

中子活化分析与地球灾变研究

毛雪瑛

(中国科学院高能物理研究所,北京 100080)

你知道 80 年代世界科学技术获得重大进展的十大新闻吗? 用本文介绍的中子活化分析法发现了距今 6500 万年前,白垩纪/第三纪(K/T)界线层中铀异常的富集,并由此提出地外物质撞击地球造成恐龙灭绝的灾变理论就是其中之一。

地球的起源和演化,自然界中生物的诞生、发展以至绝灭,始终是人类最关心的问题。人类生活在地球上,必须要了解地球的演化历史,只有研究清楚它的过去和现在,才能更好地预测它的将来。

地质学家和古生物学家发现在 35 亿年前就存在古老生物的遗迹,但是生物在地球上的发展进化并不是一帆风顺的,而是多灾多难的。在生物进化史上先后发生过 25 次大灾变。其中规模最大的古生物灭绝事件发生在寒武纪

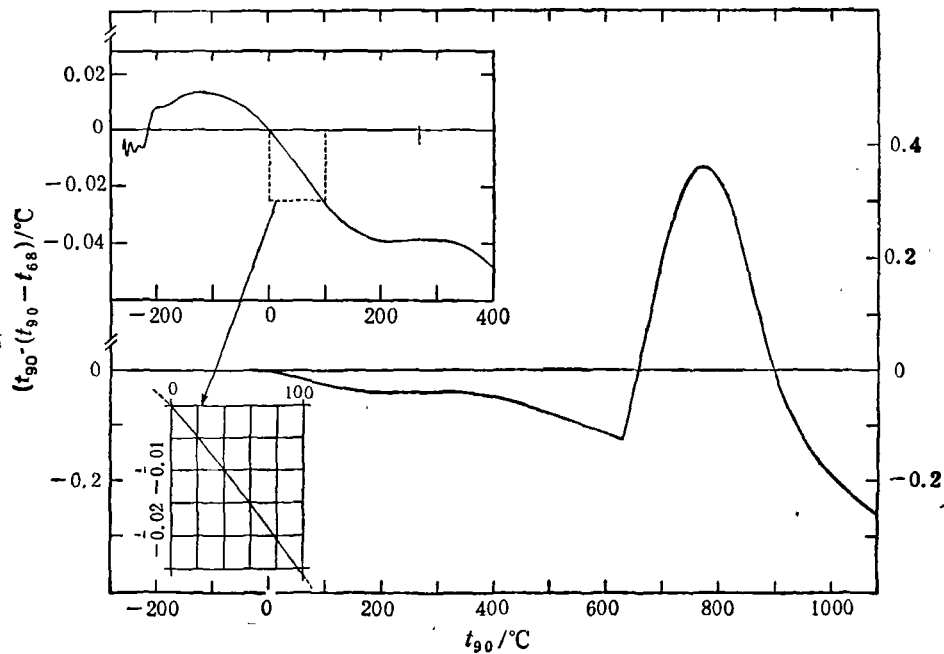


图 1 ITS-90 与 IPTS-68 的差值

始执行,中间只有两个月的时间,而温标本身的变化又很大,故从我国实际出发,采用逐步过渡的办法无疑是正确的。

1990,(1989).

[2] 凌善康等编译,温度-温标及其复现方法,计量出版社,(1983).

[3] 国家技术监督局计量司编,1990 国际温标宣贯手册,计量出版社,(1990).

[1] BIPM, The International Temperature Scale of

末(距今 5.7 亿年)、泥盆纪末(3.6 亿年前)、二叠纪末(2.45 亿年前)、三叠纪末(2.08 亿年前)和白垩纪末(6500 万年前)。

在白垩纪/第三纪的界线上,生物的种类灭绝达 50% 以上。陆生动物中的恐龙和海相的菊石、箭石全部灭绝,有孔虫、超微体种属灭绝率达 80% 以上。究竟是什么原因造成中生代统治地球王国的恐龙的绝灭,成了千古难解之谜。

一、中子活化与恐龙绝灭

在地质学家、古生物家研究恐龙绝灭原因感到困惑时,著名核物理学家,1968 年诺贝尔奖金物理学奖获得者 Alvarez 与他的儿子——对生物绝灭的成因研究有极大兴趣的地质学家合作,把核分析方法——中子活化分析法与恐龙绝灭的研究结合起来,使其柳暗花明又一村。

1980 年,以 Alvarez 父子为首的研究小组,在贝克莱实验室首先应用高灵敏度的中子活化分析法,测定了意大利古比奥(Gubbio)和丹麦的斯特文斯克林(Stevns Klint)白垩纪/第三纪界线粘土层中铀,发现界线层中铀的含量异常富集,高出背景值 30—160 倍。并且,由此提出 K/T 界线粘土层铀的富集是地外物质,可能是小行星撞击地球所致。地外物质撞击地球造成环境的突然变化,改变了生物的生存条件,导致了大规模的生物灭绝。这个理论的提出,在国际上引起了不同寻常的反响。地球灾变研究成为世界各国科学家关注的热点。紧接着 K. Hsü, Kyte, Ganapathy, Smit 和 Hertogen 等人相继研究了西班牙、加拿大、美国、新西兰等世界各地 50 多个 K/T 界线剖面,在界线粘土层中都发现了铀和其他一些亲铁元素的异常。进一步证实 K/T 界线发生的灾变是全球性的事件。

在中子活化分析获得 K/T 界线铀异常的结果之前,曾有各种假设,例如火山爆发、海平面变化、气候反常、盐度变化、造山运动等各种地内成因导致生物灭绝的假说,以及太阳耀斑

物理

和超新星爆发等地外成因的假说。然而都缺乏物理或化学的直接的科学依据。铀异常的发现为地球灾变研究提供了有力的科学依据。

为什么铀的异常能证明 K/T 界线曾经发生过地外物质撞击地球的事件呢?众所周知,铀是一种贵金属,它是一种难熔亲铁元素。在地球早期演化过程中,由于化学分馏作用和重力分异等原因,使地球表层的铀都集中到以铁镍为主要成分的地核中,因此,在地球表层中铀的含量极低。地壳中铀的平均含量小于 1ppb ($10^{-9}g/g$),在火成岩中小于 0.08ppb,在海水中更低,小于 0.1ppt($10^{-12}g/g$)。然而,在地外物质如陨石中铀的含量可高达 500 ppb,甚至更高。因此,铀作为地外物质的指示元素是当之无愧的。这就是 Alvarez 小组发现 K/T 界线铀异常时,提出地外物质撞击地球造成生物绝灭理论的根据。

用中子活化分析测得的界线层中铀的含量,根据下述简化公式可计算出撞击物的大小:

$$d = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot C_{Ir,S} \cdot h \cdot \eta_b \cdot S}{\pi \cdot C_{Ir,C1} \cdot \eta_m}}, \quad (1)$$

(1)式中 d 为撞击物的直径(km), h 为界线层厚度; S 为地球表面积 ($5 \times 10^{16}cm^2$), $C_{Ir,S}$ 和 $C_{Ir,C1}$ 分别为界线层和 C1 型陨石中铀的含量; η_b 和 η_m 分别为界线层和 C1 型陨石的密度。

根据已测得的意大利和丹麦的 K/T 剖面铀含量的结果可以算出撞击物的直径约为 10 km 左右,由此撞击而形成的陨击坑的直径约 200 到 300 km。我们 1984 年获得了亚洲第一个 K/T 界线铀异常的数据。根据我国西藏仲巴 K/T 界线的铀含量,用上式计算的结果与上述结果相符。

二、研究地球灾变的有力工具 ——中子活化分析

中子活化分析是一种核分析方法,它是用一定能量和流强的中子轰击待测样品,然后测定由核反应生成的放射性核素衰变时放出的缓发辐射,或者直接测定核反应中放出的瞬发辐射

射,从而实现元素的定性和定量分析。

各种放射性核素所放出的射线具有它特征的能量和半衰期。因此,通过测定放射性核素所放出射线的能量或者它的半衰期,就能作出定性的判断——存在某种元素;通过测定射线的强度便可得出定量分析的结果。

中子活化分析最基本的活化方程式如下:

$$A_t = 6.023 \times 10^{23} \cdot \theta \cdot f \cdot \sigma \cdot \frac{W}{M} (1 - e^{-\lambda t_1}) \times e^{-\lambda t_2} \quad (2)$$

(2)式中 A_t 为停止中子照射 t 后放射性强度, 6.023×10^{23} 为阿佛加德罗常数, θ 为靶核的天然丰度, W 为靶元素的重量, M 为靶元素的原子量, f 为中子通量 ($n/cm^2 \cdot s$), σ 为核反应截面 ($\sigma = 10^{-24} cm^2$), λ 为核素的衰变常数, t_1 为样品在中子流中照射的时间, t_2 为停止照射后,冷却到测量的时间。

通常实验中将样品和标准放置在同样的照射条件,照射时间相同,在同样的条件下测量它们的放射性,那么样品和标准的某核素放射性强度之比,就可以简化为样品和标准中核元素的重量之比:

$$\frac{A_{\text{样品}}}{A_{\text{标准}}} = \frac{W_{\text{样品}}}{W_{\text{标准}}} \quad (3)$$

(3)式就是中子活化法的相对法的基础公式。已知标准中某元素的重量,测得标准和样品中该放射性核素特征能峰的强度,就可以求出样品中该元素的含量。

中子活化分析的优点是:灵敏度高;准确度高、精密度高;取样量少;可分析的元素很多;可做多元素分析;可分析样品范围极广,包括水、土、气、天、地、生的各类样品,甚至小到几 μg 的宇宙尘样品、单矿物都可分析。

那么,为什么中子活化分析是研究地球灾

变的有力工具呢?回答很简单。因为,中子活化分析法对地质界线层中铀的含量测定具有最高的灵敏度和准确度,是其他方法无法相比的。用仪器中子活化分析界线粘土层中铀,灵敏度达 0.5ppb,用放射化学中子活化分析可达 1ppt,因此中子活化分析与地球灾变研究结不解之缘。

由表 1 可见铀的两个稳定核素都具有反应截面大,生成核素半衰期合适,特征的 γ 射线能量 468.0keV 基本上没有干扰,因此用中子活化测定铀具有极高的灵敏度和准确度。

为了提高中子活化测定铀的灵敏度和准确度,我们从 1983 年开始建立了放射化学分离铀和其他贵金属的硫酸沉淀流程,研究了我国西藏仲巴 K/T 界线剖面,发现界线粘土层中铀异常,填补了亚洲和我国的空白。接着我们又建立了螯合离子交换流程、长链伯胺 N-1923 萃取流程,使铀的分析灵敏度达到 1ppt。我们也和国内外科学家一起投入研究地球灾变的热潮。

三、放射化学中子活化与撞击机制的研究

在 K/T 界线层铀的异常富集,很自然地让人们想到可能是地外物质撞击地球造成的,但是究竟是小行星还是彗星,众说纷云。随着研究的深入,人们发现大规模的火山喷发,地球化学富集过程也可以解释铀异常。许多作者报道了在丹麦的 K/T 界线粘土层有机组份中发现了富集铀及其它贵金属的烟灰。这一发现被认为是地外物质撞击所引起的大规模野火的标志。因此,随着研究的深入,我们用放射化学中子活化研究地质界线层中铀的化学赋存状态,

表 1 铀的活化分析参数

稳定核素	丰度%	反应截面(靶)	核反应	生成核	半衰期	特征 γ 能量(keV)
^{235}U	37.4	624	n· γ	^{235}U	74.2d	468.0,316.4,296.0
^{238}U	64.6	110	n· γ	^{238}U	19.4h	328.4,645

从而阐明 K/T 界线事件的性质和机制。

我们采用本实验室新建立的化学逐步溶解法将地质界线样品用柠檬酸溶解出碳酸盐相(包括易溶性盐类相);用盐酸羟胺溶解出金属相;用饱和溴水溶解出硫化物相;用盐酸溶解出氧化物相;用氢氟酸溶解出硅酸盐相;其不溶物为残余相。在物相分离每一步骤结束的时候,称取一定量的样品,与标准一起送反应堆照射,然后将样品经过碱熔—回流—N-1923 长链伯胺萃取—测定各相中铀的含量。借此放射化学中子活化法,我们研究了丹麦的 Fish Clay, 美国的 Montana, 加拿大的 Morgan Creek 等 K/T 界线铀异常层样品, 宁强碳质球粒陨石以及夏威夷 Kilauea 火山熔岩等样品。结果表明,无论是海相沉积还是陆相沉积的 K/T 界线样品中,铀均主要存在于酸不溶残余相中,不存在于硫化物相中,与碳质球粒陨石的分布情况相似,而与火山熔岩的分布情况相差甚远,后者主要存在于氧化物相,硅酸盐相。K/T 界线样品铀不存在于硫化物相中的结果,既不利于铀的地球化学富集说,也不利于火山喷发说,从而有力地支持了地外物质撞击说。

在研究白垩纪/第三纪界线样品和其他界线层样品中铀和其它微量元素的地球化学特征时,我们发现在白垩纪/第三纪界线层中铀和金的比值的比值在 2.8—4.3, 与宇宙丰度中铀和金的比值 3.3 非常接近,而其他界线层中铀和金的比值非常小,在 0.01—0.25 的范围,与宇宙丰度值相差甚远。因此,这也有力地支持 K/T 界线地外物质撞击成因说。

我们对残余相进行了深入的研究,做了轻元素碳、氢、氮的组成的分析,发现不同的 K/T 界线样品的残余相中 C, H, N 的组成不一样,有些有干酪根,有些没有干酪根,与样品中铀的富集没有必然的联系。此结果不利于地球化学作用生物富集说。我们用透射电镜对界线样品残余相分析,发现不少贵金属的小球粒。同时也发现了铋和铅的小球粒。贵金属小球是高温熔融、凝聚的产物,它的存在有利于地外物质撞击说。而铋和铅的小球的存在则证明了有火山活动的

参与。据此,我们提出白垩纪/第三纪地球灾变的机制是:地外物质撞击地球—火山喷发—再沉积的混合模式。我们对异常铀的赋存状态及其 K/T 事件机制的研究已经进入国际先进的行列。

地外物质与地球相撞时产生高温和强大的冲击波和大量的爆炸碎片,大量杀伤恐龙及其他生物,由于撞击诱发了大规模的火山喷发和全球性的森林大火,以致生物再次受到杀伤。大量的尘埃进入同温层,完全遮蔽了太阳光线,导致恐龙赖以生存的食物链的中断,地球表面的温度大大下降,终于使大批无法适应这种低温的动植物,包括统治地球王国的恐龙走向死亡,以致全部绝灭。

对 K/T 界线撞击机制的研究,正在深入地地进行。最近 Hildebrand 和 Boyton 发现了最接近 K/T 界线的陨击坑在加勒比海,从年代测定证明是白垩纪/第三纪的;在海地南部半岛的 K/T 界线层发现有 50cm 厚的撞击喷射物的沉积层,是已知的 K/T 界线层和假定的 1000km 的陨击坑的喷射物沉积层的 25 倍。此外,还发现了大量冲击变质石英、微球粒和冲击构造,更有力地支持了地外物质撞击造成地球灾变的理论。

四、地球灾变研究的帷幕刚拉开

白垩纪/第三纪界线事件的研究在 80 年代取得了重大进展。但是,这仅仅是开始,还有许多问题有待深入研究。例如,撞击地球的地外物质是小行星还是彗星?是太阳系内的物质还是太阳系外的物质?根据现代流行的宇宙形成和演化理论,太阳系是由原始太阳星云经超新星爆发引起塌缩,然后凝聚和吸集而成。组成太阳系的各种原始成分已经均匀混和,因此太阳系内各物质中元素的同位素组成都是一致的。研究 K/T 界线富铀层中铀和其他贵金属元素的同位素组成,有可能进一步揭示撞击机制,发展地外物质撞击地球造成地球灾变的理论。

自由电子激光的可能应用

李士 李印华

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100080)

本文简要介绍了自由电子激光和 80 年代刚刚兴起的自由电子激光的应用, 展望了它令人振奋的应用前景, 并讨论了它在应用研究方面的深远意义。

一、激光的功绩和困惑

20 世纪 60 年代兴起的的最重大的科学技术成就之一——激光, 它一诞生便深化了人们对于光的认识, 并使光学同其它许多学科领域发生了密切联系, 从而为光学的发展和光的应用开拓了极其广阔的前景。目前, 激光已从实验室走向实际应用的各个方面, 许多以往光学技术办不到的事情, 现在能办到了; 过去能办到的, 由于引入激光技术之后, 效果和精度大大提高了。例如, 用调谐激光研究原子、分子能级的精细程度比传统光学方法提高了成千上万倍; 用激光脉冲测量月球到地球的距离, 可达到几个厘米的精度; 激光全息方法给工业上的应力分析带来了重大革新; 目前, 在工业方面已形成高达数十亿美元的与激光有关的产业。总之, 激光对自然科学各分支领域及技术科学发展的

在研究 K/T 界线生物灭绝的成因同时, 人们自然会提出这样的问题: 在地球演化过程中, 其他几次大规模古生物灭绝的成因和机制是什么呢? 它们是否与 K/T 界线一样是地外物质撞击造成? 作者与国内外学者合作曾系统地研究了我国发育良好的前寒武纪/寒武纪、泥盆纪/石炭纪、二叠纪/三叠纪、以及晚泥盆纪中弗朗斯/法门等界线近 30 个剖面, 获得了大量珍贵的数据, 分析结果表明, 虽然在界线层中也发现了铍比其上下伏地层的背景值高出几倍到几十倍, 但是界线层铍的含量比 K/T 界线富

影响, 将不亚于本世纪发现的 X 射线衍射对晶体学发展曾起到的重大影响。激光的功绩可谓显赫。

但自激光发现后 30 年的今天, 人们对已进入“而立”之年的激光感到越来越不满意了, 迫切希望它能有进一步的突破, 以适应科学技术飞速发展的需要。例如希望普通激光的功率、效率和波长调谐范围有大幅度地提高。这些要求对普通的激光来说, 简直是“天方夜谭”, 这就像跳高一样, 如果运动员跳到他本人的极限高度之后, 再想提高成绩, 不从技术方法上有新的突破, 是很难实现的。探索新方法、新途径来提高激光的特性已提到日程上来了, 诸如曾研究过相关自发辐射效应、切连科夫效应等。1984 年美国物理学家在加速器上利用电子束去放大一束微波辐射, 获得了高功率、高效率、波长宽调谐范围的激光, 这种激光称为自由电子激光 (FEL) 它是 80 年代物理学最重要的进展之一。

铍层中铍含量要低 2—3 个数量级, 很难得出这些界线灾变事件的成因和机制与 K/T 界线事件一致的结论。那么, 这些界线的地球灾变成因和机制到底是什么呢? 这些问题还有待于进一步深入的研究。

- [1] L. W. Alvarez et al., *Science*, 208(1980), 1095
- [2] D. J. Nichol et al., *Science*, 231(1986), 714
- [3] C. F. Chai, *Isotopenpraxis*, 24(1988), 257.
- [4] Mao, X. Y. et al., *Meteoritics*, 24(1989), 298.
- [5] A. R. Hildebrand, et al., *Science*, 248(1990), 843.
- [6] P. Kong, et al., *Meteoritics*, 24(1989), 289.