

强相互作用诺贝尔奖漫谈

董相坤^{1,2,†} 邹冰松^{1,2,3,††}

(1 中国科学院理论物理研究所 北京 100190)

(2 中国科学院大学物理科学学院 北京 100049)

(3 中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2022-08-15 收到

† email: dongxiangkun@itp.ac.cn

†† email: zoubs@itp.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20220903

On the Nobel prizes awarded for discoveries related to the strong interaction

DONG Xiang-Kun^{1,2,†} ZOU Bing-Song^{1,2,3,††}

(1 Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2 School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

摘要 作为四大基本相互作用之一，强相互作用的研究可以追溯到19世纪末元素天然放射性的发现。在随后将近一个世纪里，经过众多科学家的不懈努力，强相互作用的面纱逐渐被揭开。文章将简要介绍与强相互作用相关的诺贝尔奖，并以此为载体梳理我们在探索世界的进程中对强相互作用的认知过程。

关键词 强相互作用，亚原子结构，强子结构，诺贝尔奖

Abstract The study of the strong interaction, one of the four fundamental interactions, can be traced back to the discovery of natural radioactivity of elements at the end of the 19th century. In the ensuing century, the veil of strong interactions has been gradually lifted through the efforts of many scientists. In this paper, we will briefly recount the Nobel prizes awarded for research related to strong interactions, and use this as a pathway to sort out our knowledge of strong interactions in the process of exploring the world.

Keywords strong interaction, sub-atomic structure, hadronic structure, Nobel prize

1 物质相互作用及其认知年代

当前物理学认为我们的世界中存在4种基本的相互作用，分别是引力相互作用、电磁相互作用、强相互作用和弱相互作用。由于相互作用的尺度不同，这4种基本相互作用被发现的时间也不尽相同，如表1所示。1687年，经过长时间的研究并借鉴前人的经验与成果，牛顿在其《自然

哲学的数学原理》一书中提出了万有引力定律，成功地解释了行星的运动轨迹。1915年，爱因斯坦提出了广义相对论，赋予了引力几何的本质。1785年，库仑在《电力定律》一文中给出了描述两个点电荷之间相互作用力的库仑定律。库仑定律是电磁现象中的第一个定量公式，经过后续实验和理论的发展，1865年麦克斯韦总结出麦克斯韦方程组，完成了电与磁的统一描述。我们日常生活中遇到的几乎所有现象都可以用这两种相

互作用描述，但到了20世纪，我们渐渐遇到了这两种理论无法解释的现象——原子核结构与中子衰变。对这两个问题的研究使我们认识到强相互作用和弱相互作用的存在。1934年，汤川秀树和费米分别提出了介子交换理论和四费米子相互作用理论来解释核子之间的作用力及中子的衰变。这两种理论经过后续的发展与完善，最终在20世纪六七十年代发展成为量子色动力学(QCD)与电弱统一理论，构成了标准模型的基石。

在强相互作用发展的过程中，一大批科学家做出了很多里程碑式的工作并获得了科学界最高的荣誉——诺贝尔奖。在第2和3节中我们将介绍与强相互作用相关的诺贝尔奖，了解这些工作的基本内容和意义，并以此理清我们探索亚原子微观结构的历史。第4节我们将简要介绍强相互作用的研究前沿。

2 亚原子结构

2.1 原子核

欧内斯特·卢瑟福(Ernest Rutherford, 1871—1937)因对元素衰变及放射化学的研究获得1908年诺贝尔化学奖。卢瑟福被称为原子核物理、放射化学、原子物理之父。卢瑟福出生在新西兰的一个农场主家庭，在新西兰获得文学学士、文学硕士及理学学士之后，1895年进入剑桥大学卡文迪什实验室学习，成为汤姆孙(Joseph John Thomson)的学生。汤姆孙因发现电子而获得1906年诺贝尔物理学奖。1898年，在汤姆孙的推荐下，卢瑟福赴加拿大麦吉尔大学任教。1907年，卢瑟福回到英国，任教于曼彻斯特大学并于1919年重返

表1 四大基本相互作用最早表现形式及其发现的年代

相互作用	年代	规律	相关物质结构
万有引力	1687	$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r}$	天体结构
电力, 库仑定律	1785	$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$	分子、原子结构
核力	1934	$V(r) = -g^2 \frac{e^{-\mu r}}{r}$	核结构
弱力	1934	四费米子相互作用	中子衰变

剑桥，接任汤姆孙的职位成为卡文迪什实验室的第四位领导。卢瑟福是一位杰出的实验物理学家，他秉持着严谨的态度对待每个发现，做出了包括 α 、 β 射线的发现，元素的衰变， α 粒子散射实验，原子的核式模型，质子的发现等等一系列意义重大的成果，相关介绍可参考文献[1]。除了自己不凡的科学成就，卢瑟福还是一位伟大的科学导师。在他的学生、助手中，有10位获得了诺贝尔奖，这是他人至今，恐怕也是永远，无法达成的成就。

2.1.1 α 、 β 射线的发现

1895年，德国科学家伦琴在研究阴极射线的时候意外地发现了一种新的射线——X射线，X代表未知。这个发现，尤其是伦琴夫人手骨的照片，一经公布便引起了极大的轰动——X射线就像一种可以透视的魔法。卢瑟福在汤姆孙的建议下进行了X射线电离性质的研究，这是当时物理研究的大热门。1896年，法国科学家贝可勒尔发现了铀的天然放射性，卢瑟福得知后便转向了铀的放射线研究。他发现在铀的放射线中，有两种穿透性截然不同的成分。1899年，他将铀放射出的极易被吸收的射线称为 α 射线，而将另一种具有更强穿透性的射线称为 β 射线^[2]。虽然早期的实验发现这些射线并不会被电磁场偏转，也就是电中性的，但卢瑟福后续的实验结果显示 α 射线带正电且与氢原子的质量在一个量级。卢瑟福认为 α 射线是带有两个正电荷的氦离子，但直到1908年他才提供了确凿无疑的证据—— α 射线的光谱与1895年在太阳光中发现氦气时看到的光谱一样^[3]。此外，他还将法国科学家维拉尔于1900年发现的铀的第三种放射线称为 γ 射线。这些名字沿用至今，仍是标准。

2.1.2 放射性转变

来到加拿大后，卢瑟福继续开展放射性的研究。1900年，卢瑟福在研究钍(原子序数 $Z=90$)放射线的电离性质时，发现钍周围的气体同样具有放射性，卢瑟福称之为钍射气。他对这种放射性气体的化学本质感到非常迷惑，这一年，一位英国的年轻化学家索迪进入了卢瑟福的实验室鉴定这些放射气体的本质。最终他们经过实验确认钍发生的变化为



他们将实验结果整理发表，得到了一个在当时看似不可思议的结论^[4]——元素在放出射线之后会变成其他元素。长期以来，大家认为原子作为构成物质世界的基本元素，是稳定不变的。卢瑟福的实验结果对这种观念提出了挑战，并因此获得了1908年的诺贝尔化学奖。

2.1.3 原子的核式模型

汤姆孙在发现电子之后提出了原子的葡萄干—布丁模型——正电荷均匀地分布在原子中而电子就像布丁中的葡萄干一样镶嵌其中。卢瑟福最初是认同这种模型的，“移动的电子，也就是构成原子的组件，需要正电荷这样的黏浆将其束缚在一起。”在卢瑟福研究了 α 粒子之后，他决定用 α 粒子轰击金箔来看其散射分布，进而验证这种原子模型——要么所有的 α 粒子都可以轻松地穿过金箔，几乎不发生偏转，要么所有的 α 粒子都不能穿过金箔，如图1(a)所示。

1908年，盖革在卢瑟福的指导下得到了初步的结果。他们发现正如预期的那样，所有的 α 粒子都穿过了金箔，而且都集中在很小的散射角内。第二年，盖革和卢瑟福的另外一个学生马斯登继续研究 α 散射实验。卢瑟福让马斯登看一下在大角度上是不是会探测到 α 粒子。马斯登的结果——约万分之一的 α 粒子会出现大角度散射——让卢瑟福大为震惊，“这是我一生中碰到的最不可思议的事情。就好像你用一颗15英寸的大炮去轰击一张纸而你竟被反弹回的炮弹击中一样^[5]。”为了解释这种现象，卢瑟福提出了原子的核式模型——带正电的原子核携带原子绝大部分质量，却只占据中心非常小的区域，而外围绝大部分都是空的，如图1(b)所示。卢瑟福推导了这种原子模型的散射截面，得到的卢瑟福公式可以很好地解释实验中 α 粒子的角分布^[6]。

原子的核式模型对后续认识原子结构至关重要。卢瑟福的学生玻尔在此基础上加入量子化条件提出的行星模型成功解释了原子光谱，促进了量子力学的建立。

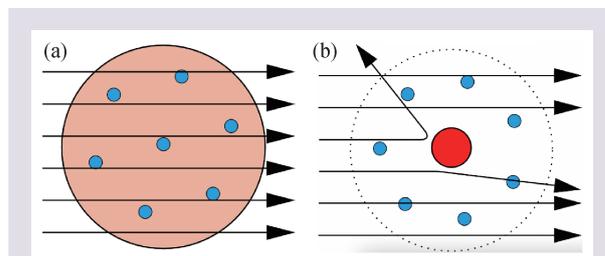
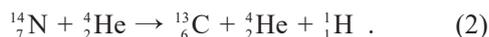


图1 汤姆孙模型(a)和卢瑟福模型(b)中 α 粒子散射示意图(图片取自维基百科词条“Rutherford”)

2.1.4 质子的发现

1919年当卢瑟福用 α 粒子轰击氮气的时候他在接收屏上发现了一个和氢原子一样的信号。卢瑟福猜测是 α 粒子将氮原子核打成了碳原子核和氢原子核，用现在的记号来写是



卢瑟福认定这个过程是第一个人造的元素转换过程——高能 α 粒子可以将一个原子核打成质量更小的原子核^[7, 8]。这个末态中和氢原子类似的带电粒子被卢瑟福称为质子^[1]。

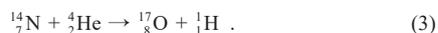
在发现质子之后，卢瑟福又提出了中子的概念。当时人们认为实验中看到的各种原子核是由带电的氢原子核加电子组成的，比如N-14由14个氢原子核和7个电子组成。卢瑟福认为原子核中的质子和电子可能形成一种中性的深束缚态，即中子。1932年，卢瑟福预言的这种原子核中电中性的粒子被他的学生查德威克发现。

2.1.5 伟大的学术导师

弗雷德里克·索迪(Frederick Soddy, 1877—1956)因对放射化学的贡献以及对同位素本质的研究获得1921年诺贝尔化学奖。索迪曾在1900年至1907年跟随卢瑟福开展放射性研究，发现放射性物质可以通过放出放射线变为其他元素，见式(1)。1913年他发现一种放射性物质，即使具有完全相同的化学性质，也可以具有不同的质量数。索迪将它们称为同位素^[9]。

弗朗西斯·阿斯顿(Francis William Aston, 1877—1945)因利用自己发明的质谱仪发现大量非放射性元素的同位素以及提出的“整数法则

1) 1925年，卢瑟福的学生布莱克特证明真实发生的过程应该是



(wholenumber rule)”而获得1922年诺贝尔化学奖。阿斯顿和卢瑟福同为汤姆孙的学生，两人在卡文迪什实验室共度了很多时光，成为了非常亲密的同事和知心朋友。第一次世界大战之后阿斯顿回到卡文迪什实验室改进了当时鉴别粒子的仪器，提高了质量的分辨率^[10]。阿斯顿用自己设计的质谱仪极大地拓展了卢瑟福和索迪开拓的同位素研究，研究了大约30种非放射性元素的同位素，精确地测量了它们的质量，发现所有同位素的质量都是氢原子质量的整数倍。这些发现促进了人们对原子核结构的理解。

尼尔斯·玻尔(Niels Bohr, 1885—1962)因对原子结构及辐射规律的研究而获得1922年诺贝尔物理学奖。1912年，26岁的丹麦物理学家玻尔受邀来到曼彻斯特大学跟随卢瑟福做博士后研究。玻尔以卢瑟福的原子核式模型为基础，提出了行星轨道模型^[11]，即外围电子只能以特定频率，特定轨道绕着原子核旋转。电子可以在不同轨道之间跃迁，进而吸收或放出相应能量的电磁波。玻尔之所以提出这种直观上很难理解的假设，是为了解决卢瑟福模型中致命的不足——带电粒子做圆周运动会释放电磁波损失能量，这意味着所有的原子都是不稳定的，与现实严重不符。同时，这种半经典的轨道模型也可以解释原子的离散光谱，促进了后续量子力学的建立。

查尔斯·威尔逊(Charles Wilson, 1869—1959)因发明可以显示带电粒子径迹的云雾室而获得1927年诺贝尔物理学奖。1896年，与卢瑟福同在卡文迪什实验室工作的威尔逊发明了云雾室，在一个封闭容器内，输入纯净的乙醇或者甲醇蒸气，通过降低温度使蒸气达到过饱和状态，此时如果有带电粒子射入，就会在路径上产生离子，过饱和和蒸气会以离子为核心凝结成小液滴，从而显示出粒子的径迹。卢瑟福在汤姆孙的建议下进行的X射线电离性质的研究对认识云雾室机理起到了重要作用²⁾。卢瑟福发现 α 和 β 射线后，威尔逊首先用云雾室观察到并照相记录了 α 和 β 粒子的径迹。

2) <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1927/wilson/biographical/>

詹姆斯·查德威克(James Chadwick, 1891—1974)因发现中子而获得1935年诺贝尔物理学奖。查德威克自本科开始就跟随卢瑟福学习工作并于1913年获得硕士学位，一战后他在卢瑟福的指导下攻读博士学位并在卡文迪什实验室作为卢瑟福助手工作了超过十年。1930年德国的物理学家博特(Walther Bothe)与学生贝克用钷辐射出来的 α 粒子轰击铍核，发现产生了一种未知的射线。1931年，法国的小居里夫妇(Frédéric and Irène Joliot-Curie)也观测到了这种中性射线，他们误认为是高能光子。卢瑟福和查德威克不同意这种观点，他们认为这可能是之前卢瑟福所预言的中子。查德威克加班加点展开了中子的探测和验证实验。仅仅两周之后，查德威克就将自己的论文《可能存在的中子》^[12]，寄给了*Nature*杂志。

奥托·哈恩(Otto Hahn, 1879—1968)因发现重核裂变而获得1944年诺贝尔化学奖。1905至1906年，哈恩曾在麦吉尔大学作为卢瑟福的助手开展工作，在此期间他发现了数个放射性元素的同位素。1939年，哈恩和他的学生Fritz Strassman利用中子激发铀核，在末态探测到了钡^[13]。这和之前观测到的 α 、 β 、 γ 衰变完全不同。后来经Lise Meitner和Otto Frisch理论研究发现铀核发生了劈裂变成了更轻的核^[14, 15]，这种裂变的现象对后续原子能的利用至关重要。

帕特里克·布莱克特(Patrick Blackett, 1897—1974)因改进了威尔逊的云雾室并用它研究了大量宇宙射线及核反应中的粒子而获得1948年诺贝尔物理学奖。布莱克特自1921年开始，在卢瑟福的实验室工作了十年。1925年他利用云雾室证明，卢瑟福发现质子的实验中发生的真实过程是式(3)而非式(2)^[16]。1932年，布莱克特将威尔逊的云雾室与盖革计数器连在一起，并用这种改进的探测器发现了大量宇宙射线中的粒子，包括验证了正电子的存在，观测到了正负电子对的产生等一系列重要的结果。

约翰·考克罗夫特和欧内斯特·沃尔顿(John Cockcroft, 1897—1967 & Ernest Walton, 1903—1995)因在人工加速的粒子对原子核的嬗变方面

进行了开创性的工作而获得1951年诺贝尔物理学奖。考克罗夫特与沃尔顿都是卢瑟福在卡文迪什实验室的学生。在卢瑟福用镭放射的 α 粒子轰击氮核得到质子之后,他希望得到能量更高的粒子束流轰击原子核得到更多的反应过程进而详细探究核结构。卢瑟福将这个任务安排给了考克罗夫特与沃尔顿等人。1932年,考克罗夫特与沃尔顿合作成功建造了一台直流高压加速器,取代了天然放射 α 粒子束流,第一次实现人工加速粒子产生的核反应,开辟了粒子物理实验的新天地。

彼得·卡皮察(Pyotr Kapitsa, 1894—1984)因对低温物理领域基础性的发明和发现获得1978年诺贝尔物理学奖。一战之后卡皮察来到英国,在卢瑟福手下工作了14年并于1930年成为新成立的蒙德实验室主任,专门研究磁场。1934年他回到苏联探亲,但苏联政府不允许他再回英国。卢瑟福给苏联政府去信交涉无果,卡皮察决定转变方向,进行低温物理的研究。在卢瑟福的帮助下购买了蒙德实验室的实验仪器,成立了物理问题研究所。

2.2 中子物理

恩里克·费米(Enrico Fermi, 1901—1954)因利用中子辐射发现新的放射性元素及发现慢中子更容易诱发核反应而获得1938年诺贝尔物理学奖。费米是少有的在理论和实验两方面都作出杰出贡献的物理学家。理论方面,他的贡献集中在统计物理、量子物理、核物理与粒子物理等领域。而实验方面,他用中子辐射诱发核反应,领导建造世界上第一台人工核反应堆,参与美国建造原子弹的“曼哈顿计划”等。

自1932年中子被查德威克发现之后,便成为研究核结构的新工具。1934年人们发现某些原子核吸收 α 粒子之后会具有放射性。费米决定将 α 粒子换作中子试试。中子不带电,无需克服库仑势能就可以被原子核俘获,进而诱发核反应。经过一系列中子诱发的核实验,费米实验组发现对于轻的原子核,中子所带来的能量会被放出的质子或 α 粒子带走,而对于重核,更多的是释放 γ 射

线。根据当时的理论,重核俘获中子之后进而发生 β 衰变, Z 将增加1。当用中子轰击铀核的时候他们的确观测到了这种现象——末态有很多粒子的半衰期与当时已知的原子核都不一样。于是他们宣称发现了第93,94号元素。由于他们没能将这些新元素分离出来,他们的发现受到了一些科学家的质疑。尽管如此,诺贝尔奖委员会还是因为费米发现了两种新元素而将1938年诺贝尔奖颁给了他。就在诺奖颁布的一个月后,哈恩等人发现了原子核的裂变现象^[13]。很快费米宣称的两种“新元素”就被证明是核裂变的产物,均为已知元素的同位素。

事后来,尽管诺贝尔奖委员会给费米的获奖理由是错的,但是应该没有人会质疑费米获得诺贝尔奖的合理性——他在很多方面都做出了诺奖级的工作。20世纪20年代, β 衰变中末态电子的能量是连续的这件事已经确凿无疑。为了解这件事情,泡利假设末态除了质子和电子外还存在一种电中性的质量非常小的粒子,并将其称为“中子”。费米接受了这种观点并将其名字改为“中微子”。费米还构造了四费米子相互作用来描述 β 衰变,该理论经过后续包括李政道、杨振宁在内的科学家的发展,逐渐演变为标准模型中的弱相互作用理论。在统计物理领域,自旋为半整数的粒子就是以他的名字命名,即费米子。他分析了由费米子构成的理想气体系统(即费米气体),利用费米—狄拉克统计来描述它们的状态分布。在量子物理领域,费米的黄金定则描述了不同能量本征态之间的跃迁率。此类种种,费米对现代物理学的发展举足轻重。

2.3 核力及原子核结构

汤川秀树(Hideki Yukawa, 1907—1981)因在理论分析核力时预言了 π 介子的存在而获得1949年诺贝尔物理学奖。1932年中子被发现之后,人们渐渐意识到原子核由质子和中子(统称为核子)构成。但是质子带正电,中子不带电,他们不可能通过电磁相互作用束缚在一起形成原子核。费

米为描述 β 衰变提出的四费米子相互作用非常之弱，根本不足以束缚核子^[17]。1934年汤川秀树引入一种新的相互作用来解释核子之间的吸引力^[18]。类似于带电粒子通过交换光子实现电磁相互作用，核子通过交换介子实现相互作用，产生束缚力。汤川秀树根据原子核的尺寸， $r \sim 1 \text{ fm} (\sim 10^{-15} \text{ m})$ ，估计出介子的质量约为 $m \sim 1/r \sim 100 \text{ MeV}$ 。

塞西尔·鲍威尔(Cecil Powell, 1903—1969)因对研究核反应过程的乳胶摄影方法的发展以及使用这种方法发现了 π 介子而获得1950年诺贝尔物理学奖。汤川秀树预言了传递核力的 π 介子之后，物理学家们就开始了它的寻找。1936年缪子(μ)被发现，其质量最高可到150 MeV，非常接近汤川秀树的预言，所以一开始人们认为这就是 π 介子。但后续的实验发现缪子并不参与核反应。1939—1942年，两位印度科学家玻色(Debendra Mohan Bose)和乔杜里(Bibha Chowdhuri)利用摄影感光片在印度的高海拔地区研究了宇宙射线^[19, 20]。他们在宇宙射线中观测到了质量约为200倍电子质量的粒子。1947年，鲍威尔等人改进了这种方法，独立地在宇宙射线中观测到了这种介子^[21]。他们还发现这种介子参与了核子的相互作用，进一步支持它就是汤川秀树预言的 π 介子。

尤金·维格纳(Eugene P. Wigner, 1902—1995)因对原子核及基本粒子理论的贡献，尤其是基本对称性原理的发现和应，而获得1963年

诺贝尔物理学奖。维格纳在理论物理和数学物理领域做出了重要的贡献。他将对称性广泛地应用在物理研究中，很多定理、概念都以他的名字命名，包括维格纳—埃卡特定理(Wigner—Eckart theorem)、维格纳定理、维格纳分类、维格纳 d -函数、维格纳 $6-j$ 、 $9-j$ 系数等等。20世纪20年代，维格纳将对称性引入刚建立的量子力学，得到了一系列重要的结果。到了30年代，维格纳发现核子之间的相互作用在相距很远时非常弱，而靠近时又会急剧变强。他还注意到核子满足的对称性并不区分质子和中子，进而将核子束缚在一起的强相互作用对质子和中子是一样的。

玛丽亚·梅耶和汉斯·延森(Maria Goeppert Mayer, 1906—1972 & Hans Jensen, 1907—1973)因发现原子核的壳层模型而获得1963年诺贝尔物理学奖。在人们认识到原子核是由质子和中子构成的之后，一个重要的问题就是原子核的各种性质与其中质子、中子数量之间的关系。由于缺乏描述核力的精确理论，人们根据实验结果提出了唯象模型来描述原子核的性质。最初提出的液滴模型假设原子核是由质子和中子在电磁力与核力的共同作用下形成的液滴，而整个液滴的能量由表面张力、体积、库仑力、非对称性、核子配对等5个方面决定。由此提出的贝特—魏茨泽克质量公式(Bethe—Weizsäcker mass formula)可以很好地描述原子核的性质，但是却不能解释

“幻数(magic number)”的存在。实验发现，具有某些特定质子数或中子数的原子核比较稳定，维格纳将这些数称为“幻数”，包括2, 8, 20, 28, 50等等。为解释这种现象，1949年梅耶和延森分别独立地提出了原子核的壳层模型^[22—24]。和原子中电子的排布类似，原子核中的质子和中子也有不同的能级，每当一个能级上的态被填满时，原子核就相对更稳定。

奥格·玻尔、本·莫特松和里奥·雷恩沃特(Aage Bohr, 1922—2009, Ben Mottelson, 1926—2022

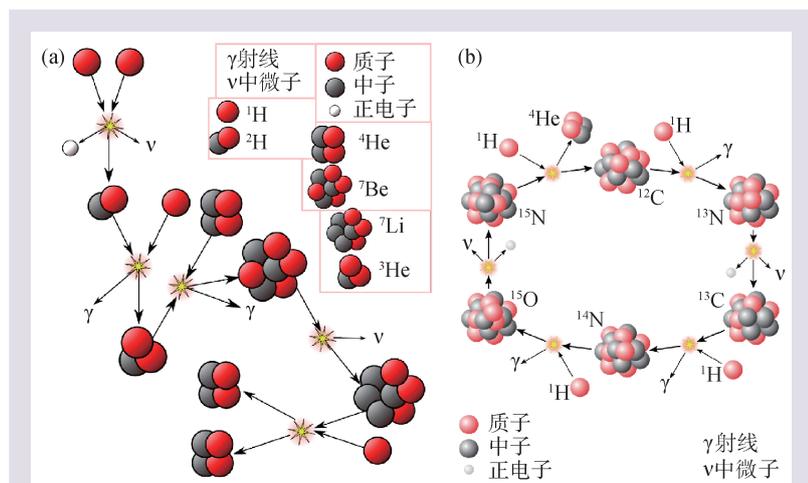


图2 恒星中的氢—氢链(a)和碳—氮—氧循环(b)过程(图片取自维基百科词条“Proton-proton chain”和“CNO cycle”)

& Leo Rainwater, 1917—1986)因发现原子核中集体运动和核子运动之间的联系, 以及基于这种联系发展了原子核结构理论而获得1975年诺贝尔物理学奖。1949年提出的壳层模型解释了原子核的“幻数”现象, 但其得到的原子核的电四极矩与实验结果不符。1950年, 哥伦比亚大学的雷恩沃特推测原子核作为一个整体, 其形状会受到内部每个核子运动的影响而不再是球对称的^[25]。A. 玻尔当时在哥伦比亚大学访问, 与雷恩沃特交流后更一般性地研究了这个问题, 探讨了单个核子的运动对原子核整体运动的影响。A. 玻尔回到哥本哈根后与莫特松一起对比了理论与实验结果, 发现他们的模型与实验结果一致, 而且将壳层模型与雷恩沃特原子核形变的概念联系起来^[26—28]。

2.4 天体核物理

汉斯·贝特(Hans Albrecht Bethe, 1906—2005)因发展了核反应理论, 尤其是用核聚变反应解释恒星能量来源而获得1967年诺贝尔物理学奖。贝特是一位著名的德裔美籍核物理学家。1933年纳粹掌权后, 贝特被解雇, 他经由英国于1935年移民美国, 成为康奈尔大学的教授。1938年, 贝特受邀参加一个关于“恒星能量如何产生”的研讨会, 他本无意参加这个自己不感兴趣的会议, 但泰勒(Edward Teller, 被誉为美国氢弹之父)说服了他。会议上贝特了解到了太阳的温度、密度、元素成分等信息。随后贝特提出了两种核反应过程来解释太阳的能量来源^[29]: 一种是两个氢核变成一个氦核, 氦核进一步捕获质子变成⁴He放出能量; 另一种是经过碳核和氮核的催化, 四个氢核变成⁴He并放出能量。它们分别被称为氢—氢链(p—p chain)和碳—氮—氧循环(CNO cycle), 如图2(a), (b)所示。经过计算贝特发现, 在太阳温度附近, 这两种过程所占比例大致相同, 温度更低时前者主导, 反之后者主导。贝特提出的上述核反应过程成功地解释了恒星能量的来源。

贝特作为一位著名的核物理学家, 还做出了很多其他重要的工作, 包括量子多体系统本征态参数化的贝特拟设(Bethe ansatz), 核物理综述三

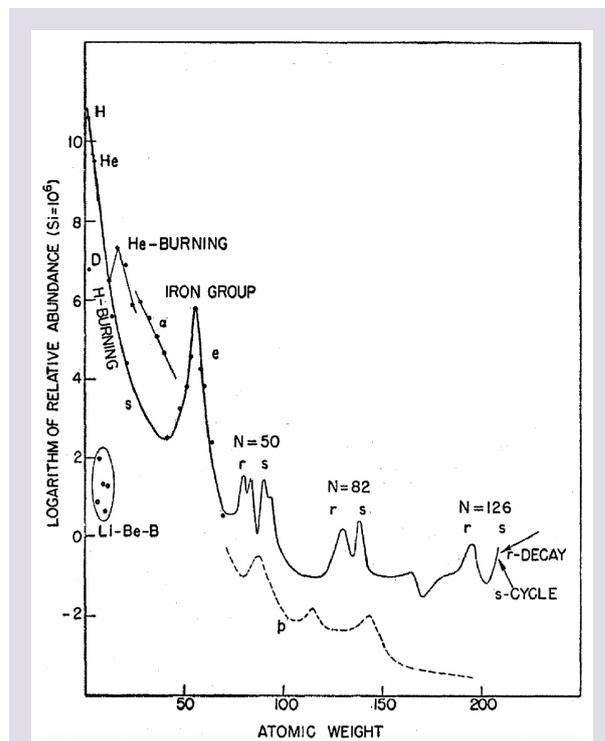


图3 宇宙元素丰度曲线^[30]

部曲——贝特圣经(Bethe Bible), 兰姆移位(Lamb shift)的解释, 两体束缚态满足的相对论性方程——贝特—萨佩特方程(Bethe—Salpeter equation)等等。贝特从18岁发表第一篇学术论文, 直到90多岁还笔耕不辍, 甚至去世后还有一篇合作文章发表。他曾经的博士后戴森(Freeman Dyson)称他为“二十世纪重要问题解决者”。

威廉·福勒(William Alfred Fowler, 1911—1995)因对宇宙中形成化学元素的核反应的理论 and 实验研究而获得1983年诺贝尔物理学奖。宇宙中的恒星是由气体和尘埃云形成的。当它们被引力拉在一起时, 重力势能以热的形式被释放出来。当达到足够高的温度时, 恒星内部的原子核之间开始发生反应。这些反应是恒星发光的原因。另一方面, 在20世纪50年代, 人们已经测出了宇宙元素丰度的分布(其实是太阳中元素的丰度), 如图3所示。从图中我们可以看到如下一些特征: 元素丰度随着原子质量的增加而指数降低; 斜率在原子质量大于100后快速降低; 氦核、锂、铍、硼等丰度远小于他们邻居; ⁵⁶Fe附近显著的尖峰; 一些双峰结构等等。这些元素是怎么由最初的氢

元素形成的？为何会出现图中所示的这些趋势和特点？在著名的B²FH文章^[30]中，福勒等证明了恒星中的核反应可以解释元素丰度曲线的这些特征，极大地促进了我们对宇宙中元素的形成的理解。

2.5 核技术应用

费利克斯·布洛赫和爱德华·珀塞尔(Felix Bloch, 1905—1983 & Edward Mills Purcell, 1912—1997)因开发核磁共振精密测量的新方法，有效地研究了各种材料的成分而获得1952年诺贝尔物理学奖。原子核中的质子和中子就像小型的、旋转的磁铁，因此原子和分子在磁场中会定向排列。电磁场可以扰乱它们的指向，但根据量子力学原理，只能沿着特定的方向。当核子回到原来的位置时，它们会发射特定频率的电磁波，这些频率取决于元素的种类。1946年，珀塞尔和布洛赫开发了精确的测量方法来研究材料的成分。这种方法如今已发展为非常成熟的技术，被广泛地用于生产生活的各个方面。

伯特伦·布罗克豪斯和克利福德·沙尔(Ber-

tram N. Brockhouse, 1918—2003 & Clifford G. Shull, 1915—2001)因发展中子频谱学和中子衍射技术而获得1994年诺贝尔物理学奖。20世纪四五十年代，随着很多核反应堆的建成，其辐射出的中子为人们提供了研究物质结构的新探针。不同于X射线，不带电的中子不会受材料中电子的影响而可以直达原子核。一方面，当中子与材料中原子核碰撞时，中子的部分能量被转化为晶格的振动。这些被称为声子的振动具有固定的能级，形成一系列能谱。20世纪50年代，布罗克豪斯开发了使用这些光谱分析不同分子和材料属性的技术。另一方面，根据量子力学的原理，中子和其他粒子可以被描述为一种波的运动，中子辐射通过有规律的原子结构就会产生特定的衍射图案。1946年，沙尔开发了新方法，利用这一点来确定不同分子和材料的结构。中子频谱学和中子衍射技术在后续的凝聚态物理、材料科学等研究中发挥了极大的作用。

3 夸克与量子色动力学

3.1 质子结构

奥托·施特恩(Otto Stern, 1888—1969)因对发展分子射线法的贡献及发现质子的磁矩而获得1943年诺贝尔物理学奖。作为实验物理学家，施特恩做出了很多著名的实验，包括最著名的施特恩—格拉赫实验——量子力学奠基实验之一。施特恩—格拉赫实验证实了原子角动量的量子化，但其实验现象直到乌伦贝克(G. Uhlenbeck)和古兹密特(S. Goudsmit)提出电子自旋的概念后才被完全理解。电子的自旋是1/2，其磁矩为 $\mu = g \frac{eh}{2m_e}$ ，其中g为朗德g因子。电子为基本粒子，不考虑电磁相互作用的高阶修正，g=2。质子如果也是基本粒子，没有内部结构，理论预测其磁矩应为 $\mu_N \equiv \frac{eh}{2m_p}$ 。但施特恩测出的质子磁矩却是理论预测值的大约2.5倍，即 $\mu_p \approx 2.5\mu_N$ 。这意味着质子存在内部结构，不可能是基本粒子。

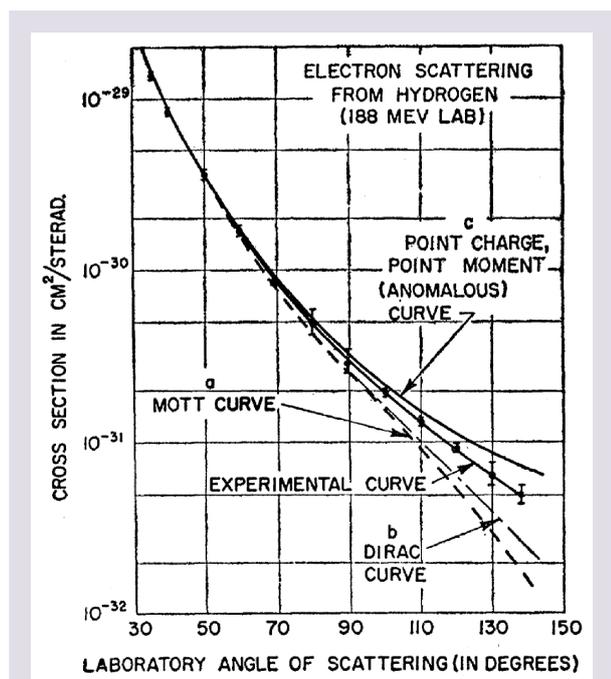


图4 电子能量为188 MeV时电子—质子微分散射截面随散射角度的变化^[31]。假设质子为点状粒子，理论结果如曲线c所示，与实验数据存在偏差

罗伯特·霍夫施塔特 (Robert Hofstadter, 1915—1990) 因对电子—原子核散射进行了开创性的研究, 并由此发现了核子的结构而获得 1961 年诺贝尔物理学奖。被发现以来, 核子是否是基本粒子一直是大家关心的一个问题。施特恩测量得到的质子磁矩与点粒子严重偏离, 说明质子具有内部结构。霍夫施塔特利用电子—质子散射实验测量了质子的尺寸约为 0.7—0.8 fm, 进一步确认了质子不是点状粒子(图 4)^[31]。

3.2 夸克模型与量子色动力学

唐纳德·格拉泽(Donald Arthur Glaser, 1926—2013) 因发明气泡室而获得 1960 年诺贝尔物理学奖。威尔逊发明的云雾室可以让我们观察到带电粒子的踪迹。格拉泽在 1952 年发明的气泡室使我们能够研究具有更高能量的粒子。当带电粒子向前穿过充满接近沸点的液体室时, 它们所经过的原子会被电离。当室内的压力降低时, 这些被电离的原子周围会出现气泡, 然后我们可以对粒子的轨迹进行拍照和分析。气泡室的发明使人们探测到了更多的粒子, 对强子谱的研究起到了重要贡献。

路易斯·阿尔瓦雷茨(Luis Walter Alvarez, 1911—1988) 因对基本粒子物理学的决定性贡献, 特别是开发了使用氢气泡室的技术和数据分析, 发现了大量的共振态而获得 1968 年诺贝尔物理学奖。继格拉泽的气泡室之后, 20 世纪 50 年代后半期, 阿尔瓦雷茨通过使用液态氢进一步发展了气泡室。他还开发了新的测量系统和基于计算机的方法来分析大量的数据, 这使他发现了一大批以前未知的粒子。

默里·盖尔曼(Murray Gell-Mann, 1929—2019) 因在基本粒子的分类(夸克模型)及其相互作用方面的贡献而获得 1969 年诺贝尔物理学奖。20 世纪五六十年代, 随着气泡室、氢气泡室、粒子加速器的应用, 人们发现了大量的“基本”粒子。截至 1963 年, 粒子数据表^[32]已经收录了近百个“基本”粒子, 其中还包括很多不稳定的共振态。人们很难相信这些粒子全部都是基本粒子。在盖

表 2 夸克的量子数, 从上到下依次为自旋、电荷量、同位旋、同位旋第 3 分量、奇异数和重子数

	u	d	s	\bar{u}	\bar{d}	\bar{s}
J	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
Q	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
I	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
I_3	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
S	0	0	-1	0	0	1
b	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$

尔曼提出夸克模型之前, 人们就试图理解这些“基本”粒子的内部结构进而对它们进行分类, 包括 1956 年的坂田(Sakata)模型和 1961 年盖尔曼与 Yuval Ne'eman 提出的八重法(eightfold way)。

1964 年, 在前人研究基础上盖尔曼和茨威格(George Zweig)独立地引入了夸克³⁾这种更基本的粒子来描述实验中发现的强子。夸克承载了 $SU(3)$ 群的基础表示(3), 共三种味道, 分别为上(u), 下(d), 奇异(s)夸克, 其反粒子($\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$)承载 $SU(3)$ 群基础表示的复共轭表示($\bar{3}$)。它们的量子数见表 2。在夸克模型中, 介子由一对正反夸克($q\bar{q}$)构成而重子由三个夸克(qqq)构成。

丁肇中和伯顿·里克特(Samuel Chao Chung Ting, 1936— & Burton Richter, 1931—2018) 因发现粲夸克而获得 1976 年诺贝尔物理学奖。在原子核、强子研究发展的同时, 人们对弱相互作用的认识也逐渐深入。到了 20 世纪 60 年代, 希格斯机制、电弱统一理论相继建立。1970 年, 为了解释与实验严重不符的味道改变的中性流的存在, 格拉肖、伊利奥普洛斯和马亚尼(Sheldon Glashow, John Iliopoulos & Luciano Maiani) 提出 GIM 机制并引入了一种新夸克⁴⁾——粲夸克。1974 年, 丁肇中和里克特分别在质子—核子对撞和正负电子对撞中发现了一个极窄的共振态^[33, 34],

3) 茨威格将其命名为 ace。

4) 早在 1964 年 Bjorken 和 Glashow 就从轻子—夸克对称性猜测存在一个与 s 夸克对应的新夸克, 当时人们并未认识到其重要性。

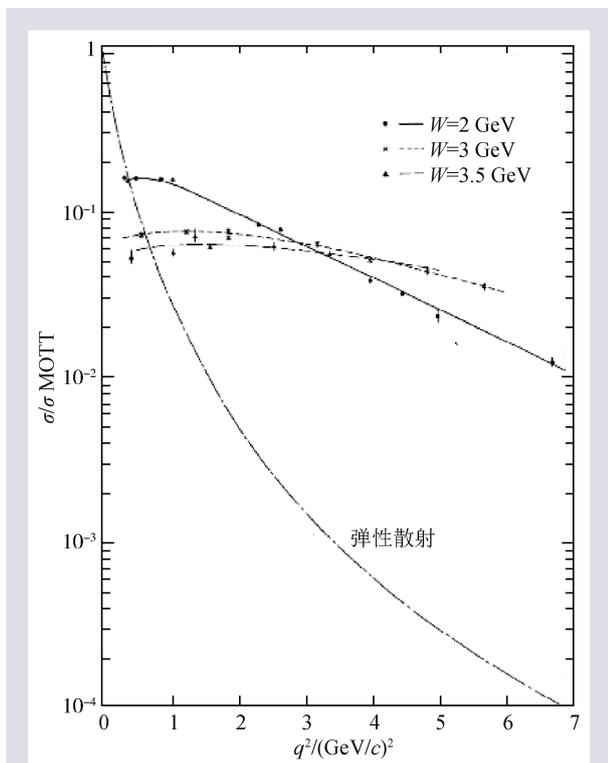


图5 电子—质子深度非弹散射数据^[35]。横坐标为转移动量的平方，纵坐标为散射截面与相对论性粒子的库仑散射截面(莫特截面)的比值，实验数据显示大动量转移的截面并不像弹性散射那样快速下降

其质量约为 3.1 GeV。丁肇中和里克特分别将其命名为 J 粒子和 ψ ⁵⁾。由于其质量远远大于之前发现的强子共振态，但宽度却很小，它不可能是仅包含 u、d 或 s 夸克的强子激发态，因此它很可能是由理论预测的 c 夸克构成。c 夸克的发现具有极其重大的意义，被称为“十一月革命”——它检验了当时描述弱相互作用和强相互作用的理论的正确性。另外两味更重的夸克，底夸克(b)和顶夸克(t)，也分别在 1977 年和 1995 年被发现，完成了标准模型中夸克部分的拼图。

杰尔姆·弗里德曼，亨利·肯德尔和理查德·泰勒(Jerome Friedman, 1930—, Henry Kendall, 1926—1999 和 Richard Taylor, 1929—2018) 因对电子—质子、电子—束缚中子的深度非弹性散射的开创性研究进而证实夸克的存在而获得 1990 年诺贝尔物理学奖。

5) 现在它的名字是 J/ψ，它是由 c \bar{c} 构成的基态矢量粲偶素，量子数为 J^{PC}=1⁻。

盖尔曼和茨威格提出的夸克模型可以很好地对实验中发现的介子和重子进行分类，将他们放入 SU(3) 群的多重态中。但很快人们就发现了新的问题。一方面，作为强子基本组分的夸克是否是真实的粒子？为什么实验中没有看到自由的夸克？还是说夸克只是作为一种辅助的理论概念方便理解实验中发现的大量的强子？另一方面，人们发现在重子十重态中，夸克作为费米子似乎违反了泡利不相容原理。比如 Δ^{++} 、 Δ^- 和 Ω^- 在夸克模型中其夸克组分分别为 uuu、ddd 和 sss。实验中发现这些粒子作为基态，总自旋为 3/2 并且空间波函数两两互为 S 波。这样其整体波函数是交换全对称而非全同费米子需要满足的交换反对称。

为解决第二个问题，就必须引入一个被称为颜色(color)的自由度。每味夸克具有红绿蓝(r, g, b)三种颜色，承载另一个 SU(3) 对称性的基础表示。只需上述三种重子的颜色波函数为颜色 SU(3) 群的单态即可满足波函数的交换全反对称性。引入了新的颜色自由度后，新的问题随之而来。为什么实验中发现的强子均为颜色单态而不存在带颜色的呢？为解释这样的现象人们提出了色禁闭的假设：只有颜色 SU(3) 群的单态才能自由地存在。由于夸克是颜色 SU(3) 的三重态，我们不可能在实验中探测到自由的夸克。

如果探测不到自由的夸克，那么夸克是真实存在的吗？20 世纪 60 年代的深度非弹散射实验给出了肯定的答案^[35, 36]：核子内部存在点状带电粒子。电子—质子深度非弹散射中出现大能量和大动量转移的几率很高(图 5)。这种大能量和大动量转移的过程暗示质子内部存在定域的散射中心。

戴维·格罗斯，戴维·波利策和弗兰克·维尔切克(David J. Gross, 1941—, H. David Politzer, 1949— 和 Frank Wilczek, 1951—) 因发现强相互作用的渐进自由而获得 2004 年诺贝尔物理学奖。量子色动力学(QCD)是标准模型中描述强相互作用的基本理论，它是基于颜色 SU(3) 对称性的规范理论。1973 年，波利策和格罗斯及其学生维尔切克独立地发现了非阿贝尔规范场的渐进自由的性质^[37, 38]，表现为如下形式，

$$\alpha_s(Q) = \frac{\alpha_s(M)}{1 + (b_0 \alpha_s(M) / 2\pi) \log(Q/M)}, \quad (4)$$

其中 α_s 表示强相互作用的精细结构常数，即相互作用强度， $b_0 = 11 - 2N_f/3$ ， M 为任意一个重正化能量点。当夸克味道的数目 $N_f = 6$ 时， $b_0 > 0$ ，此时 $\alpha_s(Q)$ 随着相互作用能标 Q 的变大而趋于零，此即 QCD 的渐进自由。

4 强相互作用前沿简介

目前强相互作用的研究前沿主要包括三个方面：强子结构、极端条件下的核结构和高温高密度核物质。这三个领域分别占美国能源部相关方面经费的约 30%，剩余部分分配给相关的交叉学科研究，如核天体物理、标准模型在核物理中的检验及核技术应用等。

4.1 强子结构

目前 QCD 是公认的描述强相互作用的基本理论。但是由于其低能非微扰的特性(QCD 耦合系数在低能区不再是小量，无法按其幂次进行微扰展开)，我们很难直接从 QCD 出发严格计算出夸克通过交换胶子形成强子的能谱，也无法准确地描述夸克和胶子是如何构成强子的。相比于原子结构和原子核结构，研究强子结构的最大困难是造成组分数可变的非淬火效应：强子中夸克的动能和势能比一对正反夸克的质量还大，胶子可变成正反夸克对 $q\bar{q}$ ，使得强子中的组分夸克数不确定。即使在唯一稳定的强子——最轻的重子(质子)中，实验观测已确立除了 3 个价夸克 uud 外，还存在胶子场中产生的 $q\bar{q}$ 。除了传统夸克模型中的 $q\bar{q}$ 介子和 qqq 重子之外，QCD 还允许其他的强子构型存在，比如四夸克态、五夸克态、混杂态、胶球等，这些被称为奇特强子态(exotic states)，如图 6 所示。

目前探索强子内部夸克—胶子结构的实验主要有两个基本途径：一是通过高能电磁探针与核子的深度非弹散射测量核子的夸克—胶子结构函数，二是通过高能碰撞产生强子基态和激发态，

研究强子谱。

我国的强子结构研究起步于 20 世纪 60 年代层的子模型理论研究，得益于北京正负电子对撞机 90 年代开始的强子谱实验研究的极大促进，目前已走在国际最前列。美国物理学会主编的 *Physics* 杂志近十年来评选出的年度重要亮点成果中，强相互作用最亮的两项成果是：(1) 2013 年以我国科学家为主的 BESIII 实验组发现了 $Z_c(3900)$ 四夸克态；(2) 2015 年我国科学家做出突出贡献的 LHCb 实验组发现了两个 P_c 五夸克态。我国理论物理学家在这些多夸克态的预言和解释方面做出突出贡献，应邀为物理学顶级综述期刊撰写相关综述^[39, 40]。对这些奇特强子态的实验寻找和理论研究是强子结构研究的前沿热点，进一步揭示了非淬火效应在强子结构和夸克禁闭机制中的重要作用。

我们从物质微观结构研究的历史中知道，原子能谱的研究为我们带来了原子的量子理论，促进了量子力学的建立；原子核谱的研究带来了原子核的壳层模型和集体运动模型；那么对强子能谱的研究又会为我们带来什么新的突破性发现呢？让我们拭目以待。

4.2 极端条件下的核结构

自门捷列夫整理出元素周期表以来，人们一直在逐步地发现、制造新的元素和核素(即原子核)。目前已经发现的核素包括 300 多个自然界存在的核素以及超过 3000 个人工合成的核素。而理论预期总共大约有 9000 个核素。因此，还有大量的新核素等待人们去探寻，特别是很多理论模型

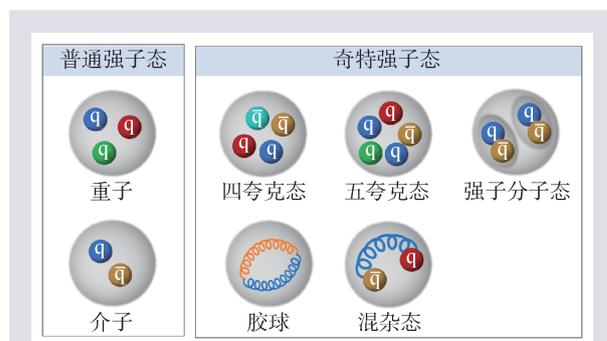


图 6 传统强子与奇特强子态，QCD 还允许更多夸克组分的色单态强子的存在

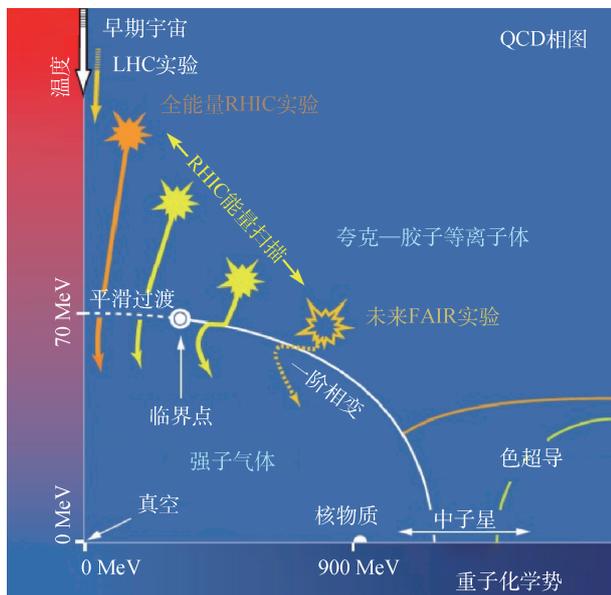


图7 QCD相图。横轴为重子化学势(可简单理解为重子或夸克的数量), 纵轴为温度

预言可能存在的质子数在120左右的超重核稳定岛。经典的核壳结构模型和集体运动模型成功地解释了自然界中观测到的稳定原子核的结构, 但高速旋转、超级变形、反常中子质子比、超重、掺杂超子等极端条件下的不稳定原子核出现了很多新的现象和新的结构, 如何在一个统一的理论框架下定量地描述所有原子核的内部结构是当前核结构物理学家面临的一个新的挑战。关于这些不稳定核的研究对理解宇宙中各种化学元素核合成的过程及丰度分布等核天体物理问题也具有重要意义。

除了由核子组成的原子核, 人们还尝试向原子核中注入含有s夸克的超子(Λ , Ξ^0 , Ξ^-)形成超核。对这些超核性质的研究也会加深我们对低能强相互作用的理 解。此外, 原子核内非核子自由度(多夸克态、核子激发态、介子)的贡献有多大, 也是一个重要的研究方向。

4.3 高温高密核物质

由强相互作用主导的物质状态的转变对我们理解早期宇宙的演化及中子星等致密星体的结构与性质至关重要。日常所见的物质相变本质上由

电磁相互作用主导, 我们可以从实验和理论中得到相应的相图。类似地, 强相互作用的物质的相变也由其相图描述(图7)。强相互作用的物质包括以下几种状态:

(1)核物质(nuclear matter), 由大量质子和中子按一定密度组成的空间均匀体系, 此时的温度接近0, 饱和密度处对应的重子化学势约为900 MeV。重核中心位置以及致密星体内部可以近似看作核物质。另外, 在重离子碰撞实验中也可能形成核物质。

(2)强子气体(hadron gas)。当重子化学势不大, 同时具有非零的温度时, 强子会以类似于气体的状态存在。

(3)色超导(color superconductor)。增加重子化学势, 保持低温, 强相互作用的物质会进入一个颜色超导体的状态, 类似于低温下的电超导体。

(4)夸克-胶子等离子体(quark-gluon plasma, QGP)。在高温高密时, 形成强子的夸克会混杂着胶子变成等离子体的状态, 相互独立。

在宇宙的早期阶段, 正反物质相同, 重子化学势为零, 但又具有很高的能量, 从而那时强相互作用物质很可能处于QGP状态。而目前温度逐渐冷却, 我们见到的物质处于核物质的状态。目前对QCD相变的实验研究主要集中在两个方向:

(1)高温低密, 理想气体的研究。格点QCD的计算发现在小化学势时, 随着系统温度的升高, 系统会从强子气体相平滑过渡到夸克-胶子等离子体相。流体动力学模拟显示QGP更接近理想流体。该方向的实验探究主要由布鲁克海文国家实验室的相对论重离子对撞机(RHIC/BNL)和欧洲核子中心的大型强子对撞机(LHC/CERN)进行。

(2)低温高密, 色超导的研究。该方向主要由德国重离子研究中心的反质子与离子研究装置(FAIR/GSI)和兰州中国科学院近代物理所的重离子冷却储存环(CSR)进行相关实验研究。

另外, 中国科学院近代物理研究所强流重离子加速器装置(HIAF)建成后将为核物理和核天体物理基础研究创造国际领先水平的条件, 为重离子束应用研究提供先进的实验平台, 为核能开发、

核安全及核技术应用提供理论、方法、技术和人才支撑。

5 总结与展望

强相互作用决定了强子、原子核两个物质微观基本层次的结构，也是基本粒子、宇宙天体

演化物理的重要组成部分。尽管经过了约一百年的探索，人们对强相互作用有了比较全面的认识，但我们仍面临着很多待解之谜。我国大科学装置的发展，包括北京正负电子对撞机(BEPCII)、HIAF等，理论和实验的相互配合使我国强相互作用物理的研究走在国际前列，未来大有可为。

参考文献

- [1] Kragh H. 2012, arXiv:1202.0954
- [2] Rutherford E. *Philosophical Magazine*, 1899, 47: 109
- [3] Rutherford E, Thomas R. *Philosophical Magazine*, 1909, 17: 281
- [4] Rutherford E, Soddy F. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1903, 5(29): 576
- [5] Andrade E N C, Houston W V. *The Physics Teacher*, 1964, 2(7): 339
- [6] Rutherford E. *Phil. Mag. Ser. 6*, 1911, 21: 669
- [7] Rutherford E. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1919, 37(222): 581
- [8] Rutherford E. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1920, 97(686): 374
- [9] Soddy F. *Nature*, 1913, 92: 399
- [10] Aston F W. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1919, 38(228): 707
- [11] Bohr N. *Nature*, 1921, 107: 104
- [12] Chadwick J. *Nature*, 1932, 129: 312
- [13] Hahn O. *Naturwissenschaften*, 1939, 27: 11
- [14] Meitner L, Frisch O. *Nature*, 1930, 143: 239
- [15] Frisch O. *Nature*, 1930, 143: 276
- [16] Blackett P. *Journal of the Chemical Society Transactions, Series A*, 1925, 107(742): 349
- [17] Iwanenko D. *Nature*, 1934, 133: 981
- [18] Yukawa H. *Proc. Phys. Math. Soc. Jap.*, 1935, 17: 48
- [19] Choudhuri B, Bose D. *Nature*, 1941, 148: 259
- [20] Choudhuri B, Bose D. *Nature*, 1942, 149: 302
- [21] Lattes C, Muirhead H, Occhialini G *et al.* *Nature*, 1947, 159: 694
- [22] Mayer M G. *Phys. Rev.*, 1948, 74: 235
- [23] Mayer M G. *Phys. Rev.*, 1949, 75: 1969
- [24] Haxel O, Jensen H, Suess H E. *Phys. Rev.*, 1949, 75(11): 1766
- [25] Rainwater J. *Phys. Rev.*, 1950, 79: 432
- [26] Bohr A. *Phys. Rev.*, 1951, 81: 134
- [27] Bohr A, Mottelson B R. *Phys. Rev.*, 1953, 89: 316
- [28] Bohr A, Mottelson B R. *Phys. Rev.*, 1953, 90: 717
- [29] Bethe H A. *Phys. Rev.*, 1939, 55: 434
- [30] Burbidge M E, Burbidge G R, Fowler W A *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 1957, 29: 547
- [31] Hofstadter R. *Rev. Mod. Phys.*, 1956, 28: 214
- [32] Roos M. *Rev. Mod. Phys.*, 1963, 35: 314
- [33] Aubert J J *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1974, 33: 1404
- [34] Augustin J E *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1974, 33: 1406
- [35] Bloom E D *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1969, 23: 930
- [36] Breidenbach M *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1969, 23: 935
- [37] Politzer H D. *Phys. Rev. Lett.*, 1973, 30: 1346
- [38] Gross D J, Wilczek F. *Phys. Rev. Lett.*, 1973, 30: 1343
- [39] Guo F K, Hanhart C, Meißner U *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 2018, 90(1): 015004
- [40] Chen H X, Chen W, Liu X *et al.* *Phys. Rept.*, 2016, 639: 1

读者和编者

《物理》有奖征集 封面素材

为充分体现物理科学的独特之美，本刊编辑部欢迎广大读者和作者踊跃投寄与物理学相关的封面素材。要求图片清晰，色泽饱满，富有较强的视觉冲击力和很好的物理科学内涵。

一经选用，均有稿酬并赠阅该年度《物理》杂志。

请将封面素材以附件形式发至：physics@iphy.ac.cn；联系电话：010-82649029。

《物理》编辑部