

天体环境下快中子俘获过程相关的核物理*

李竹¹ 孙保华^{1,†} 孟杰^{1,2,‡}

(1 北京航空航天大学物理科学与核能工程学院 北京 100191)

(2 北京大学物理学院 北京 100871)

2012-12-24收到

† email: bhsun@buaa.edu.cn

‡ email: mengj@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20130705

Nuclear physics of the astrophysical rapid neutron-capture process

LI Zhu¹ SUN Bao-Hua^{1,†} MENG Jie^{1,2,‡}

(1 School of Physics and Nuclear Energy Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

(2 School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

摘要 在人类历史上,曾经吸引无数哲学家、天文学家思考的一个问题是“我们从哪里来”。现代的科学揭示了一个答案:恒星。恒星产生了构成生命的主要元素,如碳、氧、氮、硫等,但是比铁更重的元素,如金、铂、铀等,却无法在恒星内部产生。由于原子核物理实验与天文观测技术的限制,这些重元素的起源仍有许多不确定性。文章主要探讨重元素起源的一个重要合成机制——快中子俘获过程,以及相关的原子核物理观测量,如原子核质量、半衰期、中子俘获截面和裂变等,并回顾最新的实验和理论进展。

关键词 快中子俘获过程, 丰中子原子核, 原子核质量, 原子核寿命, 中子俘获截面, 裂变

Abstract One of the most fundamental questions for human beings is “where are we from”. One answer that has been unveiled by astronomers is the stars. The main elements of the building blocks of life, including carbon, oxygen, nitrogen and sulfur, were produced in the cores of stars. However, nothing heavier than iron-56, such as gold, platinum, and uranium, can be formed via fusion inside a star. Limited by nuclear experimental techniques and astronomical observations, where all the heavier nuclei came from is still an open question. In this paper, the nuclear physics observables (e.g. nuclear masses, half-lives, neutron-capture cross sections, and fission) for the rapid neutron-capture process, one of the major processes responsible for the formation of heavy elements, will be discussed. A brief review on the progress of related nuclear physics experiment and theory will be presented.

Keywords rapid neutron-capture process, neutron-rich nuclides, nuclear mass, nuclear lifetime, neutron-capture cross section, fission

*国家自然科学基金(批准号: 10975008; 11035007; 11105010; 11128510; 11235002)、新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-09-0031)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2013CB834400)资助项目

1 引言

我们居住的地球，生存所必须的水，补充能量所需的食物，抑或是呼吸的空气以及人类自身由什么组成？我们仰望星空，炽热的太阳、闪烁的繁星，又由什么组成？也许每个人都会惊讶，构成这个五彩缤纷、变化无穷世界的基石竟然是一百余种元素。经过数世纪的探索，目前已经鉴别的元素共有 114 种，其中天然存在的有 88 种，另外 26 种是在实验室中合成的。这些元素的性质、分布规律、起源以及演化是自然科学研究的一个基础课题。

精确的实验数据表明，宇宙中可见物质质量的 73% 以氢原子的形式存在，25% 以氦原子的形式存在，剩下大约 2% 则以其他元素的形式存在。氢和氦元素，在宇宙诞生初期就形成了，而更重一点元素则是在恒星内部通过无数核反应产生的。然而，比铁更重的元素(即超铁元素)却无法在恒星内部产生，对于它们的起源至今尚未完全了解。虽然由铁至铀之间的元素丰度(即它们占宇宙中总原子数的比例)很小，但却是组成地球和人类必不可少的重要部分，研究它们的起源是探索人类自身起源过程中不可或缺的一个环节。

本文首先简要介绍宇宙元素丰度的观

测结果，进而讨论超铁元素起源的一个关键过程——快中子俘获过程，以及这一过程所涉及的主要核物理观测量，如原子核质量、半衰期、热中子俘获截面和裂变等。文章将着重于回顾和讨论最新的实验和理论进展。

2 宇宙元素丰度

元素丰度的精确观测，在研究宇宙元素的形成和银河系的化学演化研究中具有重要价值。早在 20 世纪初，化学家就开始尝试利用地壳和陨石的化学成分资料确定宇宙物质的平均成分。1937 年，著名的地球化学家 Goldschmidt 根据当时的资料，对化学元素进行分类并编纂了一份宇宙元素丰度表^[1]。他认为，没有经历地壳岩石那样熔融和结晶的陨石能提供宇宙物质的平均成分。稍早时期，天文学家甚至已经通过观测太阳光谱来测定太阳的元素丰度^[2]，并用于探讨太阳能量来源及恒星年龄问题。1938 及 1939 年，核物理学家 Weizsäcker 和 Bethe 先后提出太阳中正在进行热核聚变反应的观点^[3, 4]。1956 年，Suess 和 Urey 综合陨石和太阳光谱资料，编制了新的元素丰度表^[5]。受 Suess 和 Urey 的工作启发，Burbidge 夫妇、Fowler 和 Hoyle 合作，在第二年发表了元素的恒

星核合成理论^[6]。有趣的是，Cameron 几乎是在同时利用当时“时髦的”计算机进行研究，独立地给出了同样的理论^[7]。他们的理论指出，恒星内部的“元素工厂”通过核反应制造了除氢、氦以外的其他元素。今天，对于元素的起源，物理学已经能够给出这样一个大致的框架：

(1) 氢、氦以及少量的锂来自宇宙诞生初期的大爆炸核合成过程。

(2) 在恒星内部，首先由 4 个氢原子核通过聚变合成一个氦原子核(即氢燃烧)，并放出大约 27 MeV 的能量。这是恒星能源供给的主要方式。例如，太阳以这种方式稳定向外辐射能量大约 100 亿年。

(3) 当恒星内部受引力进一步被压缩时，氦原子核在更高的温度下可进一步聚变成碳、氧、氖等原子核(即氦燃烧阶段)。

(4) 当恒星质量足够大(大于 11 个太阳质量)时，碳原子核与硅原子核在更高的温度下聚变成为质量数小于 60 的铁族原子核。恒星内部的元素核合成过程最终止于铁族元素，形成铁峰。

(5) 铁峰附近的原子核通过中子俘获过程可以产生更重的原子核。根据中子俘获率和 β 衰变率的相对大小，中子俘获过程又分为慢中子俘获过程(s 过程)和快中子俘获过程(r 过程)。

(6) 部分重核在高温环境中，被光解成为质量较轻的原子核(p 过程)。合成缺中子原子核的可能形成机制还包括快质子俘获过程(rp 过程)等。

在不同质量的恒星中，核合成过程有所不同。质量较小的恒星只能发生氢燃烧过程，而大质量恒星则能进行更多的核合成过程，进而合成更重的元素。恒星在寿命末期，通过星风或是爆发的形式，把内部合成的元素抛向宇宙空间，成为后代恒星的原料。这也正是我们太阳系中重元素(图 1)起源的基本过程。

无论恒星的质量如何，其内部发生的核反应既依赖于温度、密度等天体环境条件，也依赖于参与反应的原子核性质。例如，Hoyle 曾在上世纪 50 年代发现，恒星中的氦燃烧过程无法产生宇宙中所观测到

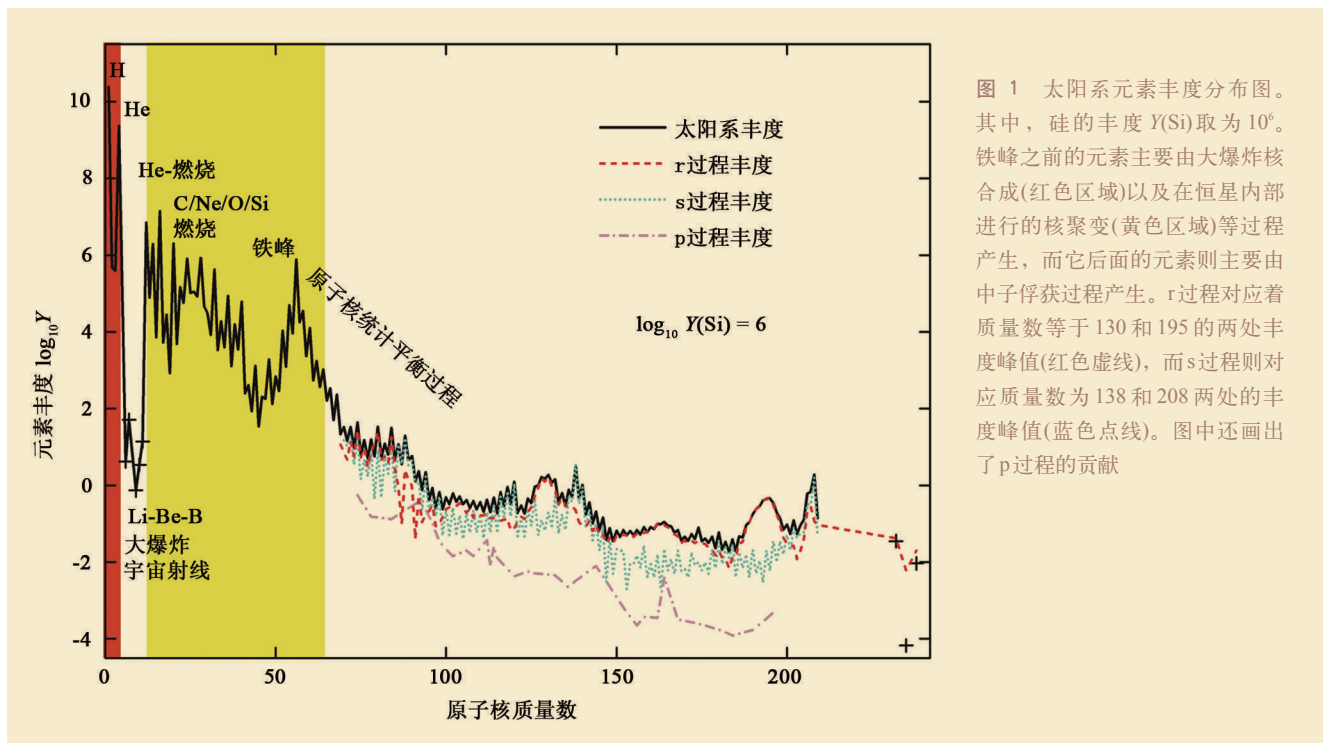


图 1 太阳系元素丰度分布图。其中，硅的丰度 $Y(\text{Si})$ 取为 10^6 。铁峰之前的元素主要由大爆炸核合成(红色区域)以及在恒星内部进行的核聚变(黄色区域)等过程产生，而它后面的元素则主要由中子俘获过程产生。r 过程对应着质量数等于 130 和 195 的两处丰度峰值(红色虚线)，而 s 过程则对应质量数为 138 和 208 两处的丰度峰值(蓝色点线)。图中还画出了 p 过程的贡献

的碳-12丰度,除非碳-12原子核存在一个比基态能量高7 MeV左右、自旋为 $2\hbar$ 、宇称为正的激发态^[8]。随后的实验证明,碳-12原子核确实存在这样一个激发态^[9]。为了纪念Hoyle,这个态也被称为Hoyle态。由此看出,元素起源的研究不仅仅需要认识天体演化的物理过程,也需要获得原子核性质的完整信息。

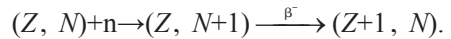
3 快中子俘获过程

稀有的重金属金和银,核电站的重要原料铀-235(^{235}U)或钚-239(^{239}Pu)等,都无法在恒星内部产生。由于铁峰元素与质子、 α 粒子及其他原子核之间的库仑斥力太强,使得聚变反应难以进行,加之聚变合成超铁元素需要额外的能量,因此铁元素就是恒星工厂“聚变流水线”的最终产物。

比铁更重的原子核是如何产生的?这是科学家需要解答的一个基本问题,也是当前核天体物理研究中的热点之一。由Fe至U的重元素起源问题,也被美国国家研究理事会列为21世纪的十一大待解之谜之一^[10]。1957年,Cameron以及Burbidge夫妇、Fowler和Hoyle分别提出一种可能的合成方式:快中子俘获过程。它发生在爆炸性的中子环境中,产生约一半左右的超铁元素以及所有比铋重的元素。现代观点认为,更重的原子核是由铁原子核逐步俘获自由中性核子——中子,然后经过 β 衰变形成的。根据中子俘获和 β 衰变速率的相对快慢,这一过程又可以分为s过程和r过程,它们各自产生大约一半的超铁元素。

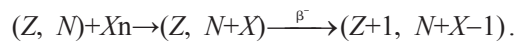
在s过程^[11]中,原子核的中子俘获率小于 β 衰变率。含有Z个质子和N个中子的稳定原子核首先俘获一个中子(用n表示),产生的含有Z个质子和N+1个中子

的不稳定原子核随后发生 β 衰变,即



通过这样的方式,s过程可以产生原子序数更高的原子核,如图2所示,它的核合成路径在核素图上几乎是沿着 β 稳定线进行的。

一般认为,r过程^[12, 13]是爆发性核合成过程。在极高温度和极高中子数密度下,原子核可通过快速俘获数个中子形成远离稳定线的丰中子核素,即



其中X代表俘获的中子数目。随着俘获中子数目的增加,光解反应速率越来越快,最终在某些关键核素处达到俘获中子和光解反应的动态平衡。相应地,核合成过程需要等待这些核素 β 衰变之后,才能生成更重的原子核,这些关键核素被称为等待点核素。等待点核素的 β 衰变性质决定了r过程的时间尺度,并影响最终的核素丰度分布,因此等待点核素对r过程的研究非常重要。当r过程进行到质量数为220左右的裂变原子核区时,裂变将会影响超铀元素的核合成过程,并终止r过程。因此,r过程的典型特征是原子核的中子俘获率远大于 β 衰变率,如图2所示,r过程核合成路径也偏向核素图的丰中子区。r过程是目前唯一可以产生铀、钚等重元素的核合成过程,也是唯一可能在天体条件下产生超重元素的反应过程。

虽然快中子俘获过程在核天体物理中扮演着重要角色,但是受原子核物理实验技术与天文观测的限制,目前对r过程合成机制的研究还不完善。一般认为,可能的r过程天体物理场所包括原中子星表面的中微子星风、中子星融合、核心崩塌型超新星喷射、O-Ne壳中的冲击层和 γ 射线爆发等^[12, 13]。另一方面,与s过程相比,r过程路径核素的产生截面小、寿命短,对这些原子核的性质还无法进行大规模的精

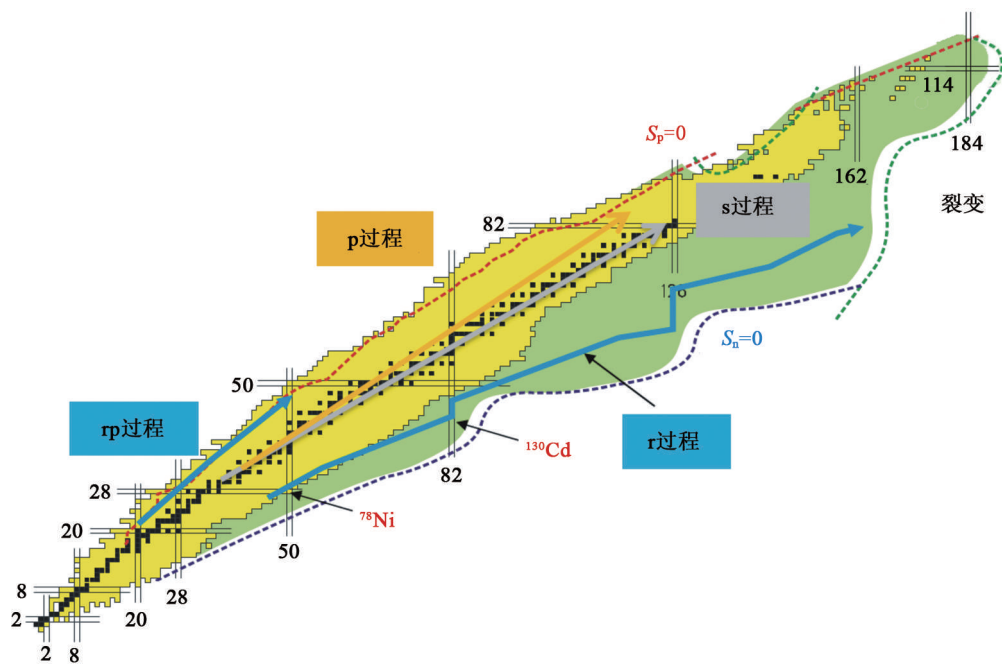


图 2 元素核合成过程示意图。黄色和绿色区域分别代表实验已鉴别的和理论预言的原子核素区；黑色方块代表自然界稳定存在的原子核，共有 300 多个(组成 β 稳定线)。图中还标记了可能的核合成过程，包括 s 过程、r 过程、快中子俘获(rp)过程、光解(p)过程。还给出了质子滴线(即单质子分离能 $S_p=0$ 的原子核组成的边界，红色虚线)、中子滴线(即单中子分离能 $S_n=0$ 的原子核组成的边界，蓝色虚线)以及受自发裂变限制的核素图边界(绿色虚线)

实验测量。因此，为了解超铁元素的起源这一基本问题，必须依赖于原子核理论模型。然而，各个理论模型对远离稳定线原子核性质的预言存在着较大差异^[14]，这必将影响相应快中子俘获过程理论模拟的准确性。例如，不同原子核质量模型对远离稳定线时中子数 $N=82$ 和 126 处的壳结构演化预言，将直接影响质量数 $A=130$ 和 195 峰附近的丰度分布。较强的幻数壳效应，即具有中子数 $N=82$ 或 126 的原子核很难再俘获中子，将导致在 $A=120$ 和 170 处的丰度被低估^[15, 16]。在下面的讨论中，将着重从核物理的角度介绍与 r 过程相关的实验和理论进展。

4 快中子俘获过程中的原子核物理

对 r 过程的研究已经历了半个世纪之久。对于 r 过程的探索，不仅加深了人们对丰中子化物质的恒星爆发事件的认识，而且促进了人们对丰中子奇特原子核性质的探索。同时，再现 r 过程元素丰度已经被用于约束相应的原子核理论模型^[17, 18]。

例如，当质子数 Z 或中子数 N 是 2, 8, 20, 28, 50, 82 等数目时，原子核会更加稳定，这些数字被称为原子核的幻数。而人们已经认识到，快中子俘获元素 $A=80, 130$ 和 195 的三个丰度峰分别对应于原子核的三个中子幻数 $N=50, 82$ 和 126。此外，对 r 过程的研究还有助于回答一些物理学研究中的基本问题，例如自然界中是否存在超重元素等。

快中子俘获过程的研究涉及到数千个丰中子奇特原子核的结构和反应信息。丰中子原子核的静态性质，例如质量、 β 衰变寿命、配分函数，都是 r 过程理论计算不可或缺的部分。同时，由于核合成是一个动态过程，所以我们对这些原子核的动态性质，即核反应(主要是中子俘获反应)，也必须有详细的数据。另外，原子核俘获中子的过程不可能无休止地进行下去，当核合成进行到足够重的原子核时，自发裂变、中子诱发裂变或 β 缓发裂变等将阻止更重元素的产生，因此原子核的裂变性质自然也是回答元素起源问题的关键一环。其他的重要的信息还包括 α 衰变和

长寿命的同核异能素等。表1中总结了模拟r过程时所必需的原子核物理观测量，同时指出了相应的物理意义。

4.1 原子核质量的研究现状

上世纪70年代末，科学家已经完成了稳定线附近原子核的质量测量。随后，质量测量对象由β稳定线附近的原子核延伸到远离稳定线的短寿命奇特原子核。尤其是自2003年以来，实验储存环和潘宁阱等质谱仪得到了广泛应用，实

验上测量了一大批新的、高精度的质量数据^[14, 19-21]。截止到2012年底，实验上共发现约3300个核素，其中对约2438个原子核进行了质量测量^[22]。对于稳定线附近的原子核，相对测量误差已达 10^{-11} ；而对于远离稳定线的丰中子原子核，实验测量结果误差较大，亟需获得更高精度的实验结果。目前原子核质量测量的最新进展总结如图3所示。

在原子核物理发展初期，物理学家试图从理论上统一描述原子核的质量。液滴模型是最早出现的、半经验的原子核质量

表1 快中子俘获过程中涉及的主要核物理观测量以及对应的物理效应

物理量	物理效应
质量(中子分离能、反应能)	r过程演化路径
半衰期	丰度分布、r过程时间尺度
缓发中子衰变分支比	光滑最终元素丰度分布曲线
配分函数(原子核能级)	元素丰度分布(依赖性较弱)
裂变分支比 (自发裂变、β缓发裂变、中子诱发裂变) 以及裂变产物	r过程终止区； 核时钟； 裂变循环以及丰度分布
中子俘获截面、中微子非弹性散射截面	中子冻结过程中的最终元素丰度分布；等待点近似条件
同核异能素(长寿命激发态、核能级)	r过程路径分支比； 最终元素丰度分布； r过程时间尺度

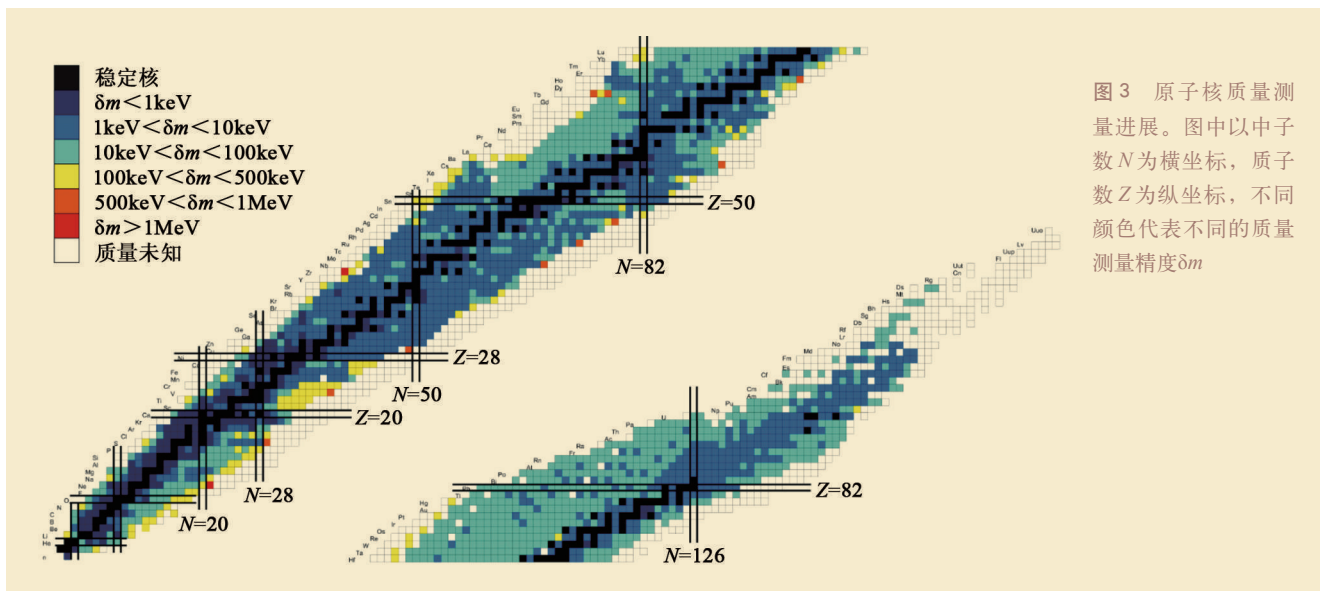


图3 原子核质量测量进展。图中以中子数N为横坐标，质子数Z为纵坐标，不同颜色代表不同的质量测量精度 δm

公式^[23]。在液滴模型的基础之上,利用 Strutinsky 方法考虑壳结构效应,发展的宏观—微观质量模型是目前使用最广的原子核质量公式,代表性的模型包括基于微观 Yukawa 势的有限力程液滴模型 (FRDM)^[24] 以及基于微观 Woods—Saxon 势的 WS 模型^[25]、基于 Thomas—Fermi 近似和 Strutinsky 壳修正的 ETFSI 模型^[26] 等。它们均可很好地再现两千多个原子核的质量。但是,这些模型的宏观和微观部分并非完全自治。而 r 过程研究需要大量未知的丰中子原子核信息,为了提高理论的可靠性,需要发展微观自治的理论模型。

上世纪 90 年代以来,随着计算能力的提高,完全微观的原子核结构理论也取得了重要进展,其中包括相对论的协变密度泛函理论(CDFT)^[27]和非相对论的 Skyrme Hatree—Fock—Bogoliubov(HFB)理论^[28]等。相对论的原子核多体理论可以自然给出原子核的壳结构信息,而且协变性要求可以减少模型参数。这些微观理论不仅可以自治地给出原子核的所有基态和激发态性质,对已知质量的最丰中子原子核的描述已经能够和宏观模型平分秋色。采用点耦合相互作用参数组 PC-PK1 的协变密度泛函理论模型^[29],在考虑原子核的转动修正后,对最新测量的重核质量的描述已经可以精确到 0.86 MeV(均方根偏差)的水平^[30]。对于质子数 Z 和中子数 N 均大于等于 8 的 2149 个原子核,协变密度泛函理论预言的质量与实验数据的均方根误差约为 1.44 MeV^[31]。此外,对于已知质量的最丰中子原子核,图 4 给出了协变密度泛函理论预言的质量与实验测量值之间的均方根误差。作为比较,其他常用质量公式的误差也在图 4 中给出。

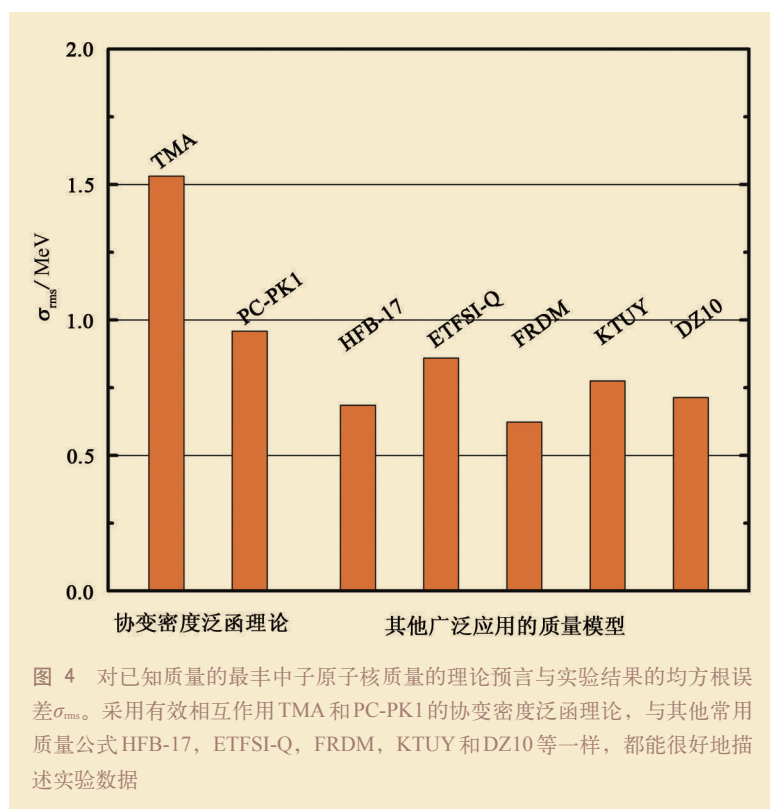


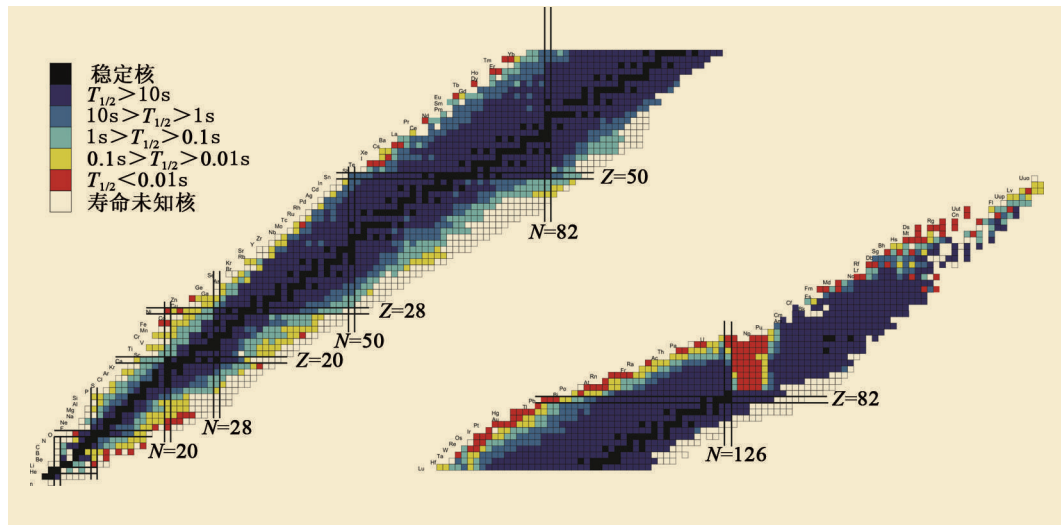
图 4 对已知质量的最丰中子原子核质量的理论预言与实验结果的均方根误差 σ_{rms} 。采用有效相互作用 TMA 和 PC-PK1 的协变密度泛函理论,与其他常用质量公式 HFB-17, ETFSI-Q, FRDM, KTUY 和 DZ10 等一样,都能很好地描述实验数据

4.2 原子核 β 衰变

除了丰中子原子核的质量外, r 过程计算时所需的核物理观测量还包括 β 衰变率和中子俘获截面等。其中, β 衰变寿命决定了 r 过程的时间尺度。目前,实验上已经测量 β 衰变寿命的原子核超过 3000 个,相应的实验结果如图 5 所示。除了少数几个关键等待点外, r 过程中涉及的大部分原子核的 β 衰变寿命仍然未知。

研究原子核 β 衰变的理论模型始于上个世纪 30 年代著名的 Fermi 理论^[32]。目前,主要是运用壳模型和准粒子无规相位近似(QRPA)进行大规模的原子核 β 衰变计算。壳模型从有效相互作用出发,考虑组态混合,可以很好地描述原子核的 β 衰变^[33]。但是,利用壳模型研究远离稳定线的重核需要巨大的组态空间,短期

图5 原子核寿命($T_{1/2}$)的测量进展。图中不同颜色代表的是原子核不同的寿命区间



之内难以实现。与之相比，准粒子无规相位近似是一个不错的选择，它以关联的激发态代替粒子激发，可以很好地用于任意重核的 β 衰变研究。

为了描述r过程中大量未知的丰中子原子核的 β 衰变，需要发展微观自治的理论模型。最近，基于相对论Hartree—Fock—Bogoliubov理论所发展的包含中子

—质子关联的准粒子无规相位近似(RHFB+QRPA)方法^[34]，系统研究了 $20 \leq Z \leq 50$ 区域丰中子原子核的 β 衰变寿命，微观自治地给出了与 β 衰变实验数据相符的结果。图6以Cd同位素为例，给出了RHFB+QRPA预言的 β 衰变寿命与实验的比较。

4.3 中子俘获截面

低能中子俘获反应是r过程中最重要的原子核反应。与实验室中在确定的质心系能量下进行的核反应不同，天体环境中的原子核处于热平衡状态，且能量状态按照玻尔兹曼分布律布居。也即，r过程中的中子俘获截面不仅是能量相关的，而且是状态相关的。

由于r过程涉及到的反应能量较低，在实验室中对中子俘获截面进行直接测量非常困难。目前常用方法是通过间接反应得到相应核的能级分布，而后结合理论进行计算反推出相应结果。随着新一代放射性束流装置的建设和运行，对r过程中子俘获截面的测量工作获得良好的机遇，例如CERN的n-TOF设备等^[35]。然而，总体说来，研究r过程所需的核反应数据目前还只能依赖于理论预言。

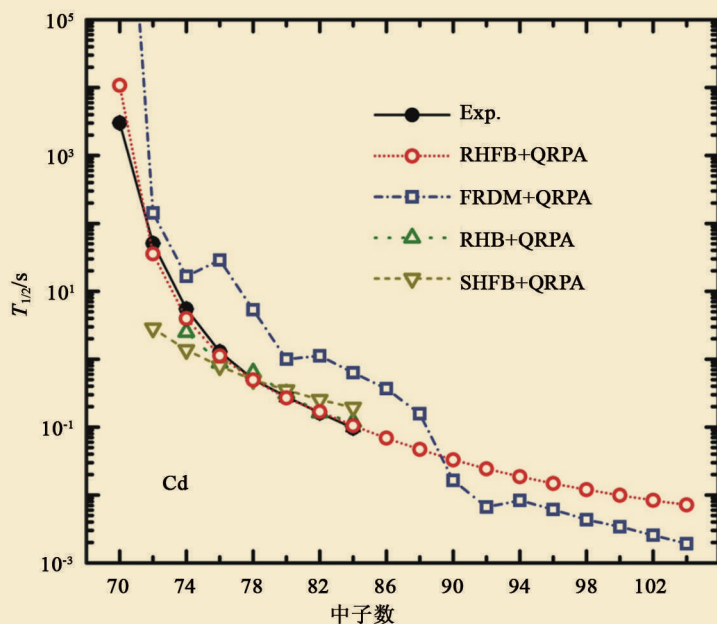


图6 Cd同位素的原子核 β 衰变寿命($T_{1/2}$)。RHFB+QRPA, FRDM+QRPA, RHB+QRPA, SHFB+QRPA 分别对应不同的理论框架, Exp.为相应的实验结果。本图取自文献[34]

在原子核反应模型中, Hauser—Feshbach 统计模型广泛用于天体环境下的反应截面计算。该模型假设, 位于原子核反应能量附近的能级密度足够大(一般估计的临界值是 5—10 MeV⁻¹³⁶), 进而可通过统计方法描述反应过程。目前, 基于该模型的计算已经形成了完整的核反应数据库。但是, 该模型是否能可靠地用于描述涉及丰中子奇特核, 特别是轻元素(质量数 $A < 20$)的中子俘获反应仍有待检验^[37]。

4.4 裂变

原子核裂变在 r 过程中同样扮演着重要角色^[38]。一方面, 当 r 过程进行到质量数为 220 附近的原子核时, 裂变会影响超铀元素的核合成过程, 并终止 r 过程; 另一方面, 这些重核裂变为质量数为 100 左右的原子核, 并以此为基础进行中子俘获, 形成 r 过程中的裂变循环, 影响 $A \approx 130$ 区域的最终元素丰度分布。

由于 r 过程合成的重核远离 β 稳定线的丰中子核, 其裂变性质难以通过实验测量, 需要理论进行计算和预言。研究表明, 多维形变空间、对关联和壳效应等对裂变势垒有重要影响^[39], 需要利用微观的自治模型研究丰中子核裂变性质。除了裂变势垒, 自发裂变寿命也是 r 过程研究所关心的问题。理论上, 一般是将裂变势垒近似为反抛物线(参数化为势垒高度和势垒宽度), 然后通过 Hill—Wheeler 公式计算自发裂变寿命^[40]。

参考文献

- [1] Goldschmidt V M. *Journal of the Chemical Society*, 1937,(2):655
- [2] Russell H N. *Astrophysical Journal*, 1929, 70:11
- [3] von Weizsäcker C F. *Physikalische Zeitschrift*, 1938, 39:633

5 结束语

浩瀚宇宙为人类提供了一个巨大的天然物理实验室, 恒星演化过程中具有许多实验室里无法实现的极端物理条件, 如稳定的热核反应、高温、高密、超高真空、强磁场、强引力场等。快中子俘获过程则发生在爆炸性的中子环境中, 负责产生约一半左右的超铁元素以及所有比 ²⁰⁹Bi 重的核素; 描述这一核合成过程的理论可靠性, 最终需要通过模拟计算的元素丰度与观测丰度的对比来验证。

天体 r 过程涉及到的核物理参数包括丰中子原子核质量、 β 衰变率、中子俘获截面以及裂变截面等。在恒星剧烈演化(如超新星爆发)等环境下, 温度可以达到 10^9 K, 此时长寿命的原子核激发态, 即同核异能态, 可以通过热激发与原子核基态相互交换, 进而影响最终的元素丰度分布乃至宇宙中元素核合成过程的时间尺度^[41, 42]。

虽然在过去的几十年里, 有关 r 过程原子核性质的测量实验得到了较快发展, 但在可预见的未来, 大部分的丰中子原子核信息仍只能依赖于理论模型计算。虽然许多理论模型都能较好地再现已测原子核数据, 但是当外推到远离稳定线的原子核时, 各个理论模型预言存在很大的差异。因此, r 过程的研究需要更微观自治和更强预言能力的原子核模型。理论模型研究的另一个难度还体现在, 如何建立一个微观理论, 统一计算所有的核物理观测量。这对理论工作者是一个巨大的挑战。

- [4] Bethe H A. *Physical Reivew*, 1939, 55 :103
- [5] Suess H E, Urey H C. *Reviews of Modern Physics*, 1956, 28:53
- [6] Burbidge E M, Burbidge G R, Fowler W A *et al.* *Reviews of Modern Physics*, 1957, 29:547

[7] Cameron A G W. Chalk River Report, CRL-41, 1957

[8] Hoyle F. Astrophysical Journal Supplement, 1954, 1: 121

[9] Cook C W, Fowler W A, Lauritsen C C *et al.* Physical Review, 1957, 107: 508

[10] Haseltine E. Discovery, 2002, 23: 02747529

[11] Busso M, Gallino R, Wasserburg G J. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 1999, 37: 239

[12] Qian Y Z. Progress in Particle and Nuclear Physics, 2003, 50: 153

[13] Arnould M, Goriely S, Takahashi K. Physics Reports, 2007, 450: 97

[14] 孙保华, 孟杰. 物理, 2010, 39(10): 666

[15] Sun B, Montes F, Geng L S *et al.* Physical Review C, 2008, 78: 025806

[16] 李竹, 牛中明, 孙保华等. 物理学报, 2012, 61(7): 072601

[17] Sun B, Meng J. Chinese Physics Letters, 2008, 25: 7

[18] Niu Z, Sun B, Meng J. Physical Review C, 2009, 80: 065806

[19] Tu X L *et al.* Physical Review Letters, 2011, 106: 112501

[20] Zhang Y H *et al.* Physical Review Letters, 2012, 109: 102501

[21] 周小红, 颜鑫亮, 涂小林等. 物理, 2010, 39(10): 659

[22] Wang M, Audi G, Wapstra A H *et al.* Chinese Physics C, 2012, 36: 1157

[23] von Weizsäcker C F. Physikalische Zeitschrift, 1935, 96: 431

[24] Möller P, Nix J R, Myers W D *et al.* Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1995, 59: 185

[25] Wang N, Liu M, Wu X Z. Physical Review C, 2010, 84: 014333

[26] Aboussir Y, Pearson J M, Dutta A K *et al.* Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1995, 61: 127

[27] Meng J, Toki H, Zhou S G *et al.* Progress in Particle and Nuclear Physics, 2006, 57: 470

[28] Goriely S, Chamel N, Pearson J M. Physical Review Letters, 2009, 102: 152503

[29] Zhao P W, Li Z P, Yao J M *et al.* Physical Review C, 2010, 82: 054319

[30] Zhao P W, Song L S, Sun B *et al.* Physical Review C, 2012, 86: 064324

[31] Meng J, Peng J, Zhang S Q *et al.* Frontiers of Physics, 2013, 8(1): 55

[32] Fermi E. Physikalische Zeitschrift, 1934, 88: 161,

[33] Caurier E, Martinez-Pinedo G, Nowacki F *et al.* Review of Modern Physics, 2005, 77: 427

[34] Niu Z M, Niu Y F, Liang H Z *et al.* Physics Letters B, 2013, 723: 172

[35] Abbondanno U *et al.* (The n_TOF Collaboration). Physical Review Letters, 2004, 93: 161103

[36] Rauscher T, Thielemann F K, Kratz K L. Physical Review C, 1997, 56: 1613

[37] Goriely S. Astronomy and Astrophysical, 1997, 325: 414

[38] Panov I V, Kolbe E, Pfeiffer B *et al.* Nuclear Physics A, 2005, 747: 633

[39] Lu B N, Zhao E G, Zhou S G. Physical Review C, 2012, 85: 011301

[40] Brack M, Damgaard J, Jensen A S *et al.* Review of Modern Physics, 1972, 44: 320

[41] Aprahamian A, Sun Y. Nature Physics, 2005, 1: 81

[42] Sun B *et al.* Nuclear Physics A, 2010, 834: 476c

标准光学元件库存---供您随时运用

总量多达10万片，
超过700个品种规格的透镜，
棱镜，反射镜，窗口，
滤光片等常用光学器件；
涵盖紫外，可见，
近红外，
红外等光学应用领域。



光学透镜



光学棱镜



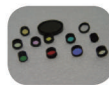
可见光学元件



红外元件



颜色滤光片

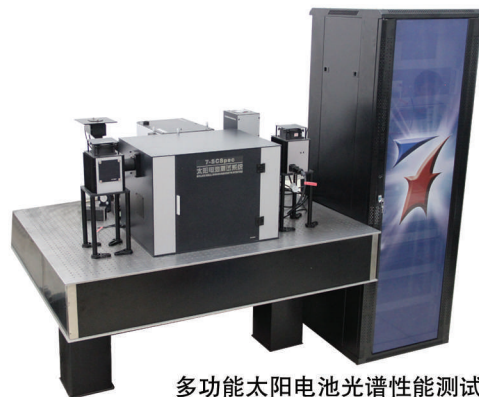


窄带干涉滤光片



北京欧普特科技有限公司
Beijing Golden Way Scientific Co.,Ltd

地址：北京市朝阳区酒仙桥东路1号M7栋5层东段
电话：010-88096218/88096099 传真：010-88096216
邮箱：optics@goldway.com.cn



多功能太阳能电池光谱性能测试系统