

# 放射光晕和钻石

## 钻石真的永恒吗？

### 抽象的

十多年前，人们首次在钻石中发现了放射晕。此后，鲜有研究致力于寻找其他含有放射晕的钻石，解释放射晕的成因，或评估其重要性。我们对来自不同来源的此类钻石进行了搜寻，并识别出含有单环、三环和四环的放射晕，以及扭曲晶体“管状”的奇特结构。新数据表明，钻石中放射晕的退火温度高于 620°C。我们基于钋放射晕形成的热液流体运输模型，对这些钻石中的放射晕和“管状”结构进行了解释。

**关键词：**放射晕、钻石、钻石包裹体、锆石、钋、金伯利岩、热液、解理

本文最初发表于 *第六届国际创造论会议论文集*，第 323-334 页（2008 年），经 [匹兹堡创造科学协会](#) 和 [达拉斯创造研究所](#) 许可，在此转载。

### 介绍

钻石可能是人类已知所有矿物宝石中最令人梦寐以求的。印度是最早的钻石产地，早在公元六世纪就已开始生产钻石，其主要客户是君主。在 19 世纪 60 年代末南非第一座商业钻石矿开采之前，钻石一直非常稀

有,只有极少数特权阶层才能拥有。1953年,玛丽莲·梦露在电影《绅士爱美人》的歌曲中唱出了“钻石是女孩最好的朋友”这句名言,使之名永载史册。当然,用钻戒求婚早已成为一种约定俗成的习俗。戴比尔斯是一家私营商业企业,至今仍是世界上最大的钻石销售商,仅2005年的收入就高达650亿美元。该公司于1947年推出了成功的“钻石恒久远,一颗永流传”营销活动。<sup>2</sup> 钻石无与伦比的璀璨光芒、硕大的尺寸和缤纷的色彩使其极具吸引力,但真正赋予其耐久性的是其独特的硬度和抗风化能力。如今,每年开采的钻石超过1.3亿克拉(价值100亿至130亿美元)。<sup>3</sup>

微小的放射性晕(简称放射性晕)最早于十年前在钻石中被发现。<sup>4,5</sup> 这一发现曾引发一些简短的讨论,<sup>6,7,8</sup> 但此后鲜有研究阐明其成因。本研究旨在寻找更多含有放射性晕的钻石,并深入探究其可能的形成机制。

## 钻石

钻石分为两大类——I型钻石(含氮)和II型钻石(不含氮)。<sup>9</sup> 根据氮的形态和位置以及硼的存在与否,钻石通常可分为四个亚类。例如,Ia型钻石可能占世界天然钻石的98%以上,其氮含量从200 ppm到最高5500 ppm不等,以氮原子簇或聚集体的形式分布在钻石内部。<sup>10</sup> 此类钻

石通常为无色、浅黄色或棕色。Ib 型钻石约占天然钻石的 1%，呈黄色，氮原子含量较低（150–600 ppm），以碳原子取代的形式存在于单个碳原子上。此类钻石的正常颜色范围从浅黄色到亮黄色，甚至琥珀色。IIa 型钻石占有所有钻石的比例不到 1%，其氮原子浓度极低，在 4–40 ppm 范围内（红外光谱法检测不到或几乎检测不到）。这些钻石通常为无色或棕色。世界上一些体积非常大的钻石就属于这一类。IIb 型钻石是最稀有、最纯净的类型，硼含量最高可达 20ppm 左右，氮含量则更低。这类钻石通常呈蓝色或灰色，并且具有导电性。

钻石的起源和形成尚未完全明了，但普遍认为钻石是在地幔上部 150 至 300 公里深处的液态熔体中结晶形成的。<sup>11</sup> 在这些深度，温度范围为 1100 至 2900 摄氏度，压力范围为 50 至 100 千巴。这一结论是通过从地幔上部携带钻石的火山岩中带出的岩石碎片中的矿物进行实验室研究计算得出并证实的。<sup>12</sup> 由于某些矿物包裹体的形成需要极高的温度和压力，一些钻石甚至可能形成于地表以下 450 公里深处。<sup>13</sup>

迄今为止发现的大多数天然钻石被认为形成于 10 亿至 30 亿年前，当时地幔岩石中镁和铁的浓度相对较高。<sup>14,15</sup> 钻石的形成过程是根据对地球上

地幔 150-300 公里深度处环境条件的了解而推断出来的。<sup>16, 17, 18</sup> 钻石碳源的来源至今仍存在很大争议。<sup>19, 20, 21</sup> 钻石一旦形成，似乎就在前寒武纪大陆克拉通<sup>的太古宙地幔根部下方</sup>的上地幔中停留了数亿至 20 亿年。由于高温高压，结晶后的碳金刚石相在那里保持稳定。

人们普遍认为，地幔局部熔融随后产生富含二氧化碳和水的岩浆，即金伯利岩或<sup>钾镁</sup>煌斑岩。这种富含挥发分的岩浆随后开始爆炸性地上升，穿过含有钻石的地幔区域，并通过地幔和地壳中不断扩展的裂缝，以每小时 10-30 公里的速度将钻石输送到地壳表面。<sup>22, 23</sup> 金伯利岩和钾镁煌斑岩岩浆在接近地表时冷却并硬化，因此，由此产生的爆炸性喷发通常会使得凝固的岩浆破碎，形成冷火山喷发。喷发后残留在岩浆通道中的物质以及沉降到通道中的物质，都含有呈管状结构的钻石。如果这些金伯利岩和钾镁煌斑岩岩浆没有在 8-24 小时内从上地幔灾难性地上升到地表，那么钻石晶体在上升过程中会因压力和温度的变化而变得不稳定，并最终转化为石墨。在地表，这些金伯利岩和钾镁煌斑岩筒会经历风化和侵蚀，钻石因此被冲积到河流系统、三角洲和海岸线的沉积物中。留在岩筒中的钻石可以被开采，通常是从很深的地下开采。对于某些钻石矿床，目前尚未提出任何形成机制。<sup>24</sup>、<sup>25</sup>、<sup>26</sup>、<sup>27</sup>

尽管人们投入了大量精力来生产宝石级合成钻石，但收效甚微。1955年，通用电气公司的研究人员在实验室极端高温高压条件下，历经数周，成功合成了微小的工业级钻石。<sup>28</sup>此后，人们生产了许多小型工业级钻石（据估计，年产量高达10万克拉）。为了生产这些钻石，必须在过渡金属（或其他“晶种”）存在的情况下，将碳置于极高的压力和温度下，以启动反应。<sup>29</sup>、<sup>30</sup>、<sup>31</sup>虽然已经生产出重达5克拉的宝石级钻石，但其生产成本仍然高得令人望而却步。戴比尔斯公司声称他们的设备可以区分合成钻石和天然钻石；但这一说法备受争议。大于1克拉的合成宝石难以生产或销售。

圣经中多处提及钻石。大祭司胸牌上的十二颗宝石中就有一颗钻石，代表以色列十二支派在上帝面前的地位（出埃及记 20:18；39:11）。由此可见，上帝视钻石为美丽、纯洁和珍贵的象征。事实上，在以西结书 28:13-14 中，提到“受膏的基路伯”，他在“上帝的园中”和“上帝的圣山上”所佩戴的饰物是“各样宝石”，其中就包括钻石。这表明，在上帝创造世界之后，钻石和其他宝石就已存在于地球之中。因此，如果钻石真的像人们所说的那样“古老”，那么它们可能可以追溯到最初的创造时期。如今，钻石存在于地壳和地表，很可能是由于洪水期间金伯利岩和钾镁煌斑岩岩浆的喷发所致。钻石及其起源偶尔会在神创

论新闻报道和文献中出现。

<sup> 32 , 33 , 34 , 35 , 36 , 37 , 38 , 39</sup>

## 钻石中的内含物

天然钻石（以及许多其他晶体材料）的晶体基质中常常包裹着其他矿物的细小颗粒或晶体，这些被称为包裹体。已发现的天然钻石包裹体包含 20 至 30 种不同的矿物，以及 58 种不同的杂质，包括铀和钍。

<sup> 40</sup>合成钻石也含有包裹体，但这些包裹体大多是制造过程中引入的金属碎片。

<sup> 41</sup>就天然钻石而言，这些包裹的矿物必须在钻石形成之时就已存在，才能被包裹在钻石基质中。据目前所知，钻石几乎完全化学惰性，并且极难受到任何污染或晶格内部的化学交换。这意味着，钻石从地幔上层穿过地壳到达地表，在 150 至 300 公里的上升过程中，这些包裹体始终保持完好无损。42、

43、44、45、46 因此，<sup>这些包裹体代表</sup>着在地幔条件下捕获的<sup>微小</sup>“胶囊”，它们安全地从上地幔输送到地表。然而，关于钻石中发现的包裹体<sup>类</sup>

型，仍存在一些尚未解释的谜团。例如，众所周知，硫化物是钻石中最常见的包裹体，这意味着这些硫化物形成于地幔中。然而，许多通过火山喷发从上地幔带到地表的地幔捕虏体仅含有少量硫化物。47 此外，在如此深的地幔（和压力）下，盐水、水以及气体是

如何以流体包裹体的形式被包裹在钻石中的，也令人费解。

包裹体包括但不限于磷灰石、方解石、碳酸盐、铬铁矿、小型钻石、石榴石、赤铁矿、铁、云母、黄铁矿、辉石、硅酸盐、硫化物、锆石，以及如前所述的液体（例如液态二氧化碳、水甚至盐水）和气体。

[48](#) · [49](#) · [50](#) · [51](#) · [52](#) · [53](#) · [54](#) · [55](#)  
· [56](#) · [57](#) · [58](#) </sup>

矿物包裹体中通常含有放射性核素，例如铀或钍，这些核素嵌入包裹体的晶格中。这些放射性核素在放射性衰变过程中会释放 $\alpha$  粒子。 $\alpha$  粒子在矿物中（以及周围基质中）的传播距离取决于它们从核素原子核中释放出来的能量以及晶体材料的特性。如果发生足够的自辐射，包括锆石在内的包裹体的晶格结构可能会随着时间的推移而变得有些无定形。<sup> [59](#) · [60](#)  
</sup>

钻石中存在锆石的情况被认为较为罕见，但此前已有报道。<sup>[61](#) · [62](#)</sup>锆石包裹体的报道较少，可能是因为人们认为锆石不会出现在地幔深处，而钻石通常被认为就形成于此。<sup> [63](#)</sup>目前普遍认为锆石主要存在于地壳中。由于锆石硬度极高，钻石在从地幔上升到地表的过程中不太可能从地壳中吸收锆石（J. Baumgardner，私人通讯，2007年4月2

日)。尽管如此，锆石包裹体确实存在于钻石中，并且已有相关报道。<sup>64</sup> <sup>65</sup>此外，甚至还有关于锆石中存在钻石包裹体的报道，<sup>66</sup> <sup>67</sup> <sup>68</sup>但这些是地壳超变质条件下形成的微钻石。<sup>69</sup> <sup>70</sup>

锆石已知含有放射性核素（如上文所述），并且众所周知，它们也是<sup>238</sup>U放射性晕的放射中心，这种放射性晕已在黑云母、绿泥石、堇青石、萤石、蓝宝石、石英和其他矿物中被观察到。

<sup>71</sup> <sup>72</sup> <sup>73</sup> <sup>74</sup> <sup>75</sup> <sup>76</sup> <sup>77</sup> <sup>78</sup> 然而，一位知名研究人员指出，他并未发现任何关于钻石中含有铀的报道（KN Bozhilov，私人交流，2006年6月16日）。尽管如此，已知蓝宝石中的锆石包裹体含有铀，铀是钍的母体放射性核素<sup>79</sup>，其他研究人员也曾在含金刚石的金伯利岩中的其他岩石中发现过此类放射性元素。<sup>80</sup>

放射性晕是指由含有铀（U）和钍（Th）等放射性元素的微小中心包裹体发出的 $\alpha$ 粒子辐射造成的微小圆形变色和变暗区域。<sup>81,82</sup>这种损伤主要源于 $\alpha$ 粒子在宿主矿物晶格中产生的点空位。可以通过环的直径来确定造成暗区特定环的同位素种类，环的直径与该同位素种类发射的 $\alpha$ 粒子的能量成正比。稀

有元素钋 (Po) 在  $^{238}\text{U}$  衰变链中会短暂地产生三种同位素—— $^{218}\text{Po}$ 、 $^{214}\text{Po}$  和  $^{210}\text{Po}$ 。虽然  $^{238}\text{U}$  放射性晕通常由八个环组成，但也存在仅由三个、两个和一个环组成的放射性晕，分别由这三种钋同位素的  $\alpha$  衰变产生。 $^{218}\text{Po}$ 、 $^{214}\text{Po}$  和  $^{210}\text{Po}$  放射晕的形成必然需要其放射中心仅存在相应的 Po 同位素。据估计，每个放射晕的形成需要 5 亿至 10 亿个  $\alpha$  粒子。[83](#)

人们对被解释为钋放射性晕的放射性晕是否已被正确识别提出了质疑。例如，Moazed、Spector 和 Ward [84](#) 以及 Moazed、Overbey 和 Spector [85](#) 声称，单环、双环、三环和四环放射性晕可以清晰明确地证明是由  $^{238}\text{U}$  和  $^{232}\text{Th}$  衰变链产生的，而不是像 Gentry [86](#)、[87](#)、[88](#)、[89](#) 提出的由“无母体”钋同位素产生的。这一说法部分基于对晕状放射中心离子微探针分析中可能存在的不确定性。然而，Gentry [90](#)、[91](#) 以及 Gentry、Hulett、Cristy、McLaughlin、McHugh 和 Bayard [92](#) 反驳了这一说法，证明这些分析已采取了充分的谨慎措施，并采用了其他技术进行比较以排除此类不确定性。此外，许多其他不同意 Gentry 关于钋放射性晕形成模型的学者也接受了其正确的识别（例如，Damon [93](#)、

Dutch <sup>94</sup>、Wakefield <sup>95</sup>、Wilkerson <sup>96</sup>、York <sup>97</sup>)。事实上，Collins<sup>98</sup>更进一步，在其列举的解释 Gentry 难题但尚未完全令人满意的尝试中，特别提到了 Moazed、Overbey 和 Spector<sup>99</sup>的观点。无论如何，Meier 和 Hecker<sup>100</sup>已确凿地证明，钋放射性晕有时与钋带相关，而钋带是由热液沿裂缝输送钋而形成的。因此，绝大多数人一致认为钋放射性晕已被正确识别。

鉴于三种钋同位素的半衰期都很短——分别为 3.1 分钟、164 微秒和 138 天，钋放射晕的形成一直颇为神秘。通常，钋放射晕被称为“一个非常小的谜团”，而没有给出进一步的解释（Dalrymple，引自 Gentry<sup>101</sup>）。这个谜团在于，这些钋同位素是如何从附近的铀<sup>-238</sup>源中分离出来，并在放射中心聚集形成钋放射晕的，而这一切都发生在这些钋同位素的十个半衰期内，这与它们的有效寿命（例如，钋<sup>-214</sup>的有效寿命为 1.64 毫秒）相符。因此，Gentry <sup>102</sup>、<sup>103</sup>、<sup>104</sup>、<sup>105</sup>提出，钋必定是原始的，在放射中心原位生成，然后几乎瞬间就形成了钋放射晕。此外，他认为，如果钋是原始的，那么其寄主晶体和岩石（例如黑云母片及其寄主花岗岩）也必然是同时形成的。然而，正如

Wise<sup>106</sup>和 Snelling<sup>107</sup>所指出的，许多含有钋放射晕的花岗岩从其地质背景来看，似乎是在大洪水期间形成的，因此不可能是原始（即新生成的）花岗岩。这反过来意味着，在这些花岗岩中产生钋放射晕的钋也不可能是原始钋。事实上，Snelling 和 Armitage<sup>108</sup>研究了三个特定的含钋放射晕的花岗岩岩体，并证明它们必然是在大洪水期间生成和形成的。因此，Snelling 和 Armitage<sup>109</sup>以及 Snelling<sup>110</sup>提出了 Po 放射晕形成的热液流体运输模型，该模型已被后续研究测试和验证（Snelling, <sup>111, 112, 113</sup> ; Snelling 和 Gates<sup>114</sup>）。

Mendelssohn、Milledge、Vance、Nave 和 Woods<sup>115</sup>报道了利用阴极发光法在不透明钻石的外表面发现了放射晕。然而，Armitage<sup>116, 117</sup>首次报道了在 Ia 型钻石中发现光学可见的多环内部放射晕。尽管由于钻石碳结构的密度更高， $\alpha$  粒子的穿透距离更短，难以将其与黑云母中观察到的放射晕进行精确的尺寸匹配，但这些放射晕环仍然被鉴定为由<sup>218</sup>Po、<sup>214</sup>Po、<sup>210</sup>Po 和<sup>222</sup>Ra 产生。此外，这些放射晕还出现在棒状结构上，以及钻石内部反复以直角弯曲的奇异空心管的末端。Wise<sup>118</sup>认为这些结构代表

流体通道，放射性同位素正是沿着这些通道被输送到钻石内部，从而形成这些放射晕。但 Armitage<sup>119</sup>和 Gentry<sup>120</sup>都认为这种解释站不住脚，因为钻石内部的晶体结构完整无缺。他们坚持认为，放射晕中环状结构的形成源于放射性同位素的短半衰期，这表明放射性同位素以及钻石本身都具有原始起源。然而，Vicenzi、Heaney、Snyder 和 Armstrong<sup>121</sup>报道了在中非共和国冲积沉积的多晶钻石（碳酸盐钻石）中发现了直径为 25 微米的放射晕。他们认为，这些放射晕是由于钻石形成后，一股流体脉冲渗入钻石内部，导致铀沉积而形成的。此外，尽管 JW Harris（私人通信，2007 年 5 月）声称，“几十年来，我观察过数百万颗钻石，只见过一次宝石内部有绿色光晕”，但南加州的珠宝商和宝石学家证实，他们经常在钻石和其他宝石中看到放射光晕包裹体（Armitage，与南加州珠宝商的私人通信，2007 年 4 月；2007 年 5 月）。

## 钻石检验

研究人员对来自南非金伯利、纳米比亚朱瓦宁和博茨瓦纳奥拉帕钻石矿以及纳米比亚和几内亚冲积钻石矿床的 69 颗小型钻石和钻石碎屑进行了放射晕检测。这些钻石由加利福尼亚州桑蒂市创造研究所的约翰·鲍

姆加德纳博士保管。本研究中检测的两颗带有放射晕的钻石由美国宝石学院（GIA）加利福尼亚州卡尔斯巴德实验室的约翰·科伊武拉博士和索尔·斯特罗姆博士借出。第一颗钻石是一颗 0.06 克拉的刻面钻石，产地不明。另一颗钻石被描述为一颗 0.11 克拉的钻石晶体（或形状奇特的晶体），产自巴西赫里亚斯的迪亚曼蒂纳矿。

使用配备多根光纤照明器的蔡司耶拿解剖显微镜和奥林巴斯单反胶片相机，以胶片方式拍摄了目标钻石。由于两个样本都经过碳涂层处理，以便进行扫描电子显微镜（SEM）观察，因此放射晕的照明较为困难，但本研究并未进行 SEM 观察。将拍摄的底片进行数字化扫描。

在几周的时间里，我们走访了南加州三个县的二十家珠宝店，并采访了店里的珠宝商和宝石学家。其中一半的店主表示，他们以前在钻石和其他宝石中见过类似的放射晕包裹体，但这二十家店里都没有可供检验的宝石。

## 结果

在所有非洲钻石中均未发现放射晕。然而，在这些钻石中发现了大量各种内含物（包括可能的锆石），并对奥拉帕钻石中的一些内含物进行了拍照（图 1）。

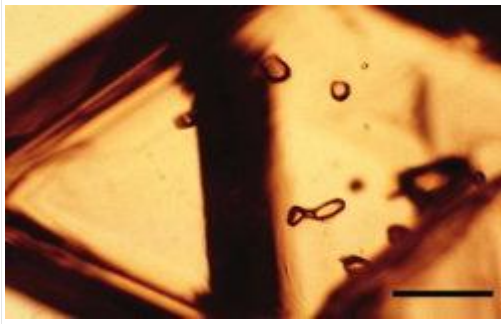


图 1. 非洲奥拉帕矿钻石中的微小内含物。放大倍数 250 倍。比例尺 = 300 微米。

在 GIA 钻石中发现了具有一环、三环和四环的放射晕。一颗产地不明的 0.06 克拉圆形明亮式切割钻石含有数十个放射晕和“蚀刻痕迹”（图 2-4）。该钻石附带相关文件。文件描述了“蚀刻痕迹”，这些痕迹与每个放射晕的放射中心相交，并以不同的角度急剧弯曲（见图 4）。这些“蚀刻痕迹”并未延伸至钻石表面。因此，GIA 工作人员将钻石腰棱磨掉，直至与蚀刻痕迹接触（见图 4-5 中磨掉的腰棱）。文件指出，这些内含物是实心的（可能是晶体？），并且“它们似乎具有六边形轮廓”。这些放射晕（包括三环和四环两种类型）的直径均使用校准过的目镜测微计测量，最大直径为 50 微米。

这颗来自巴西的钻石晶体（形状奇特的晶体）（图 7-8）含有数十个放射晕，但均为单环型。随附的资料显示：“这颗 0.11 克拉的钻石晶体产自巴西吉拉斯州迪亚曼蒂纳矿区。其中心带有‘核’的放射斑点来自某种未知物质。这些斑点最初呈绿色，当钻石加热至  $620^{\circ}$

C 时变为棕橙色。斑点颜色的首次变化出现在 590–600° C。”这些放射晕（均为单环型）的直径经校准目镜测微计测量为 30 微米。

## 讨论

这两颗钻石中放射性晕出现的关键因素是放射性晕的退火温度。在退火温度下，晶体结构中原子的振动增强到足以修复先前 $\alpha$  粒子轰击造成的点空位，从而使变暗现象（即放射性晕）消失。在黑云母中，放射性晕在 150° C 以上消失。<sup>122</sup> 该退火温度是利用从钻孔中采集的样品确定的，该钻孔中已测量了原位温度，因此可以解释为在自然条件下测定的。相比之下，Armitage 和 Back<sup>123</sup> 将含有放射性晕的黑云母薄片放入烘箱中，在高达 700° C 的温度下加热长达 5 小时。他们发现，在 250 – 550° C 的温度下加热仅 1 小时后，放射性晕就会消失。然而，目前尚不清楚钻石中的放射晕是否会在 150 – 250° C 下发生退火。据报道，巴西马克莱钻石在加热至 620° C 后，放射晕并未完全消失。这似乎表明，钻石中放射晕的退火温度高于 620° C。

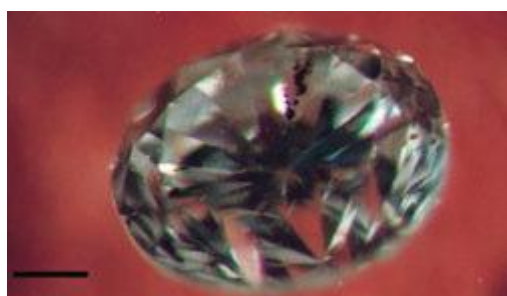


图 2. 圆形明亮式切割钻石。注意 12 点钟位置的放射晕。比例尺 = 0.3 毫米

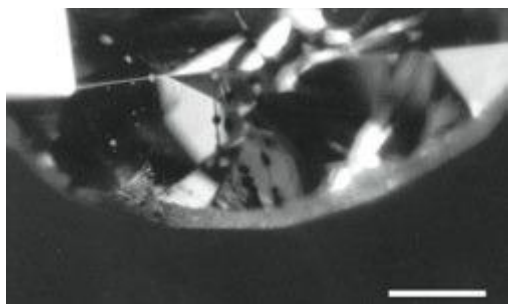


图 3. 圆形钻石中的放射晕。放大倍数  $80\times$ 。比例尺 = 450 微米。

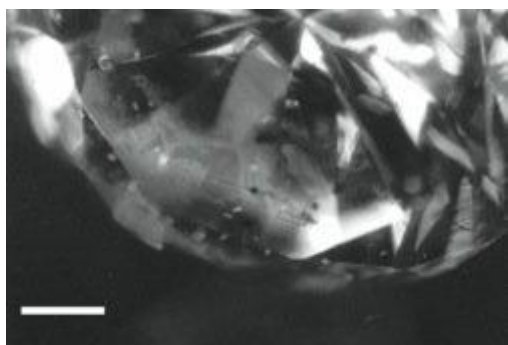


图 4. 圆形钻石中的放射晕。注意晶体管形成的直角和锐角。放大倍数 80 倍。比例尺 = 450 微米。

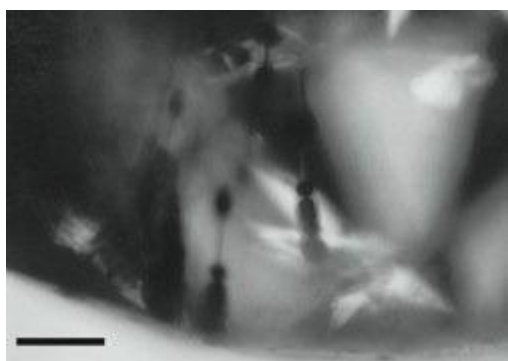


图 5. 圆形钻石中的放射晕。放大倍数  $100\times$ 。比例尺 = 160 微米。

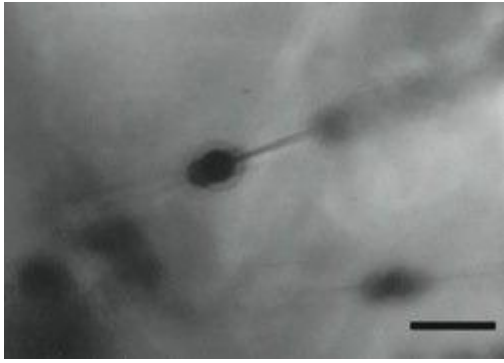


图 6. 圆形钻石中的放射晕。放大倍数  $200\times$ 。比例尺 = 75 微米。

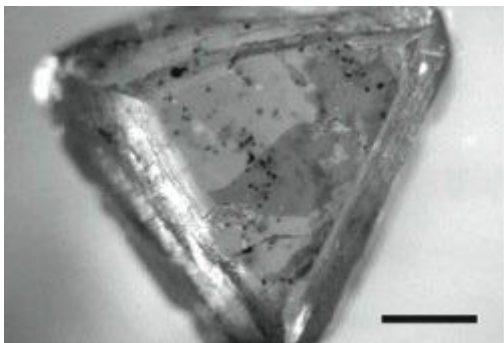


图 7. 巴西产马克莱钻石中的放射晕。放大倍数  $200\times$ 。比例尺 = 1 mm。

推测钻石形成于上地幔 150-300 公里深度处，该深度的温度为  $1100-2900^{\circ}\text{C}$ 。当然，任何放射性晕都只能在钻石形成后，于该温度下产生。如果钻石中放射性晕的退火温度高于  $620^{\circ}\text{C}$ ，则存在一个更大的温度窗口（相比黑云母中放射性晕的退火温度  $150^{\circ}\text{C}$ ），在这个范围内，岩浆和热液流体可以将  $^{238}\text{U}$  及其衰变产物输送到钻石内部。这假设  $^{238}\text{U}$ 、其衰变产物或包含它们的微小矿物晶体（例如锆石）在钻石形成时并未包含在其中。钻石中的锆石包裹体被认为是罕见的，但在钻石据称在被金伯利岩和钾镁煌斑岩岩浆输送到地球表面之前，在上地幔的温度下

存在了数亿年，因此在任何锆石包裹体周围形成放射晕的可能性都非常小。

相反，更有可能的情况是，铀<sup>-238</sup>及其衰变产物在钻石上升到地壳上层的过程中及之后渗入其中。然而，尽管金伯利岩和钾镁煌斑岩岩浆富含挥发性物质，尤其是二氧化碳，但它们含水量极低，因此喷发属于干火山喷发。鉴于水很可能是铀<sup>-238</sup>及其衰变产物的载体，携带铀<sup>-238</sup>及其衰变产物的水渗入钻石形成放射性晕的过程，必须发生在金伯利岩或钾镁煌斑岩侵入地表或近地表之后。事实上，尽管金伯利岩和钾镁煌斑岩岩浆被认为是干的，但它们在侵入时温度仍然很高（>1000° C），它们与周围侵入地层中的地下水相互作用会产生原位热液。

124 金伯利岩和钾镁煌斑岩中普遍存在的热液生成矿物（例如蛇纹石）证实了此类流体的生成。此类流体能够从侵入地层和凝固、快速冷却并发生爆炸性碎裂的侵入岩浆中清除、溶解并浓缩 <sup>238U</sup> 及其衰变产物。

下一个问题是岩浆流体和热液流体是否能够渗入钻石内部。Armitage<sup><sup> 125</sup></sup>和 Gentry<sup><sup> 126</sup></sup>都坚持认为，由于钻石内部晶体结构致密且未发生断裂，因此流体渗入是不可能的。然而，Vicenzi 等人<sup><sup>127</sup></sup> 认为，他们在冲积沉积的碳酸盐钻石中发现的放射晕是由于铀沉积造成的，而铀沉积是由一股流体脉冲在这些微晶

钻石形成后渗入造成的。钻石的晶体结构是立方晶系，尽管钻石断口呈贝壳状，但它们在四个方向上都存在解理（八面体解理），其中一个解理面是完美的立方解理。<sup>128</sup>正如 Armitage<sup>129</sup>记录的钻石中的放射晕一样，我们研究中的一颗钻石中的许多放射晕也集中在钻石内部的细长暗线附近。这些线条似乎沿着解理面的方向延伸（图 3-5）。其他放射晕则位于奇特的暗色管状结构的末端，这些管状结构呈直角弯曲（图 4）。Wise<sup>130</sup>将所有这些特征解释为流体输送放射性核素

<sup>238</sup>U 及其衰变产物的通道，这些放射性晕正是由放射性核素<sup>238</sup>U 及其

衰变产物形成的。Armitage 和 Back<sup>131</sup>的观测结果以及我们的研究均支持这一解释，即这些线性特征和扭曲管状结构上的暗色是由辐射染色造成的。此外，这些线性特征和扭曲管状结构的线性部分似乎沿着钻石内部完美的解理面延伸。这些解理面是钻石晶格的天然薄弱点，流体可能沿着这些薄弱点流动。



图 8. 马氏金刚石中的放射晕。放大倍数 90×。比例尺 = 0.5 mm。

这种解释引发了几个问题。首先，完整的钻石晶体结构，如果没有沿解理面清晰发育的断裂面，似乎无法为流体渗入提供畅通的通道。然而，这种担忧是基于对常温下钻石的观察。相比之下，在岩浆和热液可能渗入的 300 - 400° C 温度下，热量很可能会使钻石晶体结构膨胀，从而打开解理面，为这些流体提供必要的通道。但是，当解理面是二维表面时，这些由流体渗入形成的暗色线性特征和“管状结构”又是如何产生的呢？考虑到钻石晶体结构通常是紧密堆积的，如果其内部的解理面因热量和流体压力而打开，那么流体渗入最容易、最畅通的通道就位于解理面的线性交点处。由此可知，由于钻石基本上有五个解理面，它们之间的交线向多个方向延伸，这可以解释扭曲管状结构的形成。

也正是由于钻石紧密的晶体结构，这些管状结构中的一些才会呈直角扭曲。由于所有解理面的角度各不相同，似乎只有少数直角是可能的，但立方解理面被认为是完美的。

<sup>132</sup> Armitage <sup>133</sup>将这些奇特的扭曲管状结构描述为实心包裹体，而不是之前认为的空心结构。<sup>134</sup>研究发现，其中

一些扭曲管状结构延伸至钻石表面，<sup>135</sup> 并且并非所有管状结构都终止于放射晕。此外，在 Armitage<sup>136</sup> 钻石和我们研究中的切割钻石中，无论是中心带有放射晕的暗色线性管状结构，还是终止于放射晕的扭曲管状结构，通常都不会延伸到这些刻面宝石的表面。这似乎表明这些管状结构并非由流体渗入形成。然而，这些管状结构的特征及其所含的固体矿物包裹体表明，它们是由渗入流体沉淀形成的矿物包裹体。这些包裹体必须在金刚石晶体结构中停留足够长的时间，才能使溶解其中的矿物质沉淀析出。

因此，可以设想，随着金伯利岩筒的侵入，周围侵入地层中的原生水被冷却的金伯利岩加热，由此产生的热液渗入金伯利岩中仍然温暖的钻石，并携带从侵入地层中收集的铀<sup>-238</sup> 及其衰变产物。受热的钻石膨胀到足以促进流体沿解理面渗入；但由于钻石晶体结构紧密，流体在钻石内部遇到阻力（因为解理面无法进一步张开），因此流体转而利用其他解理方向交汇处的任何薄弱点。因此，当流体渗入到解理交汇处足够张开的地方时，一些线性流体通道会反复发生直角扭曲。当钻石表面开始冷却时，被流体渗入的解理面会首先在其表面收缩闭合，将流体锁定在这些解理面内，其中的元素和矿物随后沉淀出来。由于铀<sup>-238</sup> 及其衰变产物溶解在这些渗入的流体中， $\alpha$  射线径迹会沿着流体

流经的解理面路径留下。流体中的铀<sup>-238</sup>衰变产物显然会聚集在成核或沉淀中心，其中痕量原子（例如钻石中存在的氯）会与钋发生化学反应。这些沉淀的钋原子随后“形成”了现在观测到的放射性晕。这些放射性同位素的半衰期很短（钋<sup>-210</sup>为138天，钋<sup>-218</sup>为3.1分钟，钋<sup>-214</sup>为164微秒）。但孤立的<sup>214</sup>Po放射性晕可能是由于半衰期分别为27分钟的<sup>214</sup>Pb和20分钟的<sup>214</sup>Bi在渗入液中的滞留所致。类似地，孤立的<sup>210</sup>Po放射性晕可能是由于半衰期分别为22年的<sup>210</sup>Pb和5天的<sup>210</sup>Bi的滞留所致。对于观测到的钋放射性晕的密度比，尚需进一步研究才能给出令人满意的解释。

巴西马克莱钻石中的单环放射晕（很可能是钋<sup>-210</sup>放射晕）随机分布，有时看似成簇出现，且似乎并未沿着任何放射染色的线性特征分布（图7-8）。但这并不意味着钋<sup>-210</sup>不是通过流体沿解理面渗入而进入这颗钻石的。相反，这表明钋<sup>-210</sup>的迁移速度非常快，以至于没有足够的时间让放射染色沿着流体渗入的解理面形成。此外，这颗马克莱钻石奇特的形状还有另外两个含义。首先，由于其晶体结构可能较为紊乱，因此在形成后冷却收缩的速度会非常快；因此，形成这些钋<sup>-210</sup>放射晕的流体渗入速度也必须非常快。其次，其晶体结构的堆积方式意味着其解理面不够清晰，渗入流体更容

易分散在其晶格组成成分周围，而不是沿着解理面扩散。这与其<sup>210</sup>Po 放射性晕的分布模式相符。然而，由于这颗巨型钻石中仅存在<sup>210</sup>Po 放射性晕，渗入流体可能仅携带了从宿主金伯利岩和侵入地层中收集的<sup>210</sup>Po。我们研究的另一颗钻石的渗入流体必然携带了<sup>238</sup>U 衰变链中更高阶的放射性同位素，至少包括半衰期长达 1000 年的<sup>226</sup>Ra，后者易溶于大多数流体。

所有这些因素表明，产生钋放射性晕的流体渗入过程的时间限制在数小时或数周之内。这与含金金刚石金伯利岩筒在数小时内快速爆炸式喷发的证据相符。此外，一旦喷发，破碎凝固的金伯利岩浆在地表和近地表环境中也会迅速冷却（数天或数周内），而含有镭、氡和钋的受热大气降水会从围岩中被吸收，并迅速渗入金伯利岩，与任何岩浆和热液混合。自然环境中钋<sup>-210</sup>的快速热液输送已被记录在案。Hussain、Church、Luther 和 Moore <sup>138</sup>发现，<sup>210</sup>Po 在海底喷发的热液中的停留时间仅为几分钟，而热液系统中热液的停留时间不超过 30 天。此外，据估计，地热和中洋脊喷口系统中的热液会在数立方公里的岩层中循环数公里<sup>139, 140</sup>，并在 20-30 天内输送<sup>210</sup>Po。鉴于热金伯利岩筒的爆炸性喷发以及携带镭、氡和钋的热液迅速渗入其中，携带钋的热液必须迅速渗入热碎裂金伯利岩中的钻石，才能及时沉积钋，从而在整个系统

迅速冷却、钻石解理面“闭合”、热液循环停止之前产生钋放射晕。

## 结论

尽管现有数据表明钻石中放射性晕的消光温度可能高于  $620^{\circ}\text{C}$ ，但钻石形成的地幔环境温度高达  $1100 - 2900^{\circ}\text{C}$ ，对于放射性晕的形成而言过于严酷。此外，将钻石输送到上地壳的金伯利岩和钾镁煌斑岩岩浆温度极高，运输时间短，且缺乏水将放射性同位素输送到钻石内部，这些因素都不利于在钻石从地幔上升的过程中形成放射性晕。因此，本研究中检测的钻石中的放射性晕必定是在其所在的金伯利岩/钾镁煌斑岩筒侵位到地表或近地表之后形成的。

高温干燥的金伯利岩/钾镁煌斑岩岩浆侵入岩管会导致周围侵入（围岩）地层中的原生水受热。由此产生的热液会吸附并浓缩痕量的铀<sup>-238</sup>及其衰变产物，并通过对流将其输送到金伯利岩/钾镁煌斑岩岩管中。由于高温金刚石的膨胀，这些热液会沿着金刚石内部的解理面渗入其中。有时，由于金刚石紧密的晶体结构会遇到阻力，热液会利用其他解理方向，形成反复呈直角弯曲的流体通道。流体中放射性同位素的 $\alpha$ 衰变通常会在这些线性和弯曲的流体通道上留下暗色的辐射痕迹。金刚石外表面的收缩会封闭解理面的末端，从而将渗入的流体截留，最终沉淀出形成我们观测到的

岩管的矿物物质。在这些流体渗入的裂隙沿线（有时也包括裂隙末端）的成核中心， $^{238}\text{U}$  衰变产物的 <sup>沉淀</sup>，在化学条件适宜的情况下，形成了观测到的钋放射性晕。所有因素都表明，流体渗入过程的时间非常有限——通常在几小时到几周之间。

钻石中的放射晕可以用钋放射晕形成的热液流体输送模型来解释；但这并不能回答“钻石真的永恒吗？”这个问题。然而，正如先知以西结所预言的，在创世之初，受膏的基路伯在上帝的花园中被各种宝石覆盖（以西结书 28:13-14）。根据启示录 21:19，永恒之城的城墙根基也装饰着各种宝石。因此，钻石的确是永恒的！应该对更多的钻石进行放射晕的检测。

读完这篇文章，你心里是否有一些触动？有没有一些新的想法，或者值得你认真思考的问题？或许，你也开始重新思考自己的信仰和人生的方向。

如果你愿意，现在就可以向上帝祷告，打开心门，成为祂的儿女。祷告不需要华丽的言辞，只要一颗真诚的心。你可以这样祷告：

天父上帝，

今天我来到你面前，愿意立定心志，宣告我相信耶稣基督是我的救主，是我生命的主。我愿意离开过去那些不讨你喜悦的生活方式，求你赦免我的过犯。靠着

你的恩典，帮助我学习顺服你、爱人如己，活出你所赐的新生命。求圣灵每天引导我、扶持我，使我一生荣耀你的名。奉主耶稣基督的名祷告，阿们。

如果你已经做了这个祷告，愿你知道，你并不孤单。信仰的道路需要陪伴和成长。鼓励你在自己居住的地方，寻找一间合适的教会，与弟兄姐妹一同聚会、学习和成长。

如果你有任何疑问，或在信仰上需要帮助，欢迎随时写信与我们联系。我们愿意倾听，也愿意与你一同前行。