

放射性元素

C. E. 布列斯列尔

科学出版社

57.27
164

放 射 性 元 素

C. E. 布列斯列尔 著

邱 陵 译

刘 程 校

科 学 出 版 社
1766.10.4 -
1966

С. Е. Бреслер
РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ
Гостехиздат, 1957

內 容 簡 介

本书扼要地介绍了放射化学发展史、微量元素在自然科学中的重要意义和重要的放射性测量法,較詳細地叙述了放射性元素的最重要的理論和研究方法。在較詳細地論述放射性元素的物理化学行为的基础上介绍了放射性物质的濃集和分离方法。

放射性物质的电化学和吸附也是本书比較重要的部分,因为在制备无载体放射性同位素时常常采用电化学法和色层分离法。

此外,书中不仅闡述了放射性元素的化学,也比較全面地介绍了用核反应制备人工放射性物质的方法和最重要的人工放射性物质的性质。并用較多篇幅介绍了重核裂变反应和示踪原子法。

放 射 性 元 素

〔苏〕С. Е. 布列斯列尔 著

邱 陵 譯

刘 程 校

*

科学出版社出版

北京朝陽門內大街 117 号

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

上海新华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售

*

1966 年 4 月 第 一 版

1966 年 4 月第一次印刷

精裝: 0001—1,350

平裝: 0001—1,250

开本: 850×1168 1/32

印張: 14 1/8

插頁: 3

字數: 374,000

統一書号: 13031·2225

本社書号: 3378·13—4

定价: [科七] 精裝本 2.90 元
平裝本 2.40 元

序 言

本书在第三版付印前重新作了根本性的修改。

在过去的四年中,特别是在日内瓦和平利用原子能会议(1955年)闭幕后这一段期间,曾发表了大量的以前是保密的实验资料。为了使本书的篇幅不致增加太大,就删去了核反应的一章,而代之以新写的裂变化学的一章。在“放射性元素化学”一章中,以及在最有前途的分离方法(萃取法和色谱法)的章节中,增加了一些重要的补充。

作者对阅读了原稿、并提出了大量的宝贵意见和批评的所有同志们表示诚挚和深切的谢意。

作 者

210558/11

目 录

序言	iii
第一章 緒論	1
§ 1. 放射化学研究方法的意义	1
§ 2. 历史概要	5
§ 3. 近代自然科学中的微量元素	9
§ 4. 放射性测量的几种方法	12
参考文献	15
第二章 研究放射性元素最重要的方法	17
§ 1. 某些基本概念和单位	17
§ 2. 衰变常数的测定	21
§ 3. 短寿命的实验测定	26
§ 4. 射气法	29
§ 5. 载体沉积法、萃取法	32
§ 6. 放射性沉积法、电化学法、蒸馏法	35
§ 7. 連續衰变物质系列的准确动力学方程及其在个别情况中的 应用	41
§ 8. 放射系	49
§ 9. 盖革-努塔耳定律、 α 衰变常数的理論計算	60
§ 10. 地质学中时间的放射性标度	67
参考文献	74
第三章 放射性物质的濃集和分离	76
§ 1. 低濃物质在溶液中的物理化学行为、放射性胶体的形成	76
§ 2. 放射性盐类以晶体沉淀的形式析出	84
§ 3. 同晶共沉淀	88
§ 4. 結晶系数的物理本性	97
§ 5. 分級結晶	101
§ 6. 萃取法、絡合物	107

参考文献	119
第四章 放射性物质的电化学和吸附	122
§ 1. 金属上双电层的结构、电极上的电化学反应	122
§ 2. 氧化-还原电位	133
§ 3. 在极性吸附剂上吸附现象的分类	140
§ 4. 一级吸附	141
§ 5. 二级吸附、扩散层	147
§ 6. 离子吸附的实例	151
§ 7. 形成混晶的反常情形	156
§ 8. 放射性元素在离子交换柱上的色层分离	158
参考文献	184
第五章 放射性元素化学	186
§ 1. 放射性元素分离的某些特征	186
§ 2. 钍	187
§ 3. 铀	191
§ 4. 射气化学	192
§ 5. 钍	195
§ 6. 镭	196
§ 7. 钋	201
§ 8. 钋	206
§ 9. 镭	212
§ 10. 钍	217
§ 11. 超微量化学方法	234
§ 12. 铀和钍	236
§ 13. 锕系元素: 镅、镎、钍、镤、钆、铈	251
参考文献	273
第六章 用核反应制备人工放射性物质	278
§ 1. 快速荷电粒子法	278
§ 2. 中子法	283
§ 3. 用散变反应制取放射性同位素	293
§ 4. 利用反冲现象从照射过的靶中提取放射性物质	296
§ 5. “热”原子化学	304

§ 6. 处理被照射靶的实用方法	313
§ 7. 放射性同质异能体的分离	316
§ 8. 放射性化合物的制备、交换反应	324
参考文献	329
第七章 重核的裂变反应	332
§ 1. 核能工程中的放射化学问题	332
§ 2. 裂变物理	337
§ 3. “热”实验室	346
§ 4. 裂变碎片的放射化学	350
§ 5. 从裂变产物中提纯核燃料和分离个别放射性元素	376
参考文献	386
第八章 一些最重要的人工放射性物质	387
§ 1. 放射性氫——氚	387
§ 2. 碳的放射性同位素	390
§ 3. 放射性磷和硫	400
§ 4. 碘	402
§ 5. 周期表中空位的填充	403
参考文献	404
第九章 作为研究方法的示踪原子	406
§ 1. 扩散过程的研究. 在固相中的扩散	406
§ 2. 化学反应机理的研究	409
§ 3. 放射性指示剂在化学分析中的应用	412
§ 4. 示踪原子在物理化学中的应用	417
§ 5. 示踪原子实验的设计和计算方法	420
§ 6. 放射性指示剂在生物学和生物化学中的应用	423
§ 7. 放射性元素在医学中的应用	429
§ 8. 放射性同位素在工业中的应用	431
§ 9. 放射性同位素在农业中的应用	433
参考文献	434
結語	437
內容索引	438

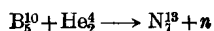
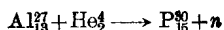
第一章 緒 論

§ 1. 放射化学研究方法的意义

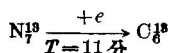
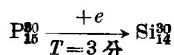
放射化学是研究放射性物质的制备、分离、提純、鉴定等問題，同时也研究主要放射性常数的测量法和放射性元素生成及衰变的核反应的一門科学。这一門科学的特征是：它所研究的对象——放射性元素——常常以微小到用一般的测量法所不能测出的濃度存在着。我們將处于这种情况下的元素称为微量元素。在放射化学中所应用的测量法，其特征是具有极高的灵敏度。因此，这些方法在物理学、化学、技术和生物学的各种不同的任务中得到了应用。这样，就出现了这門科学的一个独立分支——应用放射化学。为了更好地了解这門科学的意义，我們来研究在物理学中三个最重要的发现，它們几乎都是借放射化学的观点和方法完成的。

在1934年F. 約里奧(Joliot)和I. 居里(Curie)研究了鈾的輻射，他們用薄鋁箔盖住鈾，以滤去軟 γ 射綫，这时发现了鋁开始发射正电子。这种沒有預料到的現象，是由他們用小的原始的盖革計数管所証实的。并且不仅对鋁，而且对硼也发现了这种現象。

随后，又发现了第二个基本事实，即将 α 粒子源(鈾)用吸收片盖上后，正电子的发射还繼續了几分钟之久。正电子发射随時間按指数規律下降，即服从放射性衰变的規律。自然，就作了这样的一个假設：正电子的发射源是新的放射性元素，它是以人工方法用 α 粒子轰击硼和鋁时制得的。因为用計数管或威尔逊云雾室沒有发现另外任何能探测出的粒子，所以自然可以这样設想，当 α 粒子轰击鋁和硼的核时，就击出了中子，即发生下面的反应：



接着,就是新同位素的正电子衰变:



当然,这仅仅是一个假设.还需要进行准确的证实.为了这一目的,研究者们对磷和氮进行了化学分离.

这里发生了两个特别困难的问题:第一,新生成的元素的量非常少,以致用一般的经典化学方法(称重、滴定)无法测定;第二,所有的化学操作必须以非常快的速度进行,因为新元素在几分钟内就衰变完了.这两个困难可用下列的一般方法来消除,在所研究的物质中加入一些非放射性的“载体”,即在核反应时所预期生成的

的那种元素的同位素.因为同一元素的几种同位素,按其化学性质来说实际上是相同的,所以反应是以加入大量的载体来进行的,而微量元素原子也就参与了上面的反应.也曾采用了能很快地生成气体的反应.将这些气体从系统中导出并引入气量计中(图1).气量计被充满后,就可以很快地测量气体的放射性,并且能够证实,载体带走了正电子的放射性.

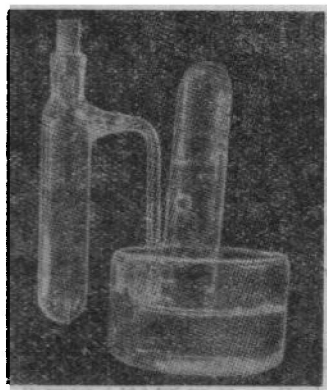
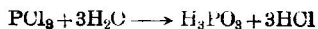
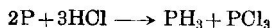


图1 约里奥-居里分离第一批人工放射性物质所用的仪器

为要分离出放射性磷,在盛有盐酸的带磨口的简单仪器中,同时投入铝片和红磷.这时有生成氫气



和磷化氫



的反应发生.

磷化氫和氫一起進入氣量計，這樣全部操作僅持續了 3 分鐘。當然，磷的放射性同位素在所收集的气体中僅占非常小的一部分，然而用計數器探測它的方法因有極大的靈敏度，故比化學法優越。

對放射性硼則進行了如下的處理：取氮化硼的粉末作為被 α 粒子照射的靶子，即靶子中含有載體氮。氮化物經照射後，使其與 NaOH 粉末混合，並在與氣量計相連的試管中迅速加熱。這時發生下面的反應：



生成的氨就把放射性氮一同帶入氣量計中。就這樣，用放射化學方法証實了有人工放射性元素的生成。

第二個著名的發現是海維希 (Hevesy) 在 1913 年完成的。根據 N. 玻爾 (Bohr) 的建議，海維希對鉛的放射性同位素與非放射性同位素的分離進行了研究。他曾研究了這兩種同位素的各種物理性質與化學性質，並指出，在當時實驗能達到的準確度內，兩種同位素的性質相同，因而分離它們是不可能的。這一失敗卻使人們發現放射性同位素尚有新的未意料到的用途。海維希發現，在操作鉛的過程中所得到的物質都含有放射性。這就使他產生了“示踪原子”的概念。這一概念歸結如下：

假定在一個複雜的物理或化學過程中（或生物過程中），我們對某一元素的“命運”感興趣，而我們所感興趣的元素有放射性同位素，那末就可以把小量的該元素的放射性同位素加入到非放射性物質的基本部分中。因為按同位素的化學性質來說，它們實際上是相同的，所以放射性添加物的命運和非放射性物質的基本部分的命運相同。測量放射性添加物的輻射，就能夠很靈敏地追蹤其行為。我們就這樣用放射性指示劑“標記”了所感興趣的元素，從而就能十分準確地了解與此元素所發生的全部變化。這種方法在研究複雜的有機合成和生物化學的過程中具有特殊意義。

借示踪原子法就可以對物理、化學、生物物理及其他領域進行研究。海維希立刻就將此法用來研究固體和液體的自擴散，以及

研究在中鉛毒时动物机体内鉛的迁移和其他类似的問題。現在，除氮和氧以外，已知門捷列夫周期表中大部分元素都有适用于操作的放射性同位素，而对氧和氮两元素已研究出借分离出的稳定同位素 O^{18} 和 N^{15} 进行标记的技术。所以示踪原子法在所有的自然科学和工程技术的领域中已成为一个最有威力的和万能的識別工具。

最后，第三个例子是哈恩 (Hahn) 和斯特拉斯曼 (Strassman) 在 1938 年所发现的鈾分裂，由此以后就兴起了整个的核动力工程学。

在本例中，实验的概念和技术都是純放射化学的，是基于分級結晶法分离鋇与鐳的經典問題的。

我們来提一下科学家們所經歷的道路。最初曾証实，当用中子轰击鈾时有新核生成。当时认为，这核反应导致生成鐳的同位素，但新生成的物质总共只有几千个原子，即重量的数量級为 10^{-18} 克。为了把此物质从几乎仅由鈾組成的混合物中分离出来，在混合物中加入了鋇，并以硫酸盐的形式将它沉淀出，然后试图用分級結晶法濃縮假設中的鐳同位素。結果是否定的——沒有得到任何的分离物。发生了这样的疑問：分离过程是否能应用于这样微量的物质？是否在一定程度內，他們仍能保持其化学特性，使得对适用于大量原子的規律仍然有效？曾作了一个專門的实验——在鋇中加入同样的一份普通的鐳，并用結晶法以濃縮鐳。实验結果表明，分离系数与在較早的工作中所得到的数据完全相符。这时实验者只剩下了一个結論——不得不承认，当用中子轰击鈾时，生成了鋇的同位素。显然，不可能把它与作为惰性载体而加入的鋇分离开。这样就发现了鈾分裂成为两个大的碎片的核反应。

上述的这些例子足以清楚地說明，物理和化学这两門科学相互渗透和相互充实的过程。現今在原子核物理与放射性的领域中，几乎举出不包括必要的放射化学过程的实验。反过来说，放射性元素化学的整个发展都是基于物理概念和物理測量方法的。

§ 2. 历史概要

放射化学或放射性物质的化学，是和天然放射性的发现同时诞生的。1896年法国学者贝克勒耳(Becquerel)在研究铀盐时，发现它们发射出不可见的射线，引起了照相底板变黑。贝克勒耳试验了一系列的其他试剂后，确信仅仅铀的盐类才显出这样的效应，这就毫无疑问地证明了铀是新射线的射源。

在研究磁场对射线的作用时，证实了射线的组成中包括有：带正电的粒子，叫 α 射线；带负电的粒子，叫 β 射线。在磁场中不偏转并能穿过的射线，叫 γ 射线。以后才弄清， α 射线原来是氢核（更准确些说，是同位素 He_2^+ ）， β 射线是快速电子，而 γ 射线是电磁波。

在1898年，玛丽·居里(Marie Curie)和皮埃尔·居里(Pierre Curie)发现了钍也能发射出与铀射线相似的射线。此外，他们还发现两个以前所不知的、也能发射出射线的元素。这两个元素叫作“镭”和“钋”。这种能发射出 α 、 β 和 γ 射线的性质叫做放射性。在很短的时间内就发现了七个放射性元素。

在起始的一个时期，将放射化学归结为周期表上这七个元素（钋、氡、镭、锕、钍、镤、铀）的化学。通过实验发现了这些元素的下列性质。

1. 光化效应 当用上述物质或其化合物照射照相底板时，经显影后，发现底板变黑。

2. 气体的释出 最先是用光谱法发现太阳上有氢，地球上的氢是作为放射性衰变产物被发现的。冉赛(Ramsay)在研究装有少量镭盐的安瓿时，发现了氢的光谱线。除氢光谱线外，还发现了另一未知气体(叫做镭射气)的谱线。后来这个气体就称为氢。镭射气这个名称是与下面的事实联在一起的，即最初氢是仅当有镭存在时才出现的。现在已知还有好几种射气的同位素。关于它们，将在后面谈到。氢和氦存在于放射性物质中，因此，这显然说明了，它们是在放射性衰变的过程中产生的。

3. 組成 α 和 β 射線的粒子帶有巨大的能量 可以这样来判斷粒子能量的大小,在薄壁封口安瓿中裝有鐳試劑,經一短暫時間后不仅在其中发现有氦,而且在安瓿外,也发现了氦,这就是說 α 粒子穿透了薄壁玻璃。

4. 放熱 放射性物质的温度常常高于周圍介质的温度。这就表明,在放射性衰变时放出大量的能量。根据地质学的數據,这种能量在地壳的热平衡中起着重大的作用。

5. 螢光的激发 貝克勒耳早就发现了鈾发射出的射線的这种性质。后来,盖革(Geiger)又发明了閃爍法,它在核物理的发展中起了頗大的作用。此法可归結如下:輻射是根据每个粒子在硫化鋅屏上引起的閃爍而被記錄下来的;用显微鏡观察屏,根据記下的閃爍数,可以判断輻射的强度。

在发现放射性后經過了 23 年,就取得了如下的重大成就——人工的核分裂。

1919 年卢瑟福(Rutherford)用快速的 α 粒子轰击氮,成功地分裂了氮原子核。这样一来就証明了使元素进行人工转变的可能性,并且也就兴起了核反应的一个新領域,它也是放射化学研究的一个对象。

上面已經說过,1913 年海維希发现了示踪原子法,这是应用放射化学的开端。但在 1913 年示踪原子法不可能得到更大的发展,因为这时只知道为数不多的天然放射性物质,它們不参与化学家或生物化学家所特別感兴趣的天然化学反应,因而放射化学的範圍一直是很窄的。

以后的最重大的事件是在 1934 年发生的。在这一年, F. 約里奧和 I. 居里发现了人工放射性,随后費米(Fermi)和他的合作者証实了,用慢中子几乎可使所有的元素都引起放射性。从此以后,示踪原子法就具有了普遍意义,而其作用特別在生物学中也就逐年地增长。使用放射性 C^{14} 或放射性同位素 P^{32} 就可以仔細追究天然生物化学合成的过程。在这一領域中的研究使有机体中物质的代謝过程得以明了。

在 1938 年发现了鈾的輕同位素在中子作用之下发生的分裂。在这以后,发现要真正有可能利用原子核能,首先要求核化学有新的研究方法。这样就产生了“裂变”物(鈾的裂变产物)化学和超鈾元素化学,現在已知的超鈾元素有 9 种¹⁾。放射化学方法得到了巨大的工厂規模的应用。用 0.000001 克的 Pu 試剂研究了工业規模生产 Pu_{94}^{239} 的工艺。用这样微量物质进行研究的結果表明,对于建立超过实验室产量 10^{10} 倍的工厂是完全可能的。

在放射性元素的物理和化学的研究工作中,苏联科学占有显著的地位。

在十月革命前,俄国只有个别的学者对放射性现象有兴趣。在 20 世紀起着重要作用的这一新的科学部門,在当时还没有开始进行有计划、有系統的研究工作。最重要的原因是由于俄国缺乏放射性試剂。不足为奇,俄国放射学家最初的工作是致力于寻找祖国的矿藏以获得放射性的来源,以及研究放射性矿产的地质勘探方法。彼得堡大学教授 И. И. 鮑尔格曼(Боррман)和莫斯科大学教授 А. П. 索科洛夫(Соколов)对俄国許多地区的矿水、矿渣以及空气的放射性进行了考察。我們將創建按氡測定鐳的补偿法归功于索科洛夫。这种方法得到了一致的公认,直到現在也还未失去其意义。В. А. 巴罗道夫斯基(Бородовский)也是放射学家之一,他在国家度量局中建立了輻射度量实验室,并研究了一系列放射性矿物。1910 年以后,俄国勘探放射性物质的工作很快地发展起来了。这时,最偉大的俄国矿物学家和地质学家——科学院院士 В. И. 維尔納茨基(Вернадский)和 А. Е. 費尔斯曼(Ферсман)成为这一事业的领导人。維尔納茨基院士了解到发现放射性的重要意义,比同时代很多最偉大的物理学家要早得多。1911 年他所提出的关于将来广泛利用放射性衰变能的思想是一个惊人的科学預言的例子。維尔納茨基以及后来費尔斯曼使得俄国广闊領土上的放射性矿物的勘探工作具有現今的規模。在这一領域中,俄国的地质科学远远地超过西方国家。但是在放射化学和放射物理的領域

¹⁾ 現在已知的超鈾元素为 11 种(已用人工法制得了 103 号元素 Lw)——校者注。

中工作的进展却非常慢。然而在这一时期，俄国物理学家和化学家仍然完成了一系列极重要的工作。

Н. Н. 貝凱托夫(Бекетов)院士的助手 Ю. Н. 安東諾夫(Антонов) 在 1912 年发现，在鈾的衰变产物中有一种新的放射性元素 UY (我們在后面将会碰到的，它是釷的同位素 Th_{90}^{231} ，亦即錒鈾 U_{92}^{235} 的一个子物质)。UY 的发现和其性质的研究是 Ю. Н. 安東諾夫在 1913 年答辯碩士論文的題目。Л. С. 科洛夫拉特-切爾文斯基(Коловрат-Червинский) 在研究固态和熔融态盐发射射气的本領方面，以及用射气法測定鐳和釷的方法方面，进行了一系列重要的工作。

在十月社会主义革命之后，苏联的科学事业得到政府大力支持，也就开始了有计划的发展。科学家們各自独立地进行研究，这是不可能得到巨大的成果。因此取而代之，出现了許多的学派，这些学派都是在具有特殊的卓越装备的科学研究所的基础上发展起来的。В. Г. 赫洛平(Хлопин) 院士和他的学生 В. А. 尼基京(Никитин)、И. Е. 斯大里科(Старик)、А. Е. 巴列西斯基(Полесницкий)、А. П. 拉特涅尔(Ратнер) 和其他等人借分級結晶法創造了微量元素(其中包括鐳)濃縮与分离的近代物理-化学理論，以及放射性胶体的形成和放射性元素吸附的近代概念。在苏联，維尔那茨基、赫洛平、斯大里科和 Э. К. 盖林格(Герлинг)是把放射化学法应用到地质学中測定矿物和地球年龄的創始人。

Л. В. 梅索夫斯基(Мысовский) 在 1919 年創建了近代核物理最重要的实验方法(厚层照相底板法)，单个快速粒子在底板內拍下象影(在溴化銀薄层中就記錄下粒子本身的徑迹)。后来此法在 А. П. 日丹諾夫(Жданов) 和 Н. А. 培尔菲洛夫(Перфилов)的工作中有很大的发展。

И. В. 庫尔查托夫(Курчатов)、梅索夫斯基和 Л. И. 魯西諾夫(Русинов) 发现一个很有意义的核的同质异能現象，即存在有組成相同而能級和寿命都不相同的放射性核。以后我們将会看到，同质异能現象的发现对放射化学的研究及核物理的工作有很大的推

动作用。

Г. Н. 弗列洛夫(Флеров)和 К. А. 培特尔扎克(Петржак)在庫尔查托夫实验室中发现了鈾和釷的自发衰变。这是在此实验室中第二个发现。从自发衰变得出了很多結論，它們不仅对物理学来說是重要的，而且对技术和地质学也都很重要。

在 П. И. 卢基尔斯基(Лукирский)院士[卢基尔斯基和 М. Г. 麦謝里亚科夫(Мещеряков)]的实验室里，对含量稀少的氦同位素 He_2^3 (在空气中的含量为 He_2^4 的 $10^{-5}\%$) 的行为进行了研究，并发现了 He_2^3 轉变为一般的 α 粒子的奇异反应。А. П. 日丹諾夫、卢基尔斯基和 Н. А. 培尔菲洛夫对于在宇宙綫的作用下发生的新的特殊过程进行了研究，并且得到了关于基本粒子——介子的定量数据。

在应用放射化学领域中，苏联学者取得了大量的重要成果。下面将首先談一下这些成果。В. И. 斯皮秦(Спицын)最先采用了放射性标记来测定溶解度。И. Е. 斯大里科是把放射性指示剂应用到分析化学中的首創者之一。С. З. 罗金斯基(Рогинский)和 А. И. 布罗茨基(Бродский)广泛地利用了示踪原子法来研究化学反应的机理。

众所周知，在苏联很多物理学家和工程师們的努力之下建立了世界上第一个 5000 千瓦的工业原子能发电站。并在第六个五年計劃內准备建立数个总功率为 2.5 百万千瓦的原子能发电站。在这一领域中，苏联超过了西方資本主义国家。

不久前所举行的日内瓦和平利用原子能會議表明，在动力堆的建設方面，苏联学者走在最前面。把氧化鈾悬浮在沸水中的均相反应堆可称是一个最具有独创性的新工作[А. И. 阿利哈諾夫(Алиханов)和其合作者]。放射性同位素在苏联的工业、农业和医学中的应用极多，方面也較广，并且还都具有其独创性。

§ 3. 近代自然科学中的微量元素

放射化学有一个极重要的特点：那就是微量元素的化学，即不

可見的和不能称重的物质的化学。

近十年来，自然科学发展的特征是微量物质的不断增长。这就是說，在一系列的情况下，一些少量的物质在各种現象中起着决定性的作用。用一般方法来测量这些起作用的量，至少是不方便的。

下面是四个足够有代表性的例子。

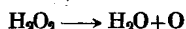
1. 半导体的电导 A. Ф. 約飞(Иоффе)院士和其合作者在研究合金的和由电正性和电負性元素生成的化合物的电导、霍耳效应(Hall effect)和热电性时指出，在这类物质中，当遵守严格的化学計量时，电导非常低，該物质表现得如同离子晶体。例如在研究PbS(方鉛矿)时，此物质在一般状态时，它的电导几乎与金属的电导相同，但当物质中鉛原子和硫原子的量严格地符合化学計量比例时，PbS 的电导的数量級仅为 $10^{-8} \frac{1}{\text{欧姆} \cdot \text{厘米}}$ ，它相当于电导很差的半导体。这时，外层的价电子从鉛原子轉移到硫原子上，就得到 NaCl 型的离子晶体。只有少量的电子由于热扰动而轉移到电导带，因而使晶体产生不大的电导，电导与温度的关系服从下面的規律： $\sigma = A e^{-U/kT}$ 。

但是如果加入比化学計量稍多的电子給予体，即鉛原子，那末就会出现一定濃度的自由电子，而其濃度与温度无关。这种自由电子的濃度比由于热扰动所引起的电子濃度大 9 倍时，物质就开始表现得如同有較低的电子濃度的金属，但毕竟还是象金属一样。这样的物质叫混合金属。

简单的計算表明，在 1 厘米³ 方鉛矿中，Pb 过量 10^{-6} 克就足以使其从离子晶态轉变为混合金属态。

2. 催化作用 在化学中我們知道，少量的催化剂对反应有决定性的影响；而更少量的杂质却可以使催化剂“中毒”。

例如，用鉑催化过氧化氢的分解反应：



为使反应进行得十分剧烈，使鉑的濃度达到 3×10^{-9} 克/毫升