

原子核物理概论

§1 原子核物理的对象

十九世纪末，物质结构的研究开始进入微观领域，取得了许多重大进展：原子、原子核和粒子物理；发现了微观世界的运动规律，建立了量子力学、量子场论以及量子电动力学；原子能的释放为人类提供了一种新能源，推动社会进入原子能时代。原子核物理是一个国际上竞争十分激烈的科技领域，各国都投入了大量人力、物力和财力从事这方面的研究工作。原子核物理基础研究的重大成就、核能和核技术的广泛应用已成为科技现代化的主要标志之一。

核技术的应用大体上有下列五个方面：

(1) 为核能源的开发服务，如提供更精确的核数据和探索更有效地利用核能的途径等。

(2) 同位素的应用。同位素示踪、药剂用于诊断或治疗。同位素仪表用作生产自动线检测或质量控制装置。

(3) 射线辐照的应用。加速器及同位素辐射源已应用于工业的辐照加工、探伤、消毒、农业上的育种及放射医疗等方面。并建立了辐射物理、辐射化学等边缘学科及辐射工艺等技术部门。

(4) 中子束的应用。由于中子束在物质结构、固体物理、高分子物理等方面的广泛应用，人们建立了专用反应堆提供强中子束。在辐照、分析、测井及探矿等方面也得到应用。中子的生物效应是一个重要研究方向，快中子治癌已取得一定疗效。

(5) 离子束的应用。离子注入技术是研究半导体和制备半导体器件的重要手段。离子束也是用来进行无损、快速、痕量分析的重要手段。

基 本 内 容

§1 原子核物理的对象

§2 核的基态特性之一：核质量

§3 核力

§4 核的基态特性之二：核矩

§5 核模型

§6 放射性衰变的基本规律

§7 α 衰变

§8 β 衰变

§9 γ 衰变

§10 核反应

§11 裂变与聚变

§1 原子核物理的对象

学习与思考

学而不思则罔，

思而不学则殆。

——孔子

《论语·为政》

学习与思考

一个深夜，担任英国剑桥大学卡文迪许实验室主任的卢瑟福，披着外衣来检查实验室，发现一位学生还在做实验。卢瑟福就问他：“你上午干什么了？”学生回答：“在做实验。”卢瑟福又问：“那你下午做什么了？”学生回答：“做实验。”卢瑟福提高嗓门问：“那你晚上又做什么呢？”学生挺直了胸脯回答：“我还在做实验。”卢瑟福对他说：“你整天做实验，还有什么时间用于思考呢？”

历史回顾——重要人物

H.Becquerel, 法国物理学家 (1852-1908), 1903年获得诺贝尔奖。发现了铀(U)放射现象, 这是人类历史上第一次在实验室里观察到原子核现象。



历史回顾——重要人物

M.Curie, 法国物理学家 (1867-1934), 波兰人, 1903年获得诺贝尔奖。发现钋(Po)和镭(Ra); 她的女儿(I.Joliot-Curie, 1897-1956)和女婿(F. Joliot-Curie, 1900-1958)因发现人工放射性获1934年诺贝尔奖。



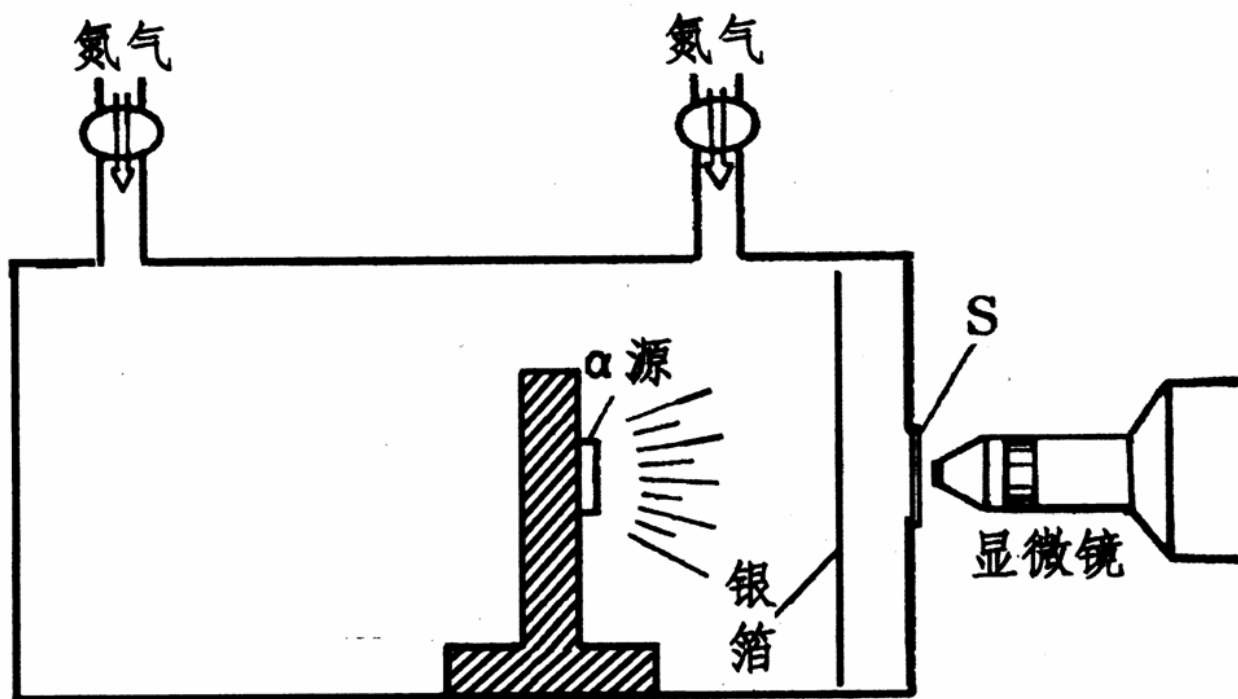
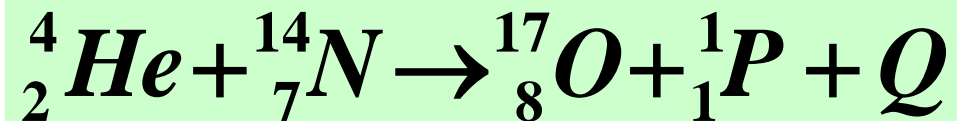
历史回顾——重要人物



E.Rutherford, 英物理学家 (1871-1937), 新西兰人, 1908年获得诺贝尔奖。证实了 α 射线为 He^{2+} , β 射线为电子; 提出了原子的核式模型; 首次实现人工核反应; 培养了10诺贝尔奖获得者。

原子核物理概论 §1 原子核物理的对象

1919年. 卢瑟福发现了质子:



卢瑟福实现第一个
人工核反应的实验装置示意图

历史回顾——重要人物



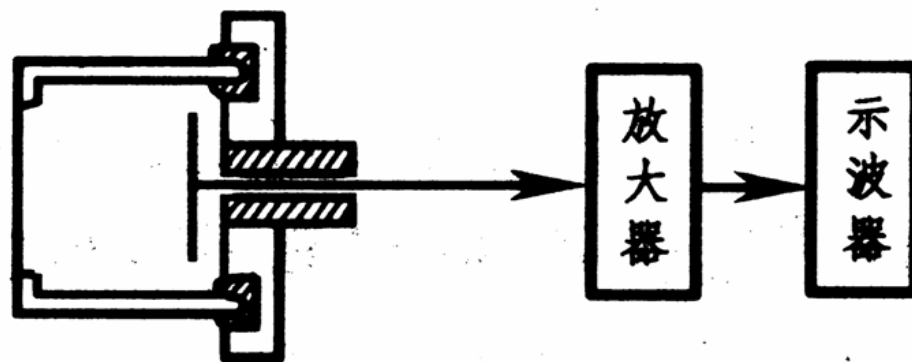
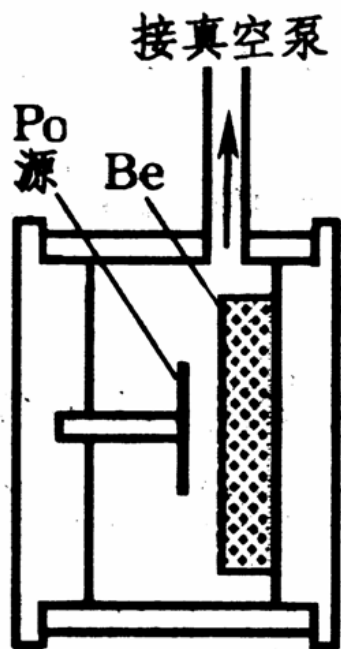
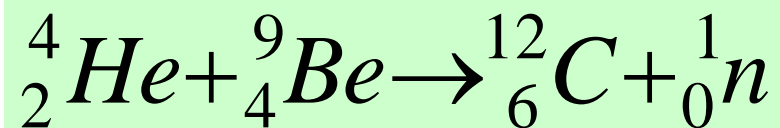
**Paul Ulrich Villard, 法国
物理学家(1860—1934),
1900年发现 γ 射线, 1907
获得La Caze 奖金。**

历史回顾——重要人物



J.Chadwick, 英国物理学家(1891-1974), 1935年因发现了中子获得诺贝尔奖。中子的发现被认为是原子核物理的诞生。

1932年，查德威克发现了中子：



查德威克发现中子的实验装置

历史回顾——重要人物

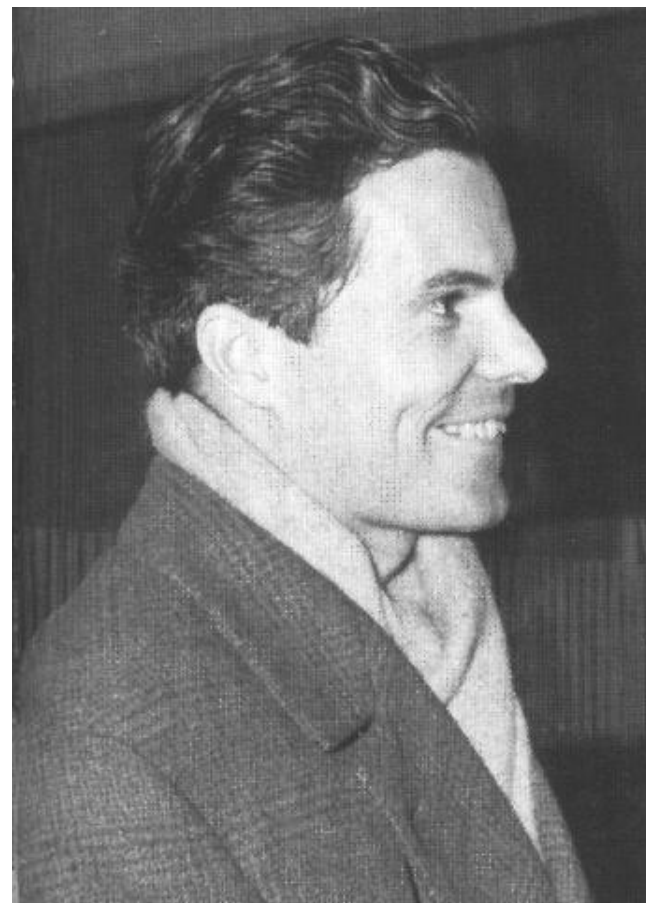
E.Fermi, 意大利物理学家(1901-1954), 1938年获得诺贝尔奖。发明了热中子链式反应堆。

原子能利用的开始



历史回顾——重要人物

R.L.Mossbauer, 德国物理学家(1929-1976)。1961年因为对 γ 辐射的共振吸收的研究和发现的Mossbauer效应获诺贝尔物理学奖。



历史回顾——重要人物



李政道、杨振宁发现了在弱相互作用中宇称不守恒，并由吴健雄的实验所证实。

历史回顾——重要人物

丁肇中, (1936—)与
B.Richter, (1931—)分别
发现 J/ψ 粒子, 找到
了美夸克存在的证据,
1976年获诺贝尔奖。



历史回顾——重要事件

- 1896: H.Becquerel首次发现了铀(U)放射现象;
- 1897: P.&M.Curie发现钋(Po)和镭(Ra);
- 1899: E.Rutherford发现 α , β 射线;
- 1900: P.U.Villard发现 γ 射线;
- 1903: E.Rutherford证实 α 为 He^{2+} , β 为电子;
- 1911: E.Rutherford提出原子的核式模型;
- 1919: E.Rutherford首次实现人工核反应, 发现了质子。
- 1932: J.Chadwick发现了中子;

历史回顾——重要事件

1934: F.&I.Joliot-Curie发现人工放射性;

1939: O.Hahn等人发现重核裂变;

1939: N.Bohr等提出液滴模型;

1942: E.Fermi发明热中子链式反应堆;

1945: 在J.R.Oppenheimer领导下, 原子弹试爆成功,
并在广岛上空爆炸;

1952: 在E.Teller领导下, 氢弹试爆成功;

1952: 前苏联建成第一个核电站.。

历史回顾——原子弹



- “小玩意儿”钚装药重6.1千克，TNT当量2.2万吨，试验中产生了上千万度的高温和数百亿个大气压，致使一座30米高的铁塔被熔化为气体，并在地面上形成一个巨大的弹坑。

历史回顾——原子弹

- 在半径为400米的范围内，沙石被熔化成了黄绿色的玻璃状物质，半径为1600米的范围内，所有的动物全部死亡。
- “原子弹之父” 奥本海默在核爆观测站里感到十分震惊，他想起了印度一首古诗：“**漫天奇光异彩，有如圣灵逞威，只有一千个太阳，才能与其争辉。我是死神，我是世界的毁灭者。**”

历史回顾

原子弹



历史回顾——原子弹

- 在长崎投掷的原子弹爆炸后形成的蘑菇状云团，爆炸产生的气流、烟尘直冲云天，高达12英里多。



历史回顾——原子弹

- 美国原子弹突袭广岛和长崎造成了巨大的毁伤。广岛市区80%的建筑化为灰烬，64000人丧生，72000人受伤，伤亡总人数占全市总人口的53%。长崎市60%的建筑物被摧毁，伤亡86000人，占全市总人口的37%。



《今日美国报》美国国家核安全管理局2011.10.25发布声明宣布，美国最后一枚冷战时期存放至今的B53核弹已被拆除，这种堪称美国威力最大的核武器就此寿终正寝，走入历史。



B53核弹重约4.5吨，长3.8米，直径约1.3米，威力是在广岛爆炸的原子弹的600倍，爆破时的冲击波能够摧毁方圆6公里内的所有建筑物，有效杀伤直径为15公里。1959年由洛斯阿拉莫斯国家实验室研制成功，1997年退役。

超级核弹

• 前苏	已实验未生产	10亿万吨TNT
• 前苏	沙皇炸弹	5000万吨TNT
• 美国	B53	900万吨TNT
• 美国	Mark16	800万吨TNT
• 美国	B83	120万吨TNT
• 中国	东风41	100万吨 TNT

原子核物理概论

§1 原子核物理的对象

- 美国此举主要是因为这种自由落体式核弹已经落伍，不符合现代战争的实际需要，现在可以使用其他方式，特别是导弹，大幅提高核弹命中精度。
- 实际上，由于对地球毁灭的恐惧，大杀伤威力早就不是美俄核弹的追求。目前核航弹的威力最多为几百万吨TNT当量，而多弹头洲际弹道导弹所携带的核弹头当量通常为50万吨到100万吨。原因很简单，“大当量干不过高精度”。
- 据西方专家估计，将核武器精度提高一倍的对目标的破坏效果，相当于将当量提高一倍带来的效果的5倍。所以，在上世纪70年代，美苏等国都把核武器发展的重点放在提高精度，而非进一步增大当量上。
- B53的精度太差，这种由减速伞减速的无制导大型核弹的命中精度非常有限，大约为数百米，依照这个精度，即便B53能投放到苏联地下指挥所的上空，也未必能够完全摧毁地下的指挥所。

原子核物理概论

§1 原子核物理的对象

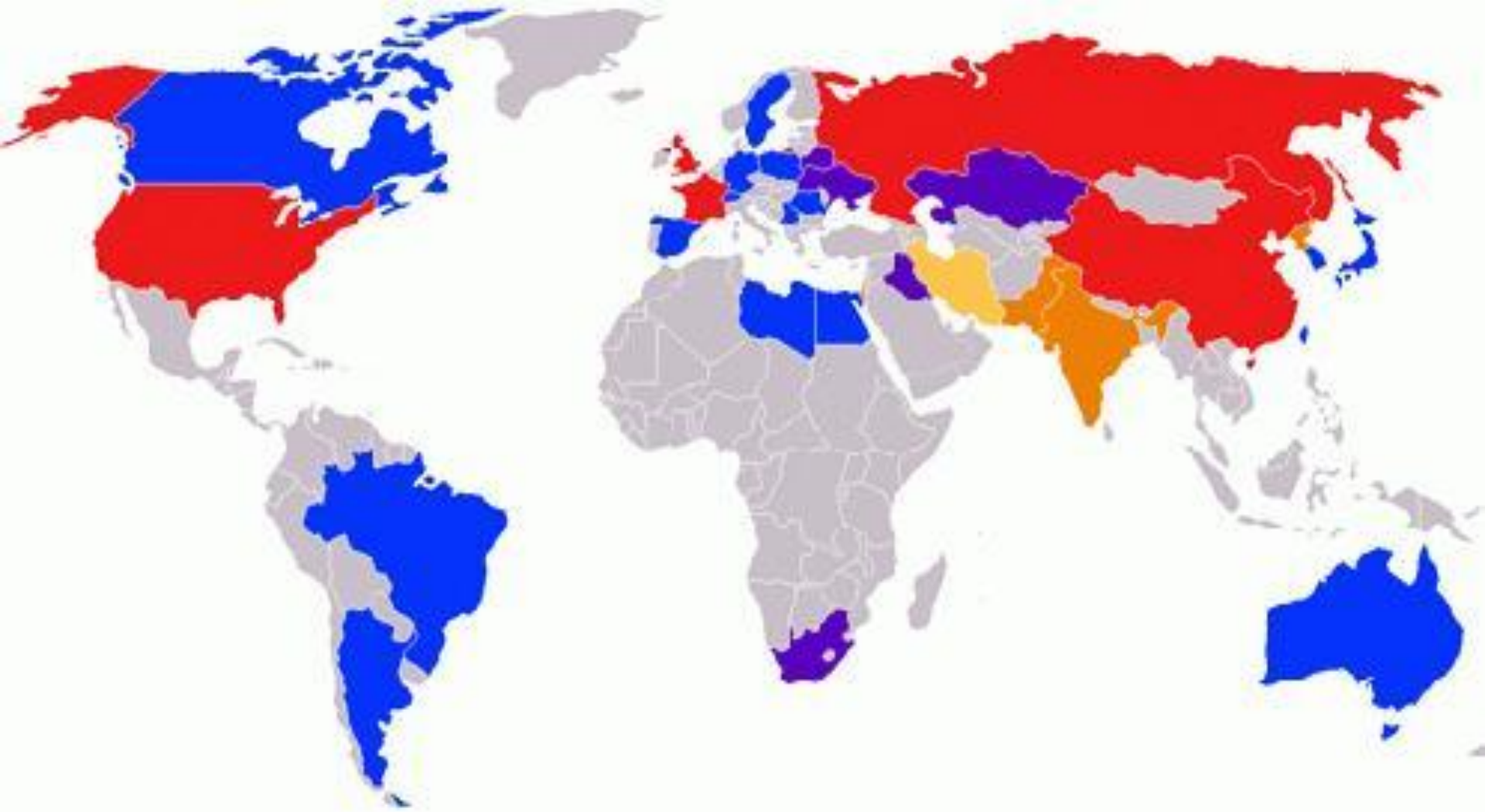
- B53核弹的另一缺点——太大，美国的B-52轰炸机只能装载2枚这种核弹。据介绍，由于其尺寸限制，目前只能由B-52轰炸机携带，而这种亚音速、非隐身轰炸机几乎不可能穿越大国的防空网投放这种大当量核弹。在高危环境下，B-52目前往往是采用发射空射巡航导弹的方式进行作战。美军现有投放核弹的主力轰炸机则是B-2，但是其弹仓容纳不下B53核弹。
- 目前，美军已经有了更好的替代武器。那就是上世纪90年代研制的B61-11钻地核弹，它也是美国在冷战后，首次在没有进行核试验的情况下，利用计算机模拟技术研发出来的核弹药。该型弹药成为B-2的战斗武器。该型核弹重约545千克，长3.7米，弹体直径约0.34米，弹尾直径约0.57米，采用惯性导航系统，在机载雷达的指引下打击目标，其当量大约在40万吨左右。由于它在地下深处的爆炸，利用核爆炸所产生的极强的岩土冲击波和震动来摧毁地下深层硬目标，能摧毁地下的建筑设施而不致对地面造成太大的破坏。

核弹数量

	美国	前苏
• 冷战时期	32000枚	45000枚
• 条约计划 (至2018年)	1550枚	1550枚
• 目前	2150枚 (部署) 2850枚 (封存)	5000~6000枚 (估计)

历史回顾——重要事件

- 1958: 我国建成第一座重水型原子反应堆;
- 1964: 我国第一颗原子弹试爆成功;
- 1967: 我国第一颗氢弹试爆成功;
- 1969: 我国首次成功地下核实验;
- 1984: 我国受控热核聚变实验装置顺利启动;
- 1988: 北京正负电子对撞机首次对撞成功;
- 1991: 秦山核电站发电成功;



世界有核武器国家及地区形势示意图：红色——联合国核五常，橙色——事实拥核国家(印度、巴基斯坦、朝鲜、以色列)，黄色——致力于研制核武器国家(伊朗)，紫色——曾拥有或曾研制核武器的国家(乌克兰、白俄罗斯、哈萨克斯坦，南非、伊拉克)，蓝色——被国际原子能机构认为具备核武研制能力的国家和地区(包括中国台湾、日本、韩国等)。

中国未来15年内

核电项目投资总额将达

4500亿元

2007年11月03日

新增投产2300万千瓦的核电站的选址，将从广东、浙江、山东、江苏、辽宁、福建等沿海城市中优先选择，目前已经在这几个省市确定了13个优先选择的厂址，国家考虑在尚无核电的沿海省(区)各安排一座核电站开工建设。

- **1951年，美国人在爱达荷州首先实现了利用核能反应堆发电，人类对核能的和平利用就此拉开序幕。**
- **到目前为止（2013.12）全球在运行的核电机组总数达到437个，总装机量为37530万千瓦，占世界总发电量的14%。**

美国 104

日本 50

韩国 23

加拿大 19

英国 16

瑞典 10

法国 58

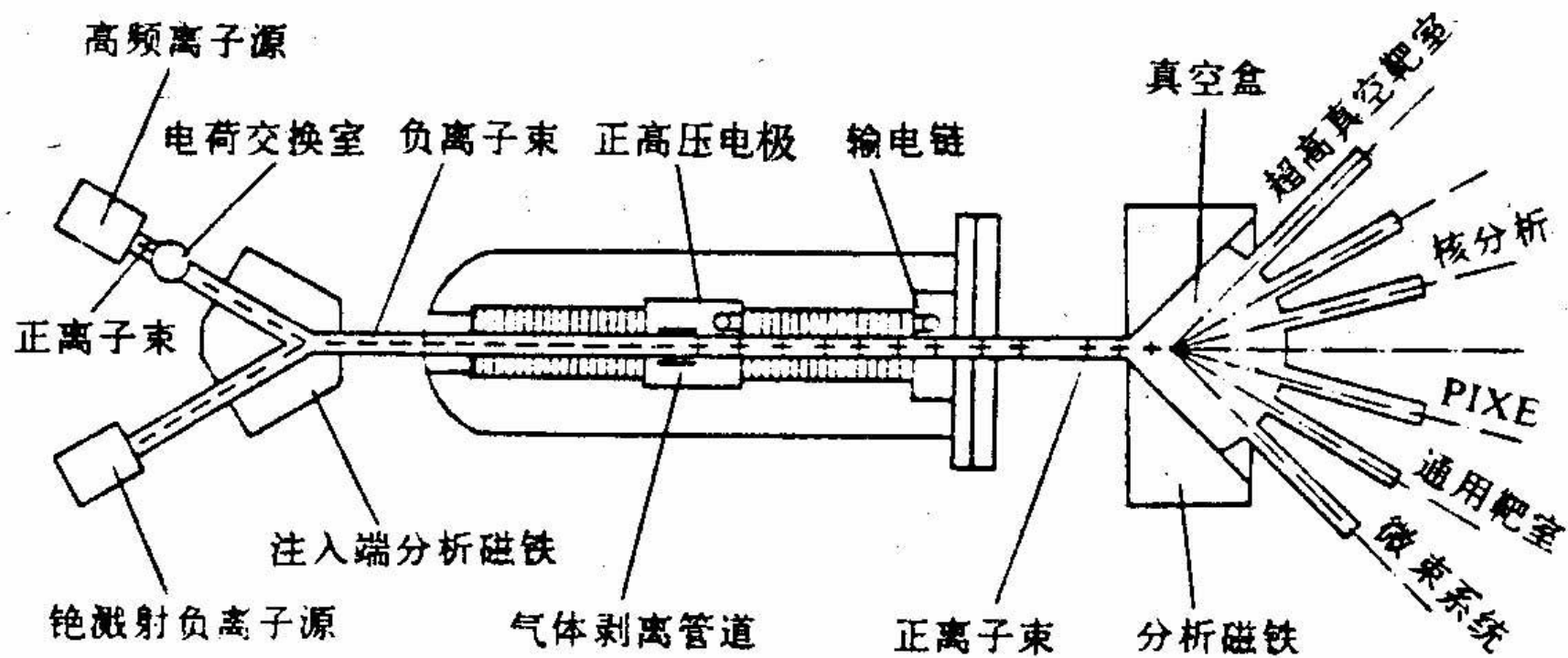
俄罗斯 33

印度 21

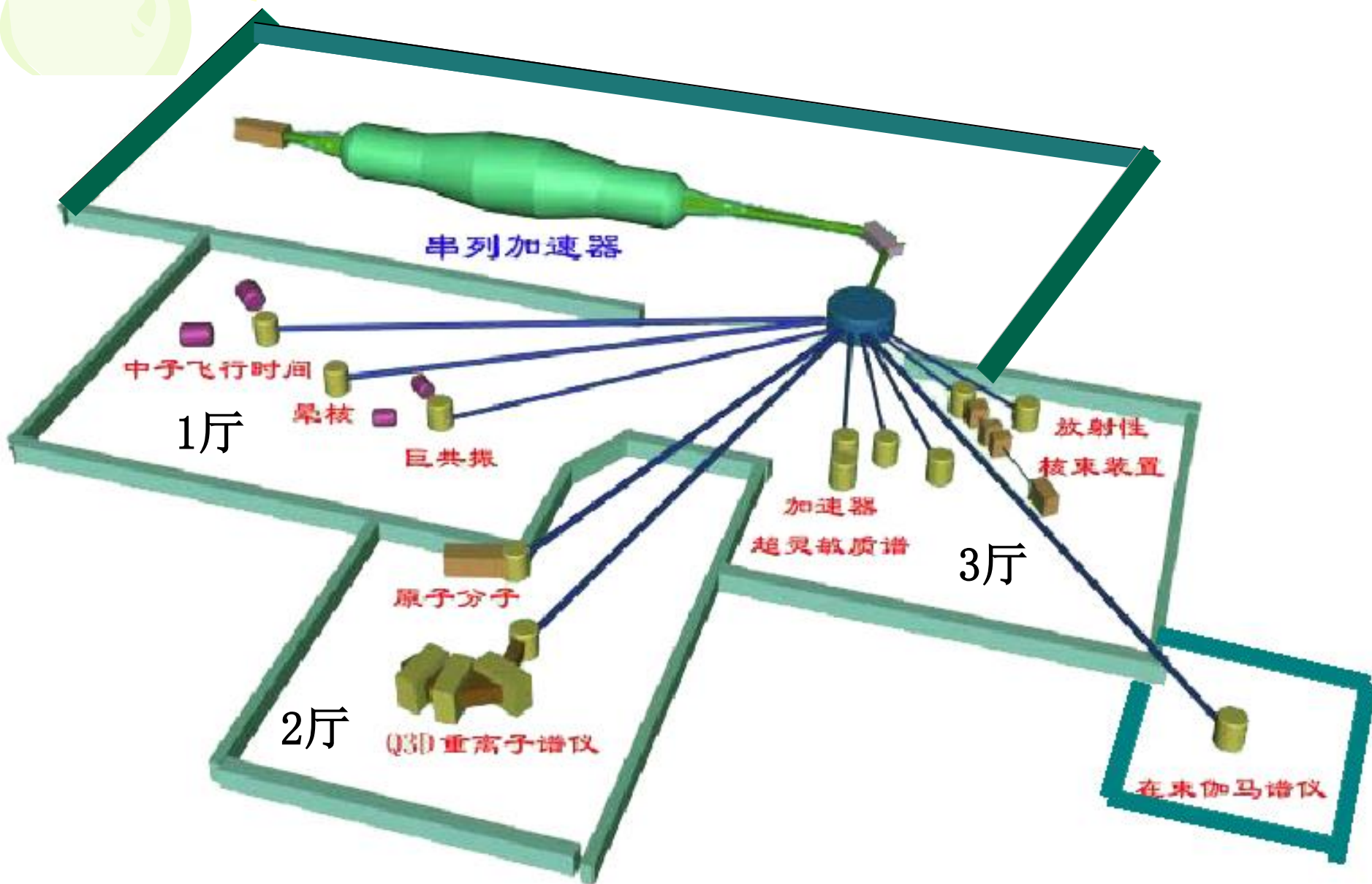
中国 17

乌克兰 15

原子核物理概论 §1 原子核物理的对象

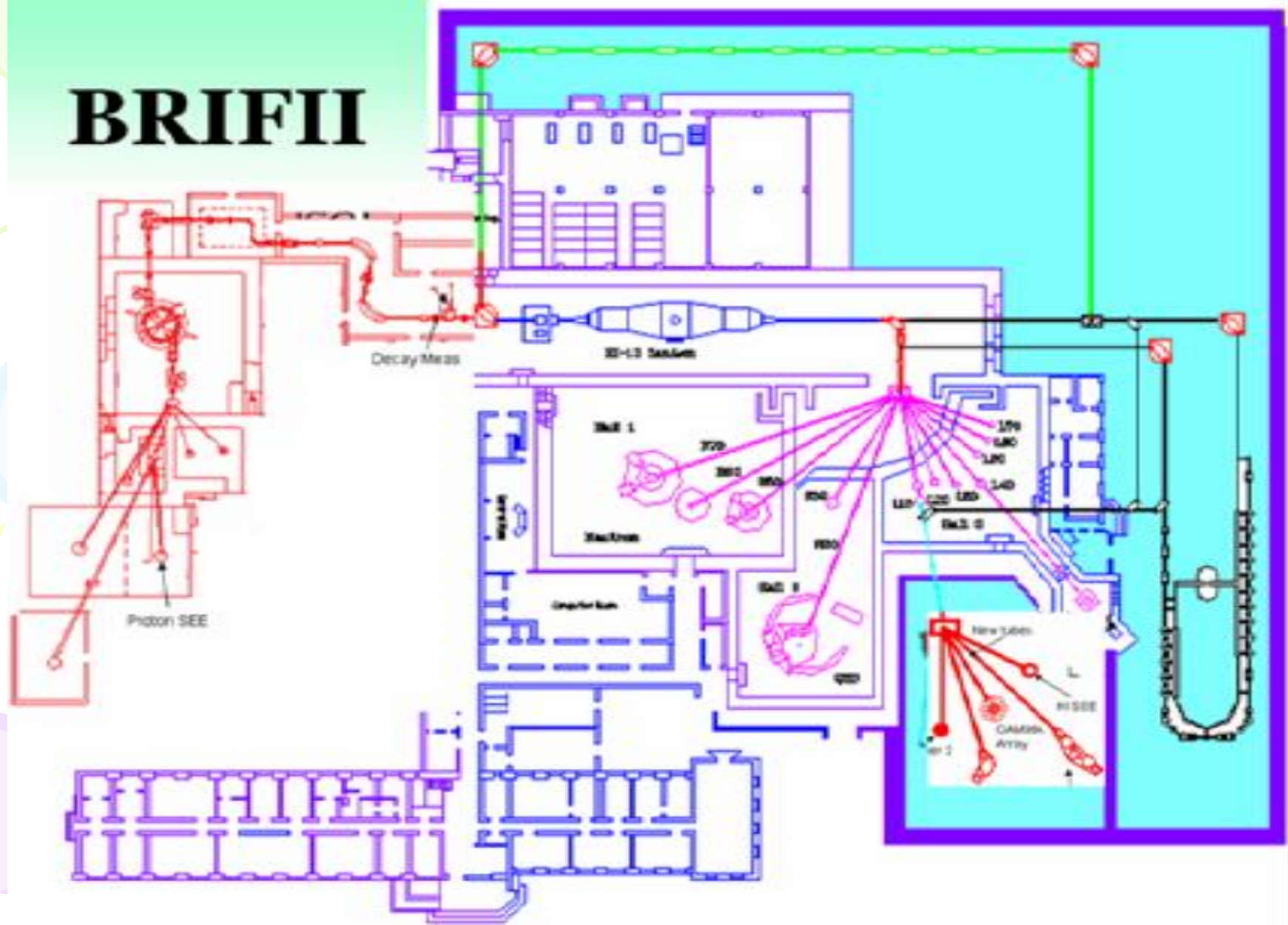


原子核物理概论 §1 原子核物理的对象



原子核物理概论 § 1 原子核物理的对象

BRIFII



中国实验快堆

- 热功率65MWe, 电功率25MWe。
- 1995年12月立项, 2000年5月浇灌第一灌混凝土, 2002年8月实现核岛厂房封顶, 2009年9月达到首次临界, 预计2010年6月实现并网发电。

原子核物理概论 § 1 原子核物理的对象



中国原子能科学研究院先进研究堆（CARR）即将建成

中国先进研究堆CARR堆型为轻水冷却慢化、重水反射反中子阱池式反应堆，是一座多用途、高通量研究型反应堆。堆功率60MW。该堆具有以下特点：

- ①品质因子大，即单位功率所能获得的最大热中子注量率高；**
- ②有效中子利用空间大，便于布置水平孔道引出中子束供试验，同时也便于布置各种垂直孔道供辐照试验和生产。**

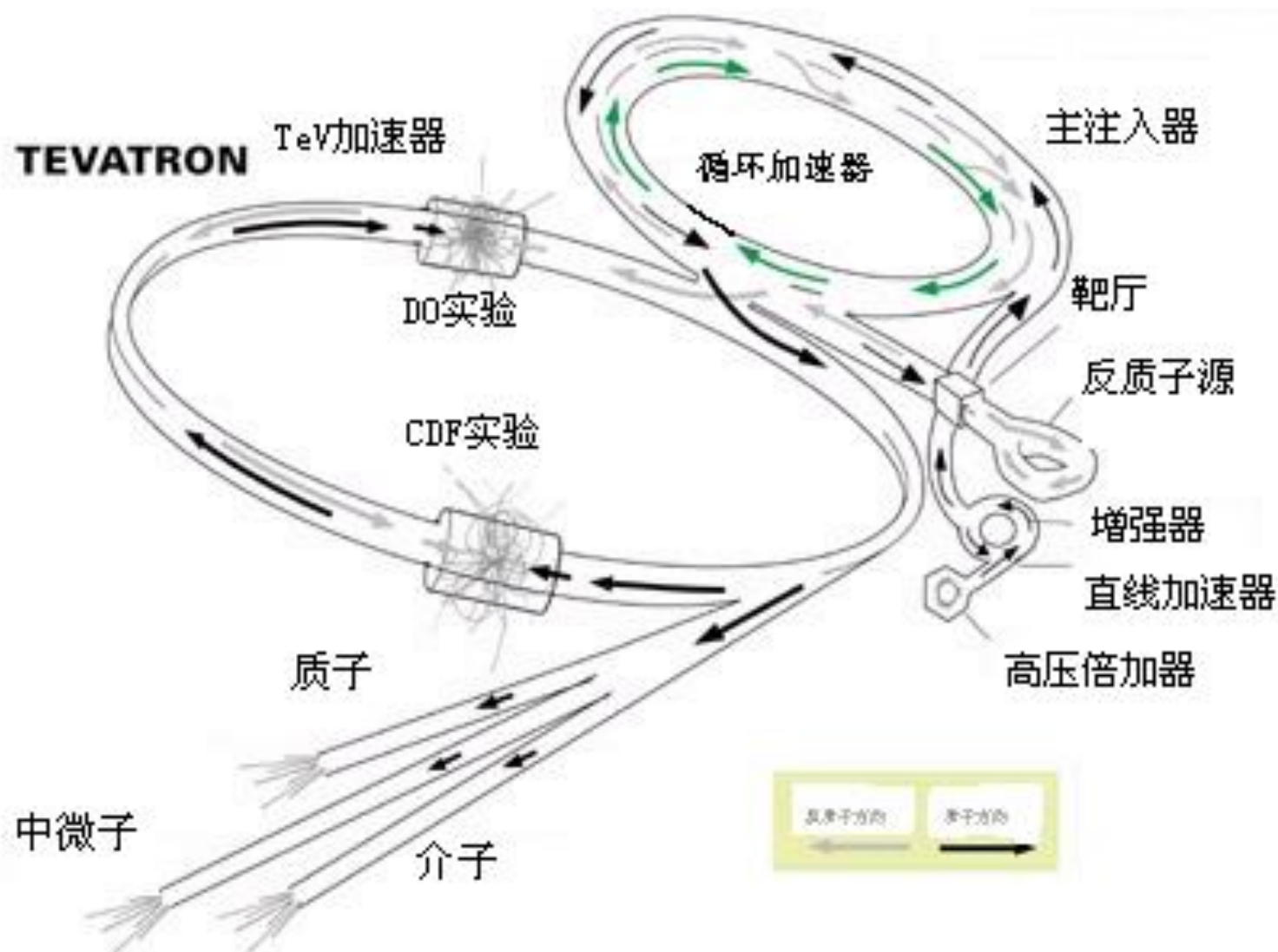
与国际同类反应堆比较，CARR主要技术指标和性能已经达到了国际先进水平，并位居前列。

原子核物理概论 §1 原子核物理的对象

欧洲核子中心**CKRN**坐落在美丽的日内瓦湖畔，毗邻雄伟的阿尔卑斯山脉，地跨瑞士、法国，是世界上最大的高能物理实验中心之一。

原子核物理概论 §1 原子核物理的对象

费米加速器链



原子核物理概论

§ 1 原子核物理的对象

高压倍加器提供第一级加速。在高压倍加器内，氢气被电离，产生负离子，每个负离子由两个电子和一个质子组成。离子由正电压加速，能量达到750keV，相当于电视机显象管电子束能量的30倍。

负氢离子进入约500英尺长的**直线加速器**，振动电场将负氢离子加速到400 MeV。进入第三级之前，离子通过一个碳箔，该碳箔将电子去掉，只留下带正电荷的质子。

增强器位于地下约20英尺处。增强器是一个圆形加速器，它利用磁铁使质子束流在一个圆形通路里弯转。质子沿增强器转20,000次，反复经过电场。每转一圈，质子就多获得一些能量，能量达到8 GeV时，便离开增强器。

为产生反质子，主注入器把120 GeV的质子送到反质子源，质子与镍靶对撞，产生范围很广的次级粒子，包括许多反质子。反质子被收集，聚焦后存在累积环内。当产生足够数量的反质子后，它们被送到主注入器以便加速，并注入到Tevatron。

Tevatron接收从主注入器来的150 GeV的质子与反质子，并将其几乎加速到1000 GeV。质子与反质子按相反的方向在Tevatron里运转，速度每小时仅比光速慢200英里。质子与反质子束流在Tevatron隧道中的CDF和D0探测器的中心部分发生对撞，爆发式地产生新粒子。

原子核物理概论

§ 1 原子核物理的对象

理查德·霍尔从1997年起开始尝试自制核聚变反应堆，“我在差不多1个月的时间里造出了一台核聚变反应堆，”霍尔说，他现在正准备制造自己的第5台核反应堆设备。

在位于美国匹兹堡的自家车库里，51岁的弗兰克·萨安斯最自豪的发明：一个可以工作的核聚变反应堆。

原子核物理概论 §1 原子核物理的对象

核的组成

中子发现之前，人们只知电子和质子这两种基本粒子，当发现原子核可放出电子（ β 衰变）后，自然使人们推测原子核是由电子和质子组成的。

$$p + e = ? = \text{*nuclear*}$$

在多个方面无法解释

首先，Heisenberg不确定关系

$$x \cdot p \sim h/2 \quad \text{+} \quad x \approx 5 \text{ fm}$$

H

$$p \sim \frac{h}{2x} = 124 \frac{\text{Mev}}{c}$$

非相对论 $v = p / m_e \approx 240c$

太快了！

相对论

$$E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$$

太高了！

$$pc = 124 \text{ Mev} \gg mc^2 = 0.51 \text{ Mev}$$

原子核物理概论 §1 原子核物理的对象

其次，无法对有些核的自旋给出合理的解释，例如

$$m_N \approx 14m_p$$

$$Z_N = 7$$

$$14 p + (14-7) e = Na$$

总共21个粒子

$\left. \begin{matrix} p \\ e \end{matrix} \right\}$ Fermi

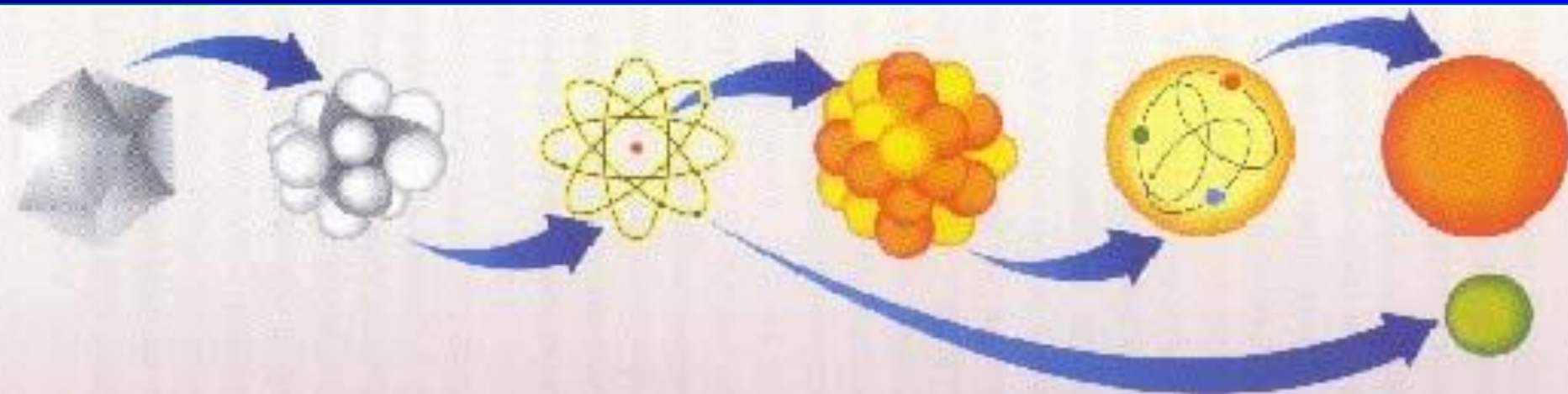
如此得到的氮核自旋为半整数，但其实验值为整数

再次，无法解释原子核的磁矩

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$$

核磁矩的实验值比Bohr磁子小三个数量级

原子核物理概论 § 1 原子核物理的对象



分子: 10^{-7} cm 原子: 10^{-8} cm 原子核: 10^{-12} cm
质子: 10^{-13} cm 电子、夸克: 10^{-16} cm

核的线度只有原子的万分之一,但质量却占原子质量的99%以上.

原子核由质子和中子组成,质子和中子由夸克组成. 目前已经明确夸克有6种,它们和电子等6种轻子被认为是物质最基本的组成单元.

近年来的实验已经有了夸克可能是由更小的粒子组成的迹象,仍有待进一步研究.

Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
Leptons	ν_e e- neutrino	ν_μ μ - neutrino	ν_τ τ - neutrino
	e electron	μ muon	τ tau
Three Generations of Matter			

原子核物理概论 §1 原子核物理的对象

核的组份

原子核对原子性质起主要贡献的是核质量和电荷。

元素的物理、化学性质或光谱特性主要与核外电子有关，而放射性现象则归因于原子核。

核外电子的行为对原子核的影响甚微,可不予考虑。

原子质量单位u

同位素 ^{12}C 原子质量的1/12

$$1u = \frac{12}{6.022 \times 10^{23}} \times \frac{1}{12} g = 1.66 \times 10^{-27} kg$$

原子核质量数A 原子的质量都接近于一个整数,这个整数称为...

原子核的质量一般可用质谱仪测定，其测量精度可达 10^{-6}

核子 中子和质子统称核子

$$\begin{cases} m_n = 1.008665u = 939.5731\text{MeV} \\ m_p = 1.007277u = 938.2796\text{MeV} \end{cases}$$

原子核物理概论 §1 原子核物理的对象

核素及其标记

元素:质子数相同的一类原子.

核素:具有相同质子数和相同中子数的一类原子核.

同位素:Z相同但N不同的核素.

同中子素:N相同但Z不同的核素.

同量异位素:A相同但Z不同的核素.

同质异能素:A和Z均相同但能量状态不同的核素.

核素符号

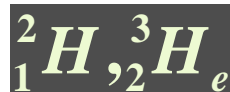


A:质量数(核子数)

Z:质子数(原子序数)

$N = A - Z$:中子数

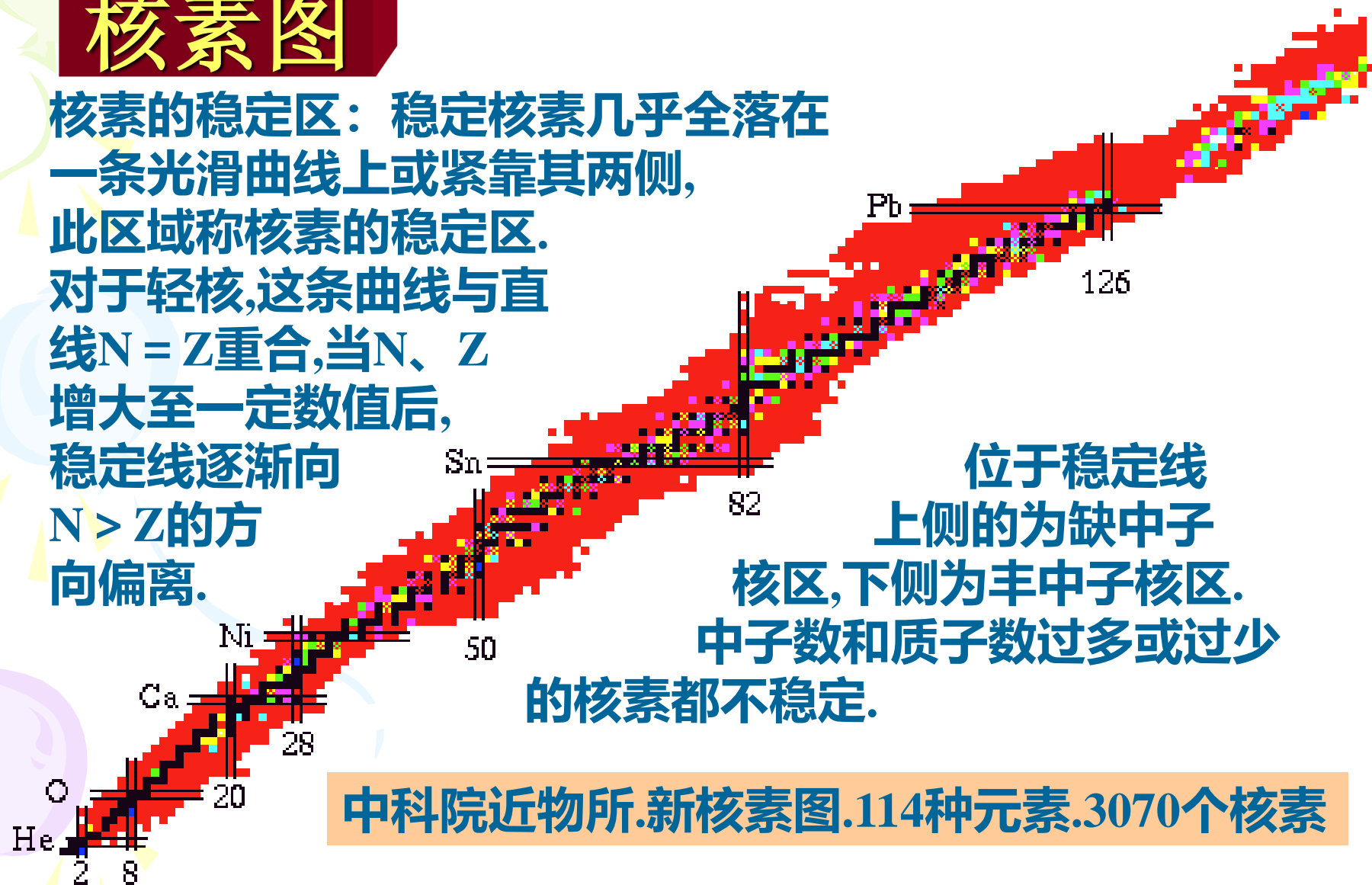
例如



迄今为止发现的**2000多个核素**中, 有300多个天然核素(280多个稳定核素, 60多个放射性核素), 其余1600多个是自1934年以来人工合成的放射性核素.

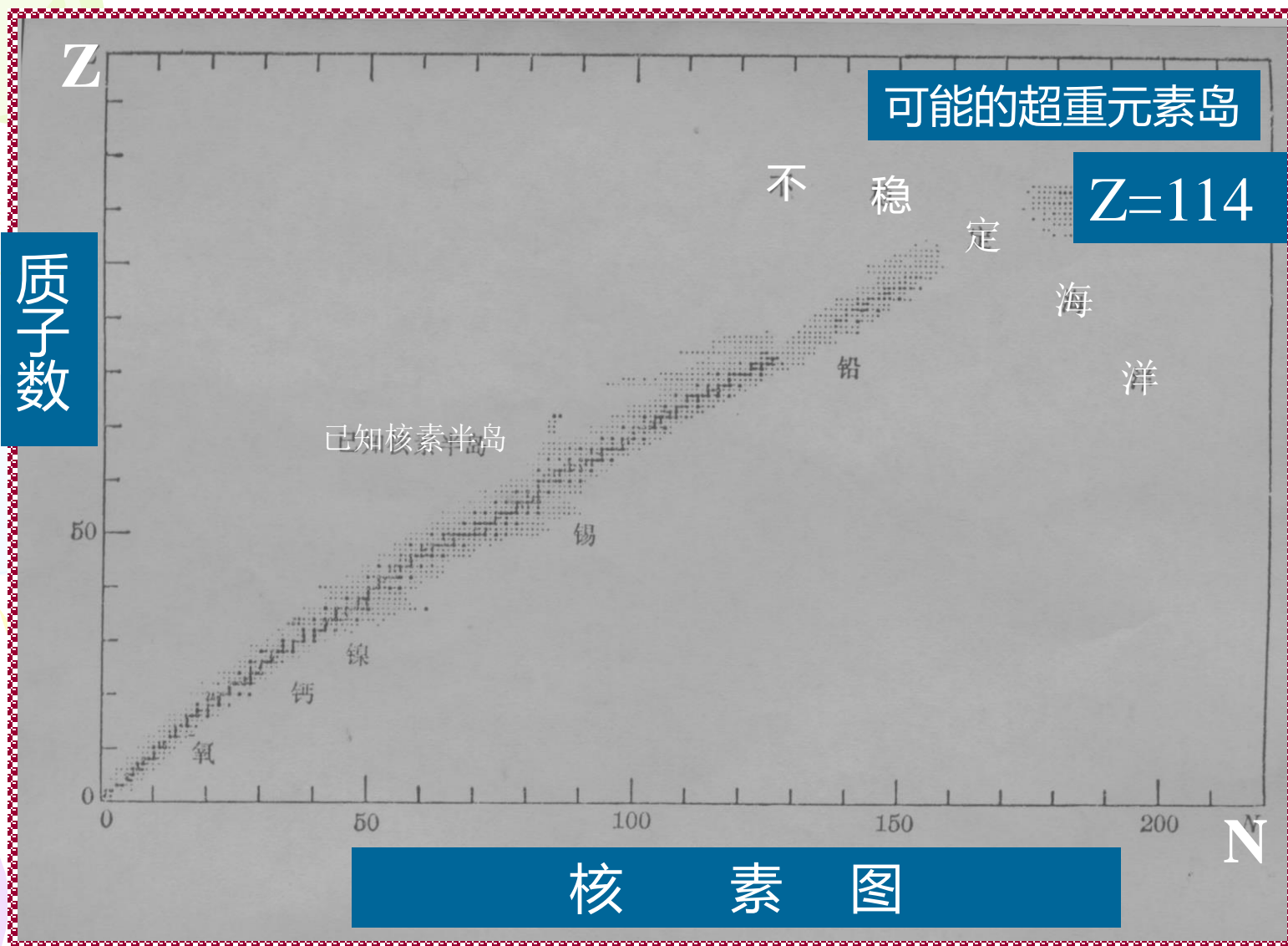
核素图

核素的稳定区：稳定核素几乎全落在一条光滑曲线上或紧靠其两侧，此区域称核素的稳定区。对于轻核，这条曲线与直线 $N=Z$ 重合，当 N 、 Z 增大至一定数值后，稳定线逐渐向 $N>Z$ 的方向偏离。

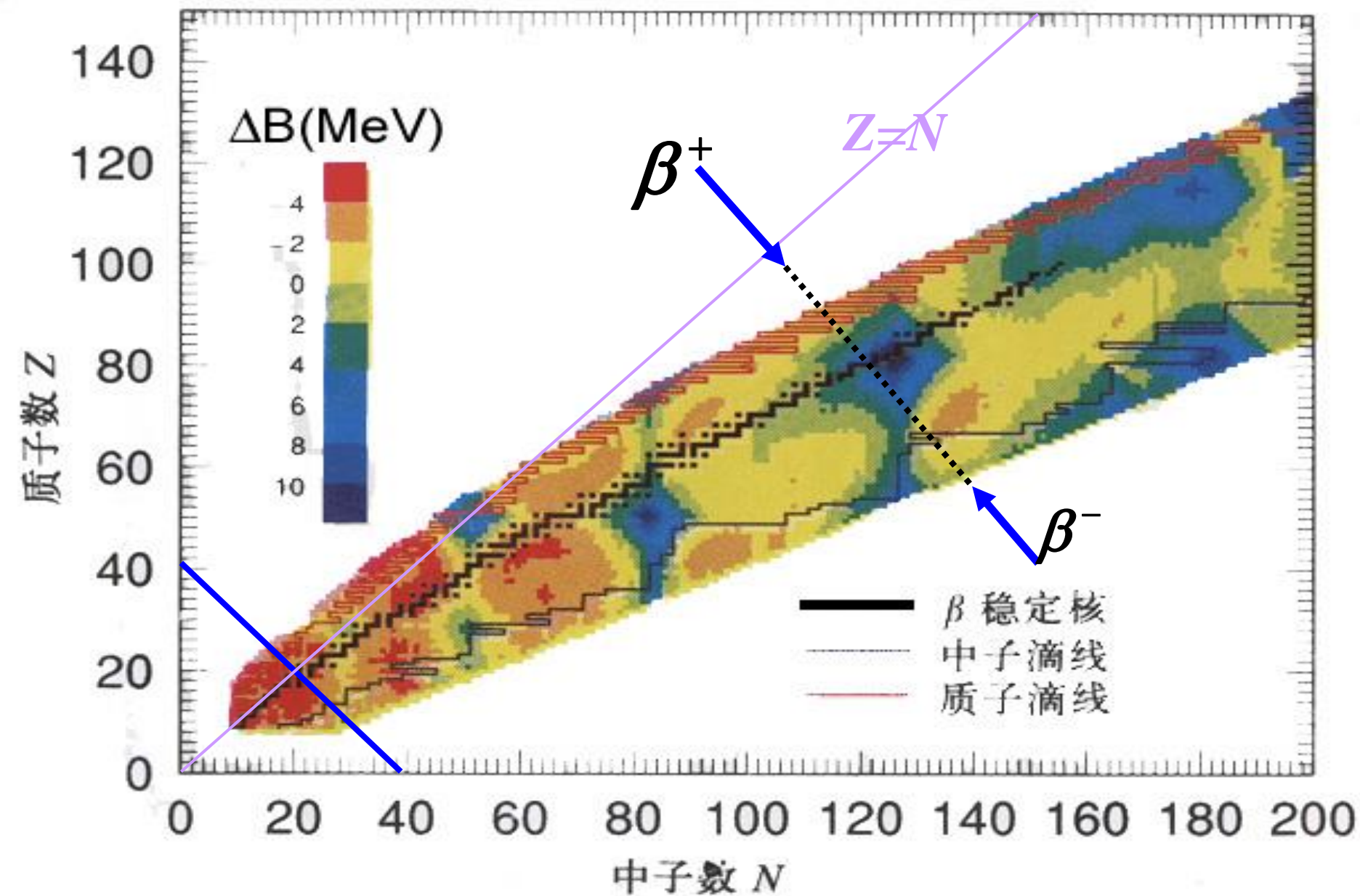


中科院近物所.新核素图.114种元素.3070个核素

原子核物理概论 §1 原子核物理的对象



原子核物理概论 §1 原子核物理的对象



原子核物理概论 §1 原子核物理的对象

- 在轻核区 ($A < 40$) , 稳定核素集中在 $Z=N$ 的直线上或紧靠它的两侧。
- 稳定核素中质子数与中子数之比: 轻核 $N/Z \approx 1$; 最重的核 $N/Z \approx 1.6$ 。
- $Z < 84$ 的核素有一个或几个稳定的同位素; $Z > 84$ 的以及质子数或中子数过多的核都是不稳定的放射性的同位素。
- 质子结合能为零的线成为质子滴线; 中子结合能为零的线成为中子滴线。
- β (黑点)稳定线的经验规律:
$$Z = \frac{A}{1.98 + 0.0155A^{2/3}}$$
- 理论预言: $Z=114$ 附近有超重元素稳定岛。

重元素与超重元素的发现历史

- 1896年起，到1996年100年间，到112号元素合成，共30多个元素被合成
- 102-105 号元素，前苏联 60年代-70年代
- 106 号元素， 美国和前苏联，80年代
- 107 $^{54}\text{Cr} + ^{209}\text{Bi} \rightarrow ^{263}\text{Bn}$, 1981 , GSI
- 108 , $^{58}\text{Fe} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{266}\text{Hs}$, 1984 , GSI
- 109, $^{58}\text{Fe} + ^{209}\text{Bi} \rightarrow ^{267}\text{Mt}$, 1982 , GSI
- 110, $^{62}\text{Ni} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{269}110 + 1n$, 1995 , GSI and Berkeley
- 111, $^{64}\text{Ni} + ^{209}\text{Bi} \rightarrow ^{272}111 + 1n$, 1995 , GSI (Rg)
- 112, $^{70}\text{Zn} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{277}112 + 1n$, 1996 , GSI

原子核物理概论 § 1 原子核物理的对象

- 113 $^{70}\text{Zn} + ^{209}\text{Bi} \rightarrow ^{278}113 + \text{n}$. 2004, RIKEN
- 中国人参与, 徐瑚珊(兰州), 赵宇亮(高能)
- 114, $^{48}\text{Ca} + ^{242}\text{Pu} \rightarrow ^{287}114 + 3\text{n}$, 1998, Dubna
- $^{48}\text{Ca} + ^{244}\text{Pu} \rightarrow ^{289}114 + 3\text{n}$, 1999, Dubna with GSI and RIKEN
- 115, $^{48}\text{Ca} + ^{243}\text{Am} \rightarrow ^{288}115 + 3\text{n}$, 2004, Dubna
- 116, $^{48}\text{Ca} + ^{248}\text{Cm} \rightarrow ^{292}116 + 4\text{n}$, 2000, Dubna
- 118, Dubna and Berkeley, 2006, PRC74(2006)044602, 未连接上.

我国的超重合成进展

- 中国科学院近代物理所
- ^{259}Db , 105号元素的同位素 (2000)
- ^{265}Bh , 107号元素的同位素 (2004)



Cf Eur. Phys. J. A20(2004)385

原子核物理概论

§1 原子核物理的对象

75										Re160	Re161	Re162	Re163	Re164	Re165	Re166	Re167	Re168	Re169	Re170	Re171	Re172	Re173	Re174	Re175	Re176	Re177				
74										W158	W159	W160	W161	W162	W163	W164	W165	W166	W167	W168	W169	W170	W171	W172	W173	W174	W175	W176			
73										Ta155	Ta156	Ta157	Ta158	Ta159	Ta160	Ta161	Ta162	Ta163	Ta164	Ta165	Ta166	Ta167	Ta168	Ta169	Ta170	Ta171	Ta172	Ta173	Ta174	Ta175	
72										Hf154	Hf155	Hf156	Hf157	Hf158	Hf159	Hf160	Hf161	Hf162	Hf163	Hf164	Hf165	Hf166	Hf167	Hf168	Hf169	Hf170	Hf171	Hf172	Hf173	Hf174	
71										Lu152	Lu153	Lu154	Lu155	Lu156	Lu157	Lu158	Lu159	Lu160	Lu161	Lu162	Lu163	Lu164	Lu165	Lu166	Lu167	Lu168	Lu169	Lu170	Lu171	Lu172	Lu173
70										Yb151	Yb152	Yb153	Yb154	Yb155	Yb156	Yb157	Yb158	Yb159	Yb160	Yb161	Yb162	Yb163	Yb164	Yb165	Yb166	Yb167	Yb168	Yb169	Yb170	Yb171	Yb172
69										Tm150	Tm151	Tm152	Tm153	Tm154	Tm155	Tm156	Tm157	Tm158	Tm159	Tm160	Tm161	Tm162	Tm163	Tm164	Tm165	Tm166	Tm167	Tm168	Tm169	Tm170	Tm171
68										Er149	Er150	Er151	Er152	Er153	Er154	Er155	Er156	Er157	Er158	Er159	Er160	Er161	Er162	Er163	Er164	Er165	Er166	Er167	Er168	Er169	Er170
67										Ho148	Ho149	Ho150	Ho151	Ho152	Ho153	Ho154	Ho155	Ho156	Ho157	Ho158	Ho159	Ho160	Ho161	Ho162	Ho163	Ho164	Ho165	Ho166	Ho167	Ho168	Ho169
66										Dy147	Dy148	Dy149	Dy150	Dy151	Dy152	Dy153	Dy154	Dy155	Dy156	Dy157	Dy158	Dy159	Dy160	Dy161	Dy162	Dy163	Dy164	Dy165	Dy166	Dy167	Dy168
65										Tb146	Tb147	Tb148	Tb149	Tb150	Tb151	Tb152	Tb153	Tb154	Tb155	Tb156	Tb157	Tb158	Tb159	Tb160	Tb161	Tb162	Tb163	Tb164	Tb165	Tb166	Tb167
64										Gd145	Gd146	Gd147	Gd148	Gd149	Gd150	Gd151	Gd152	Gd153	Gd154	Gd155	Gd156	Gd157	Gd158	Gd159	Gd160	Gd161	Gd162	Gd163	Gd164	Gd165	Gd166
63										Eu144	Eu145	Eu146	Eu147	Eu148	Eu149	Eu150	Eu151	Eu152	Eu153	Eu154	Eu155	Eu156	Eu157	Eu158	Eu159	Eu160	Eu161	Eu162	Eu163	Eu164	Eu165
62										Sm143	Sm144	Sm145	Sm146	Sm147	Sm148	Sm149	Sm150	Sm151	Sm152	Sm153	Sm154	Sm155	Sm156	Sm157	Sm158	Sm159	Sm160	Sm161	Sm162	Sm163	Sm164
61										Pm142	Pm143	Pm144	Pm145	Pm146	Pm147	Pm148	Pm149	Pm150	Pm151	Pm152	Pm153	Pm154	Pm155	Pm156	Pm157	Pm158	Pm159	Pm160	Pm161	Pm162	Pm163
60										Nd141	Nd142	Nd143	Nd144	Nd145	Nd146	Nd147	Nd148	Nd149	Nd150	Nd151	Nd152	Nd153	Nd154	Nd155	Nd156	Nd157	Nd158	Nd159	Nd160	Nd161	
59										Pr140	Pr141	Pr142	Pr143	Pr144	Pr145	Pr146	Pr147	Pr148	Pr149	Pr150	Pr151	Pr152	Pr153	Pr154	Pr155	Pr156	Pr157	Pr158	Pr159		
58										Ce139	Ce140	Ce141	Ce142	Ce143	Ce144	Ce145	Ce146	Ce147	Ce148	Ce149	Ce150	Ce151	Ce152	Ce153	Ce154	Ce155	Ce156	Ce157			

核的大小

《原子物理学》中，在讨论Rutherford散射时，曾经对原子核的大小进行了估计 (r_m 为原子核大小的上限)。

$$r_m = \frac{a}{2} (1 + \csc \frac{\theta}{2}); \quad \theta = \pi, r_m = a = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 E}$$

定义1：力的作用半径 (α 散射实验)

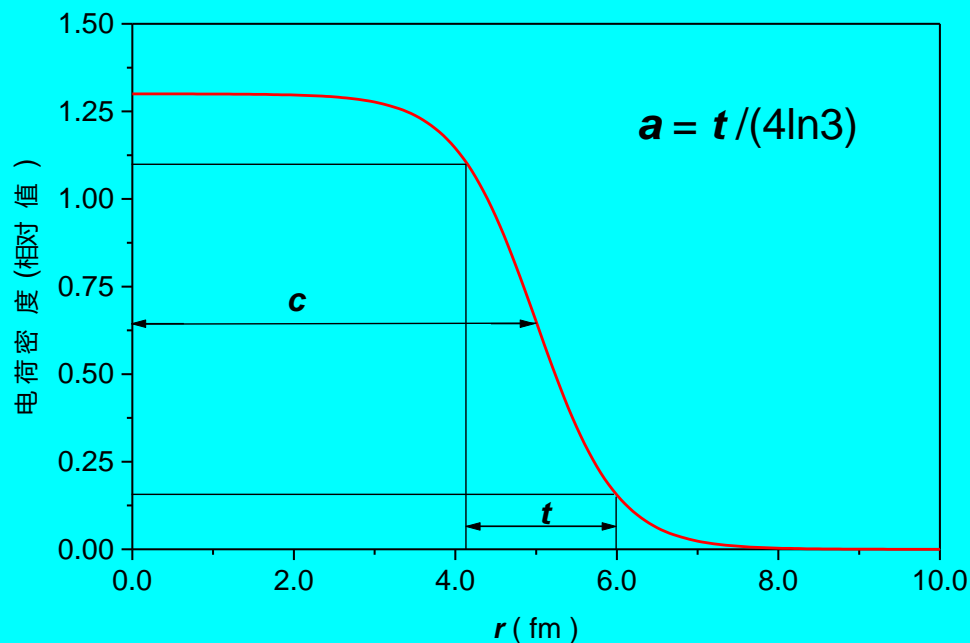
$$R = r_{01} A^{1/3}; \quad r_{01} \approx 1.4 \sim 1.5 fm$$

定义2：电荷分布半径 (高能 e 散射实验)

$$R = r_{02} A^{1/3}; \quad r_{02} \sim 1.2 fm$$

电荷密度分布

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp(\frac{r-c}{a})}$$



经验拟合半径

$$R = r_0 (A^{1/3} + 1.34 A^{-1/3})$$
$$r_0 = 1.16 \text{ fm}$$

核的
体积

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi r_0^3 A \propto A$$

核的
密度

$$\rho = \frac{m_A}{V} \approx \frac{A(u)}{\frac{4}{3} \pi r_0^3 A(\text{fm}^3)} = \frac{3}{4 \pi r_0^3} (u / \text{fm}^3)$$
$$\approx 2.3 \times 10^{17} \text{ kg} / \text{m}^3$$