跑到第三个轨道上去。”泡利显然被这样的话激动了，他急急忙忙地写下了有两个惊叹号的批注：“你从光谱得出的结论一点也没有道理啊！！”

过了四年，泡利在仔细地分析了原子光谱和强磁场内的塞曼效应之后，明确地建立了他的不相容原理，使玻尔对元素周期系的解释有了牢固的基础。十五年以后，在1940年泡利又证明了不相容原理对自旋为半整数的粒子不是附加的新原理，而是相对论性波动方程结构的必然结果。

随着量子力学的发展，化学概念不再是“非物理的”了，这是朝着科学的统一性跨出的重要的一步。原子之间的各种相互作用力过去曾表示为化学力——范德瓦耳斯力、附着力、粘滞性、电力、毛细管现象等，现在就可以归结为一种熟知的自然相互作用力，这就是电子与原子核之间的静电吸力。这种吸力的效果按照具体情况，由量子力学规律决定。

2. 基本数字

原子和分子的量子力学受两个基本数字支配：一个是精细结构常数 $e^2/\hbar c$ ，另一个是电子和核子的质量比 m/M 。对观察到的现象的特征来说，这两个数字的微小值是至关重要的。如果 $e^2/\hbar c$ 接近于1或者更大，那末，在原子力学中相对论效应将是主要的。例如，正、负电子对将是原子的重要组成粒子。

如果质量比 m/M （影响分子结构的要素）不是一个小量，物理学和化学将完全不同。

分子内原子核之间的平均距离由电子轨道大小决定,这一长度可看作电子零点振动的振幅.原子核所受到的力,其大小与电子所受到的相同(牛顿第三定律),但是核的零点运动却比电子小了一个因子 $(m/M)^{1/2}$;由于这个缘故,原子核在分子内的位置是完全确定的,它们组成各种分子结构的骨架,包括晶体和大分子的骨架.假如质子的质量和电子的是同一数量级,那就不会有化学,也不会有固体,最后也就不会有生命,不会有思维来考虑问题了.

为什么有这种质量差别,现在还不知道.但肯定它与核子之间存在的强相互作用有关,这是近代基本粒子物理学的中心问题之一.在没有弄清楚为什么核子质量重、电子质量轻以及电荷为什么用单位 hc 量度的原因之前,我们就不可能认为已从根本上了解了我们周围世界为什么是我们现在所看到的这种状态.

二、原子核

我们的化学与生物世界只能存在于这样的环境,其中粒子间的能量交换不太剧烈,并且有足够的能量来促使分子结构缓慢变化.在地球上存在这种良好的条件,这是由于地球离开恒星有 10^{13} 厘米的安全距离,并且有一个大气构成的保护层.宇宙间的大多数物质处于非常不同的环境下.例如,在恒星中心主要是核过程,在这个领域里,与第二类排列原则*关系重大.在地球表面,没有足够的能量引起核过程,核过程几乎不存在,我们只是发现了极少的这种过程,这就是天然放射性元素,它们是远古的残骸,可能是超新星爆炸时落到地球上的星际物质.

1. 核力

为了在实验室里研究核现象,我们必须用粒子加速器来产生它们.这种研究已有了

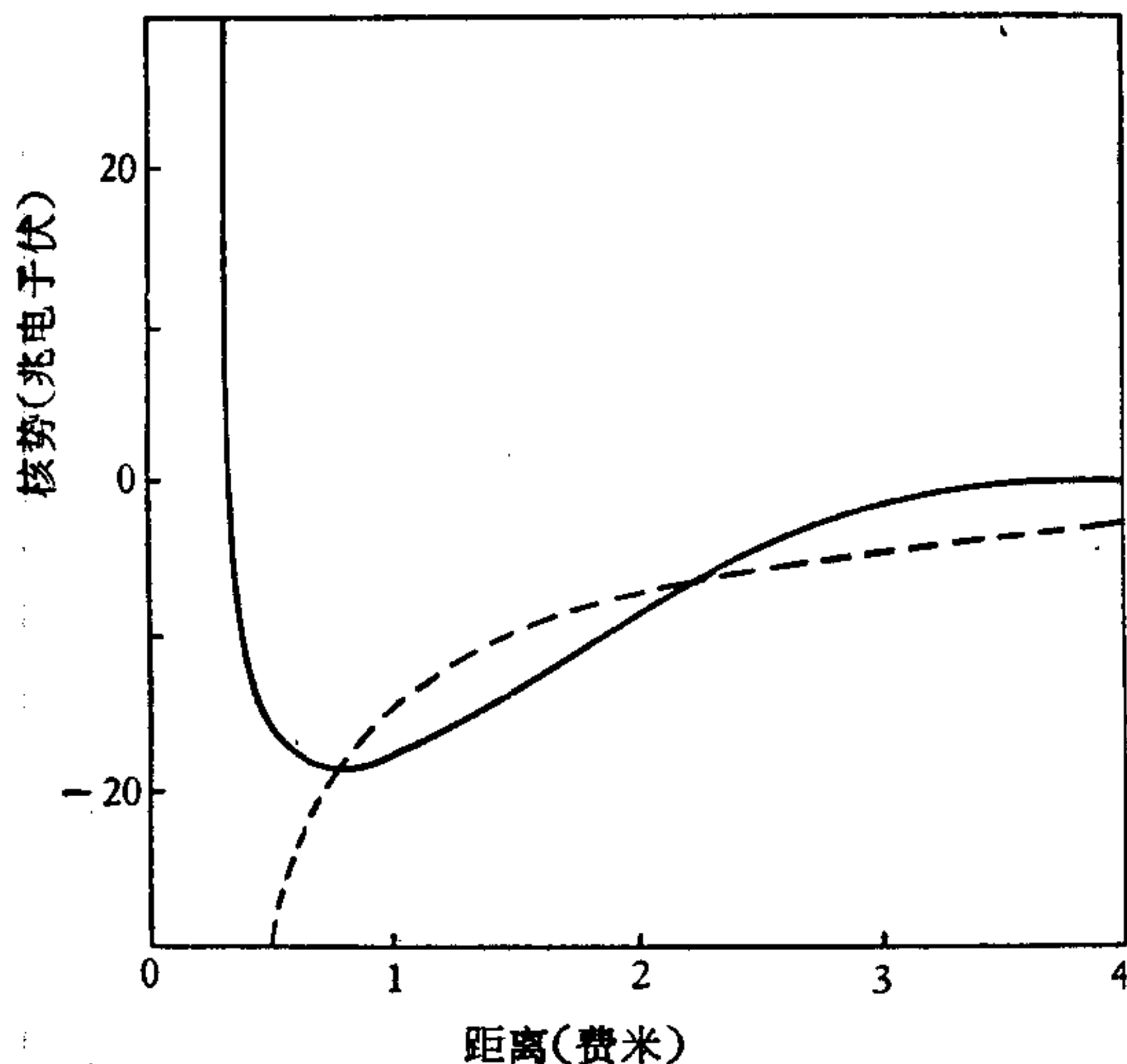


图1 核力在大约1费米以下为斥力,以上为吸力.虚曲线表示 $3e$ 异号电荷的库仑吸力对应的势能曲线.核势形状与分子势相似.

很大收获,并由此发现了一个新世界,它与原子和分子世界如此不同,又如此类似.首先发现了有一种新的力作用在核子之间.这种复杂的力如图1所示.这种力当间距在 10^{-13} 厘米(1费米)以下时是斥力,在1与几个费米之间变为吸力,在更远距离时指数地下降为零.这种力的细节与两个粒子的量子状态的相对自旋和对称性有关.

与电力不同,核力没有宏观的体现.把许多电荷集中在一个给定体积内,就可以产生宏观的电场,电荷的场远远地超出了它们所在的体积范围,并叠加成很强的场.这对于核力场是办不到的,因为核力的作用范围比核子可以靠近的最短距离大

* 指原子核的壳层结构(译者).

不了多少。

核力在吸力区的大致强度，相当于两个电量各为 $3e$ 的正、负电荷之间的吸引力。利用这个数值，我们可以按照熟知的里德伯公式与玻尔半径，把 e 换成 $3e$ ，电子质量换成核子质量，来算出简单原子核的能量与大小。这样得到的核能量比原子能量大 20 万倍，核半径比原子半径小 2 万倍。

在很多方面，原子核物理学是原子物理学的复现，它们具有相似的能谱与量子数。但也有显著差别，例如，原子核内不存在由重的中心粒子所产生的主力场，而是所有核子之间存在的有力场显示出力特性不同。然而在量子力学中，对很多性质来说，状态的对称性是一个决定因素。在原子核中约束每个核子的平均吸力场，与原子中一样，具有相同的球对称性。因此，当原子核按照质子数或中子数排列时，我们就得到一组相似的量子数，一个相似的“结构”原则，核的性质也显示出相似的周期系统。在各周期的末端是一些闭壳层的、结合能较大的核。这些“幻”核类似惰性气体。图 2 把原子电离能与核激发能相比较，由此显示出原子核的周期性。虽然大体相似，但还存在着重要的差异。

2. 性质对比

核谱与原子谱的相似性在几个方面遭到了破

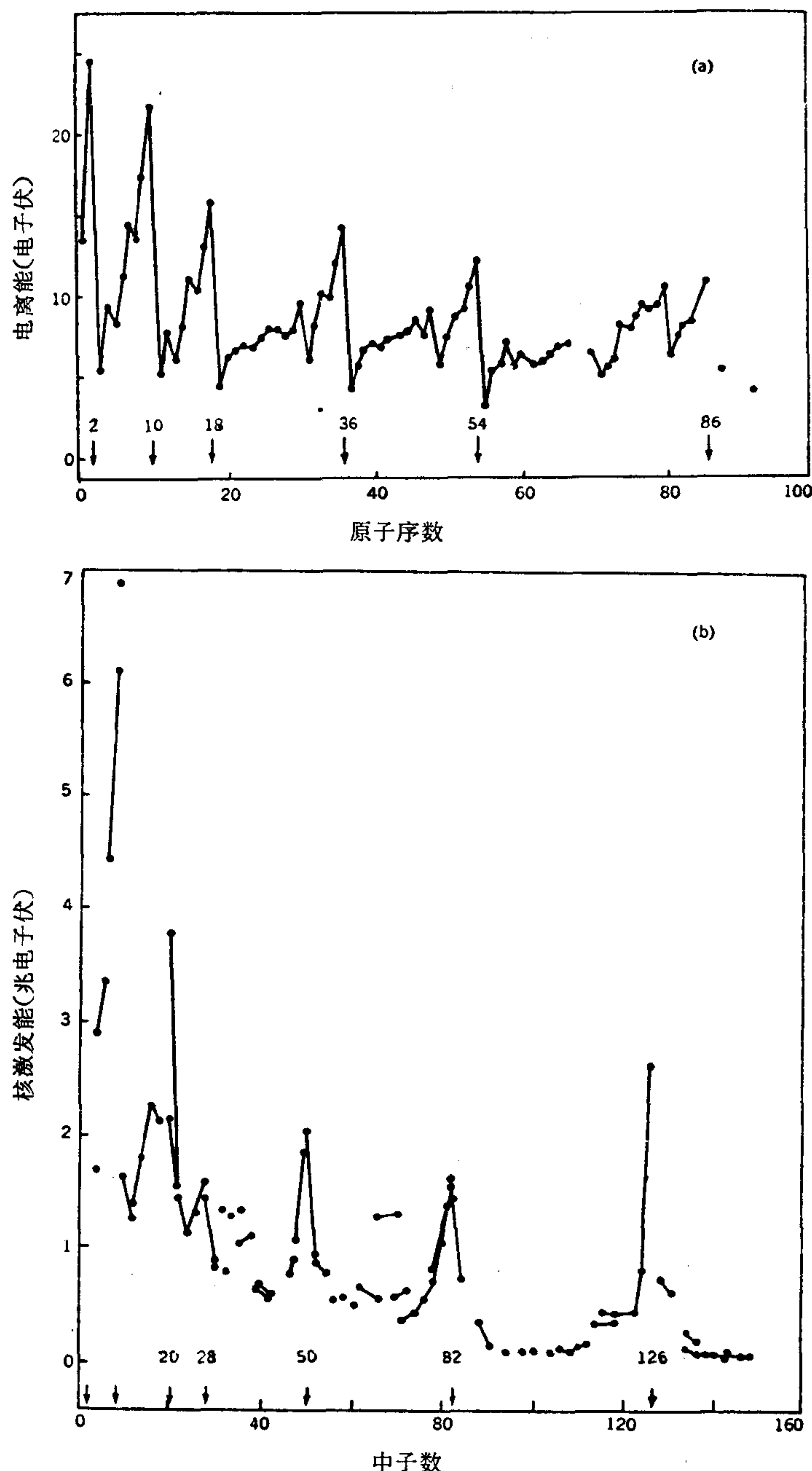


图 2 (a)原子电离能；(b)核激发能。由此可以看出，原子和原子核的周期性相似。峰值出现在惰性气体或幻核处（箭头↓），两者都和闭壳层对应。核激发能为偶偶核的第一激发能；实线联结的核都具有相同的质子数。

坏。首先是核平均势场中的能级次序与库仑场中的不同。因为核力在中心无奇异点， $2s$ 能级比 $1p$ 能级高，如图 3 所示，而在库仑场中次序相反。其次，在原子核中自旋-轨道耦合很强，改变相邻壳层的占有数，可使处于周期末端的粒子数目不同。此外，因为原子中的电子是互相排斥的，而原子核中各核子之间则是相互吸引的，因此，洪德 (Hund) 规则也要倒过来。这一规则认为，原子的基态是最后未填满壳层中组态多重性最高的状态，因为在这个状态内电子是相互散开的。在原子核中，正好相反，基态是多重性最低的，占有数为偶数时多重性为零。所以，质子数 Z 和中子数 N 为偶数的核，自旋都为零。只有奇数占有数才能使角动量不为零。

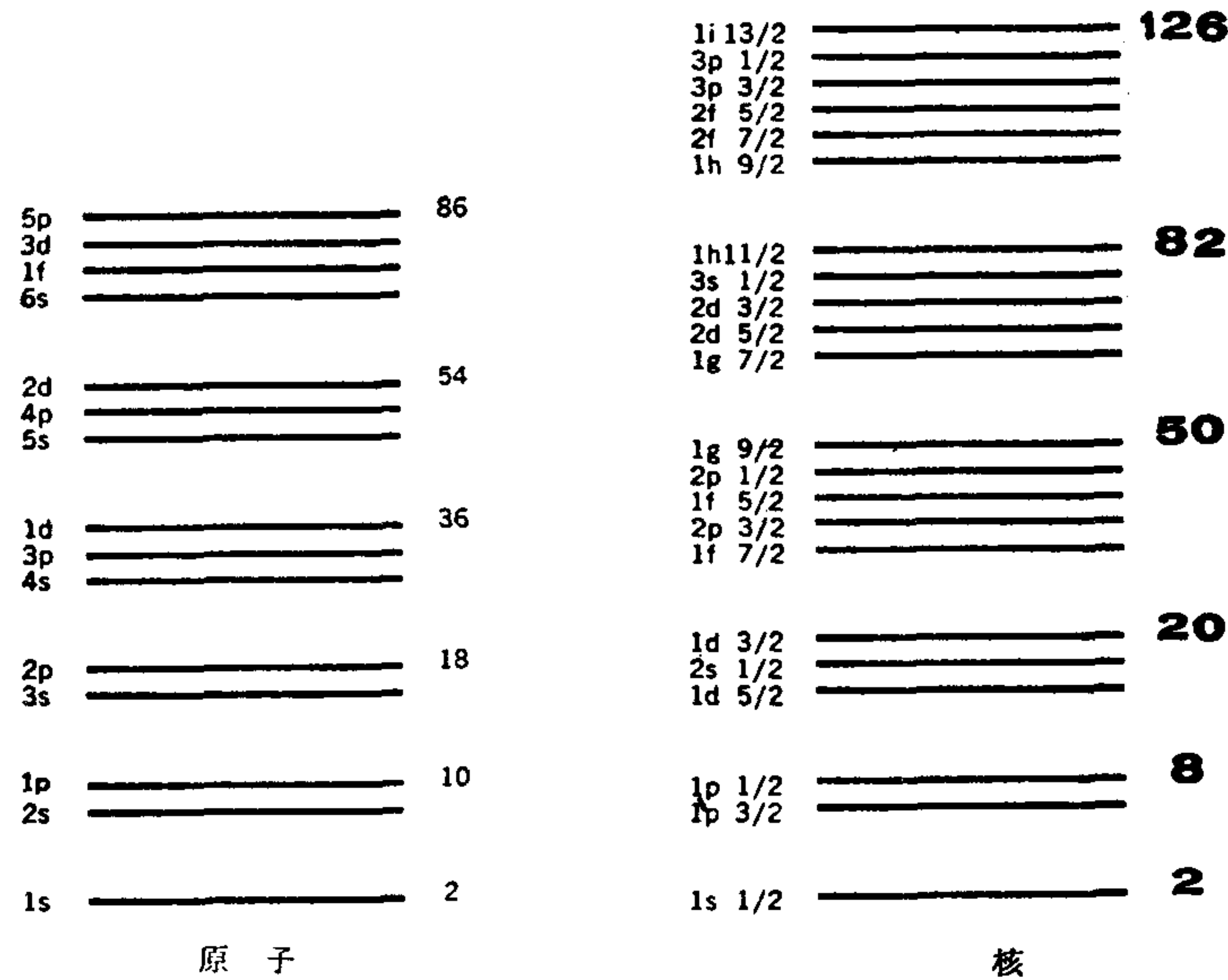


图 3 由于原子力和核力不同而产生的能级次序的不同。核力无奇异点，使 $2s$ 与 $1p$ 能级的次序颠倒了；自旋-轨道耦合改变了相邻壳层的占有数(粗体字)。标度线只表示能量次序，而不表示能量数值。

进一步的差异是原子核内存在两种成分——中子和质子，它们的质量几乎相同。这两种成分在核力方面的等价性，使得以质子代替中子而产生的不同的量子能级是近似简并的。只有来自质子电荷的微弱电效应，才会使简并性破坏。这种简并性引起一种新的对称性和新的量子数，这就是同位旋，它对核谱起着支配作用。

核内各核子的质量相同，还使得它们在原子核中没有特定位置或明确的中心。所以在核反应中两个原子核合并时不形成“分子”，而是形成新的核。例如，两个氧核合并成为一个硫核，不会形成骨架或超结构。在这意义上，用核合成新结构的可能性，比用原子合成的情形要少得多。不过，当核融合时释放的能量要比化学反应大百万倍。

随着质子数目增加，库仑斥力的破坏效应不断增强，因而使得可以结合在一起的核子数目有一个上限。或许某些特殊的壳效应有可能使这个上限扩大，从而越过现在所知的超铀元素。另外，在更大规模上，万有引力会有助于把核子结合在一起，例如最近发现的中子星中的情况。

在核世界中出现的另一个新特点是：从能量较高的量子态向较低量子态跃迁时，不仅象原子那样可放出光子，而且可发射轻子对——电子和中微子。这种发射显示了神秘的弱相互作用，它们显现了惊人的特性，例如，左-右对称性的破坏。它们使得总电荷不同