

## 世间万物的来源

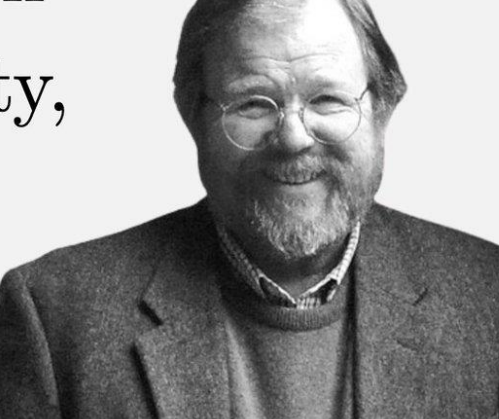
我很想将这期专栏的标题定为《世间万物的来源之谜》，但可能谈不上是个谜。物理学对世间万物的来源有相当清晰的认知——大概只剩下一点未解的悬念，这一讲我们会重点说说那个悬念。相信你了解之后更多的是赞叹，而不是疑惑。

简单说，世间万物都是由原子组成的。这个认知本身就非常了不起。这意味着，你别看万事万物形态各异，但其最底层的组成成分的结构是相似的，无非都是由质子、中子和电子构成。其中——

- 中子主要起到配合质子让原子核稳定的作用；
- 质子决定了这个原子是什么原子，或者说叫什么元素；
- 原子核外的电子数，则决定了这个原子的化学性质。

用科学作家比尔·布赖森 (Bill Bryson) 的话说：「质子决定了原子的身份，电子决定了它的个性。」[1]

an  
tity,

A black and white portrait of a middle-aged man with a full beard and glasses. He is wearing a dark sweater under a textured jacket. The background is plain white. To the left of the man, the words "an" and "tity," are visible, likely part of a larger text block.

I A																		VII A																	
1	<b>H</b> 氫 1.008																2	<b>He</b> 氦 4.0026																	
週期1																		Helium 4.0026																	
3	<b>Li</b> 鋰 6.94	4	<b>Be</b> 鈹 9.0122														5	<b>B</b> 硼 10.81	6	<b>C</b> 碳 12.011	7	<b>N</b> 氮 14.007	8	<b>O</b> 氧 15.999	9	<b>F</b> 氟 18.998	10	<b>Ne</b> 氖 20.18							
週期2																		Boron 10.81	Carbon 12.011	Nitrogen 14.007	Oxygen 15.999	Fluorine 18.998	Neon 20.18												
11	<b>Na</b> 鈉 22.99	12	<b>Mg</b> 鎂 24.305														13	<b>Al</b> 鋁 26.981	14	<b>Si</b> 矽 28.086	15	<b>P</b> 磷 30.974	16	<b>S</b> 硫 32.06	17	<b>Cl</b> 氯 35.45	18	<b>Ar</b> 氬 39.948							
週期3																		Sodium 22.99	Magnesium 24.305	Aluminum 26.981	Silicon 28.086	Phosphorus 30.974	Sulfur 32.06	Chlorine 35.45	Argon 39.948										
19	<b>K</b> 鉀 39.098	20	<b>Ca</b> 鈣 40.078	21	<b>Sc</b> 釷 44.956	22	<b>Ti</b> 鈦 47.867	23	<b>V</b> 釩 50.942	24	<b>Cr</b> 鉻 51.996	25	<b>Mn</b> 錳 54.938	26	<b>Fe</b> 鐵 55.845	27	<b>Co</b> 鈷 58.933	28	<b>Ni</b> 鎳 58.693	29	<b>Cu</b> 銅 63.546	30	<b>Zn</b> 鋅 65.38	31	<b>Ga</b> 鎵 69.723	32	<b>Ge</b> 矽 72.63	33	<b>As</b> 砷 74.922	34	<b>Se</b> 硒 78.971	35	<b>Br</b> 溴 79.904	36	<b>Kr</b> 氪 83.798
週期4																		Potassium 39.098	Calcium 40.078	Scandium 44.956	Titanium 47.867	Vanadium 50.942	Chromium 51.996	Manganese 54.938	Iron 55.845	Cobalt 58.933	Nickel 58.693	Copper 63.546	Zinc 65.38	Gallium 69.723	Germanium 72.63	Arsenic 74.922	Selenium 78.971	Bromine 79.904	Krypton 83.798
37	<b>Rb</b> 鉀 85.468	38	<b>Sr</b> 鈣 87.62	39	<b>Y</b> 釷 88.906	40	<b>Zr</b> 鈦 91.224	41	<b>Nb</b> 鈮 92.906	42	<b>Mo</b> 鉬 95.95	43	<b>Tc</b> 錳 [97]	44	<b>Ru</b> 鈷 101.07	45	<b>Rh</b> 銲 101.07	46	<b>Pd</b> 鈀 106.42	47	<b>Ag</b> 銀 107.87	48	<b>Cd</b> 鎘 112.41	49	<b>In</b> 銦 114.82	50	<b>Sn</b> 錫 118.71	51	<b>Sb</b> 銻 121.76	52	<b>Te</b> 碲 127.6	53	<b>I</b> 碘 126.9	54	<b>Xe</b> 氙 131.29
週期5																		Rubidium 85.468	Strontium 87.62	Yttrium 88.906	Zirconium 91.224	Niobium 92.906	Molybdenum 95.95	Technetium [97]	Ruthenium 101.07	Rhodium 101.07	Palladium 106.42	Silver 107.87	Cadmium 112.41	Indium 114.82	Tin 118.71	Antimony 121.76	Tellurium 127.6	Iodine 126.9	Xenon 131.29
週期6	55	<b>Sr</b> 鈣 132.91	56	<b>Ba</b> 鋇 137.33	57-71	<b>鐳系</b>	72	<b>Hf</b> 鈦 178.49	73	<b>Ta</b> 鉭 180.95	74	<b>W</b> 鎢 183.84	75	<b>Re</b> 鐳 186.21	76	<b>Os</b> 銱 190.23	77	<b>Ir</b> 銲 192.22	78	<b>Pt</b> 鉑 195.08	79	<b>Au</b> 金 196.966	80	<b>Hg</b> 汞 200.59	81	<b>Tl</b> 鉍 204.38	82	<b>Pb</b> 鉛 20							

第 92 号元素是「铀」，也就是核电站和核武器用的那个铀，这也是周期表上最后一个能在自然界找到的元素。92 号以后的元素叫做「超铀

元素」，因为原子核中质子和中子的数量太多，变得非常大，也就非常不稳定，如果有的话也是在核反应堆里人工合成的，而且一合成很快就会核裂变成更小的原子，所以不会在自然界中存在。而 118 号以后的元素，哪怕是你想人工合成，似乎也只在理论上可以存在。

一个你不一定知道，但是很了不起的事实是，元素周期表上 1-92 号所有的元素，我们都在地球上发现了 [\*]。

这意味着宇宙再大，也不会有一个遥远的星球上有一种我们得不到的神奇元素。换句话说就是宇宙没有卡我们的脖子。试想如果有一种关键元素地球上没有，而外星人能用这个元素制造武器，那我们岂不是很难受。所以我们既感到庆幸，也感到敬畏。地球什么都有。

**那么问题来了，所有这些元素都是从哪里来的呢？**

※

元素不是从地里长出来的。你把十根金条埋到后院，过多少年它们也不会再给你生一根出来。所有元素都来自宇宙中很遥远的地方。

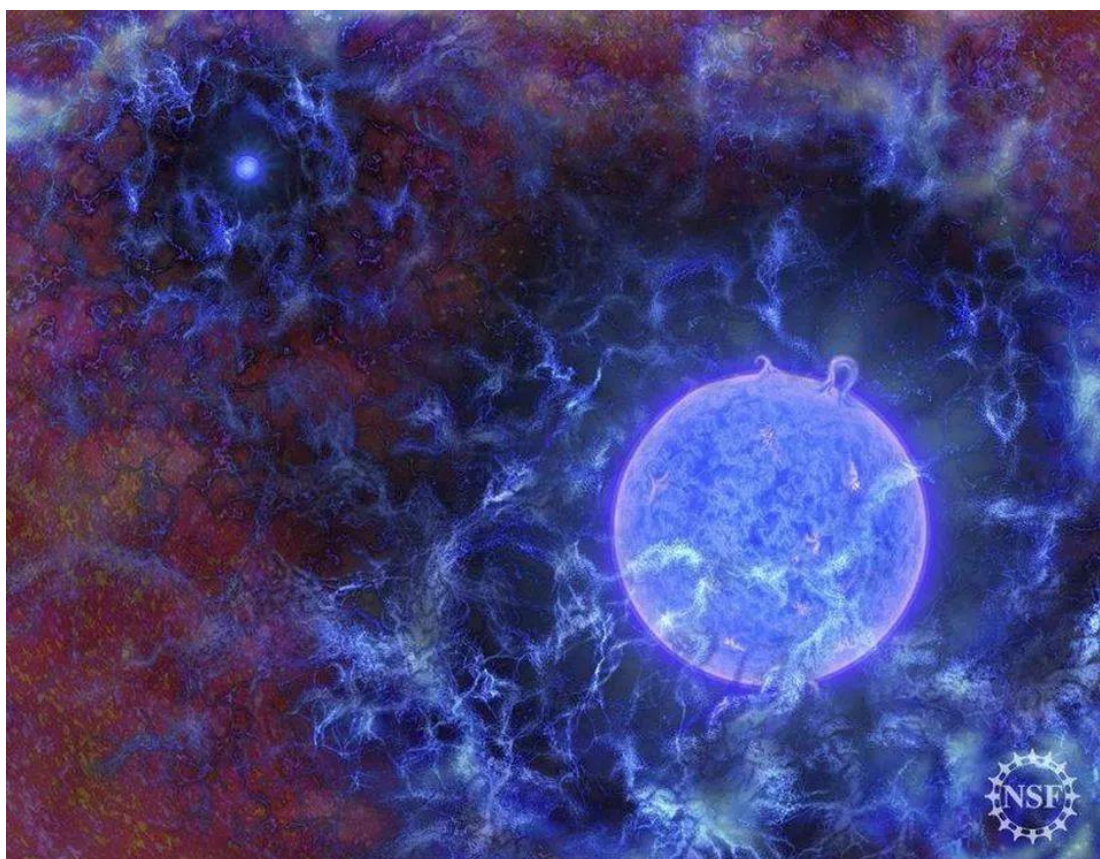
周期表上头两个元素，氢（有一个质子）和氦（两个质子），是宇宙大爆炸的遗迹。大爆炸起源的那一刻，极小的空间有一个极高能量密度的量子场，这个量子场的波动产生夸克和胶子这些最小的基本粒子。大爆炸开启后的百万分之一秒，宇宙已经膨胀到太阳系那么大，温度下降，

夸克们三个三个地聚集在一起，形成了质子和中子 —— 单个的质子，也就是氢原子核。

而此时的宇宙仍然是极高密度、极高温度的所在。大约三分钟后，温度进一步冷却，有些质子和中子结合在一起，形成氘 —— 氘也算是氢元素，是氢元素的一种同位素：它跟一般的氢原子的区别是多了一个中子。氘和氘再进一步发生核聚变，形成了有两个质子和两个中子的氦原子核。偶尔氘和氦还会发生核聚变，形成少量的锂原子核（它有 3 个质子）。大爆炸就只能给你这么多。我们今天绝大多数的锂元素，以及周期表上序号大于 3 的所有其他元素，都不是大爆炸产生的。

它们都来自恒星。如果这个世界没有恒星，它就只是一大堆氢、氦的尘埃。

好在那些尘埃会在引力作用下聚集在一起形成星云，星云又形成薄厚不均的结构。中间不知道要经过多少机缘巧合 —— 这里要求宇宙必须不是完全均匀的，某些地方的密度得稍微高一点点 —— 但是剪断截说，那些一开始就比较“重”的地方在引力作用下吸引周围的尘埃，变得更重，通过持续的正反馈，最终形成了恒星 [2]。



你可以简单地把恒星理解为一个烧氢的装置。无数氢原子核在引力作用下聚集在一起，在恒星内部的高温高压之下发生核聚变，释放能量，从而发光发热。

青壮年的恒星，比如我们这个太阳，基本上只是把氢变成氦。更重的元素要等到恒星进入晚年才能烧出来。

等到恒星内部的氢全部被烧成了氦，它就会膨胀得越来越大，外层的氢开始燃烧，恒星的体积扩大无数倍，终于变成红巨星。到某一时刻，内核的氦积累得如此之多，压力如此之大，以至于氦跟氦会发生核反应。那可能是一次快速的「氦闪」，也可能没那么快，但结局是内核的氦被烧成了碳和氧。

氦闪之后，红巨星外围的氢只剩下一片「行星状星云 (planetary nebula)」，未来会被星际间的风吹散。

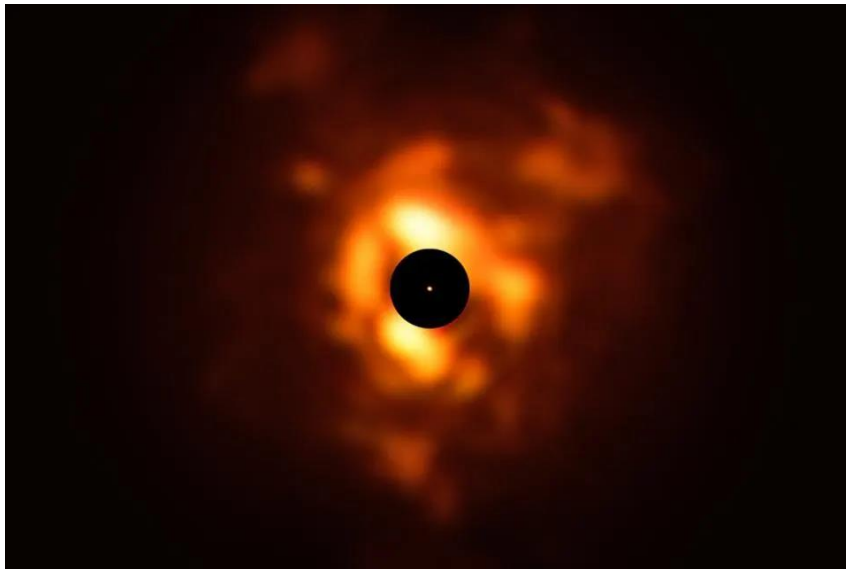




[行星状星云非常美丽，中间那个亮点就是恒星烧剩下的内核。]

像我们的太阳这样的恒星，因为质量太小，最终剩下的那个由碳和氧构成的内核就不会继续燃烧了。它会慢慢冷却，最终所有原子排列成晶体，就如同一颗巨大的钻石。这就是「白矮星」。它将孤零零地度过宇宙中余下的漫长岁月.....

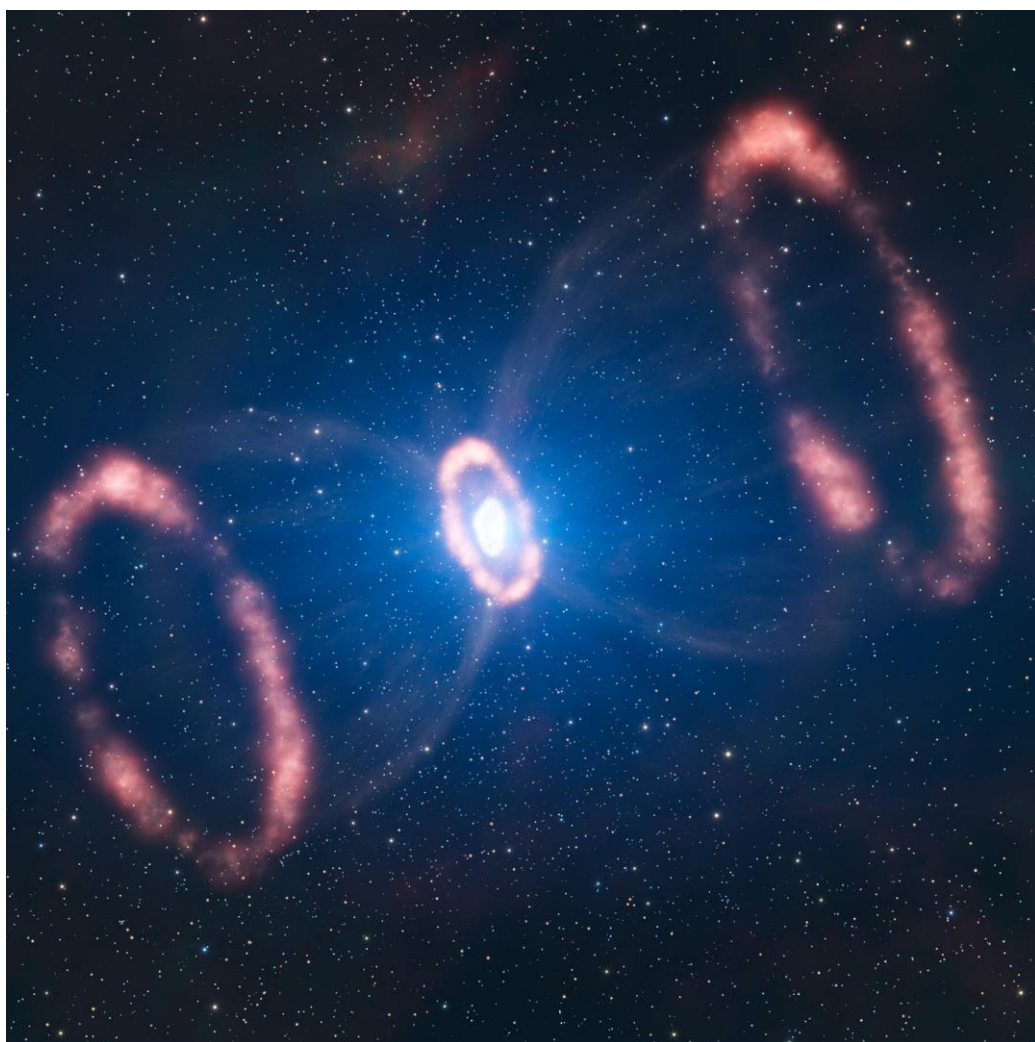
要制造比碳和氧更重的元素并且把它们扩散到其他地方，你需要一颗质量至少超过太阳 8 倍的恒星。这样的恒星经历了红巨星阶段之后，会继续演化，变成「红超巨星」。这时候核心的碳和氧会进一步发生核聚变，形成氦、镁、硅这样的元素，最终会形成铁（26 个质子）。



[一颗即将爆发的红超巨星]

红超巨星内部的铁元素积累到一定程度，极高的压力之下，核心就会坍缩，导致爆发，这就是超新星。





超新星爆发是宇宙中最耀眼的事件，能照亮整个星系。对观察者来说，因为离得太远，可能它要是不爆发你都不知道那里有颗星，你以为那是个新星 —— 其实那是恒星的死亡。

正是因为超新星的爆发导致了极高的温度和压力，铁元素才有机会跟自由的中子、电子、质子发生反应，形成镍和铜等更重的元素。也是因为超新星爆发，这些重元素才被抛洒到宇宙各处，那些尘埃又随机聚集在一起，变成行星，这才有了地球。

所以我们都应该感谢超新星。这真是一星落，万物生。

科学家原本以为这就是故事的全部。

✱

你可能听说过，体育界有个说法叫「GOAT」，意思是“史上最伟大球员 (Greatest of all time) ”。比如梅西就被视为 GOAT。



天文学界也有个说法，叫「BOAT」，意思是“史上最明亮事件 (Brightest of all time) ”。2022 年 10 月 9 日，天文学家观测到了一次 BOAT 级的伽马射线暴，那是一场超新星爆发 [3]。这是一次难得的机会，因为当前技术手段可以分析超新星爆发产生了什么元素。

结果发现，这次几乎没有产生任何重元素。

以前人们一直以为像黄金（79 个质子）这样的重元素是超新星爆发过程中产生的。但是你不会经常遇到超新星爆发事件，没有那么好的数据，

所以之前主要是推测。然而这次的观测却发现超新星爆发不能产生重元素，那重元素是从哪来的呢？

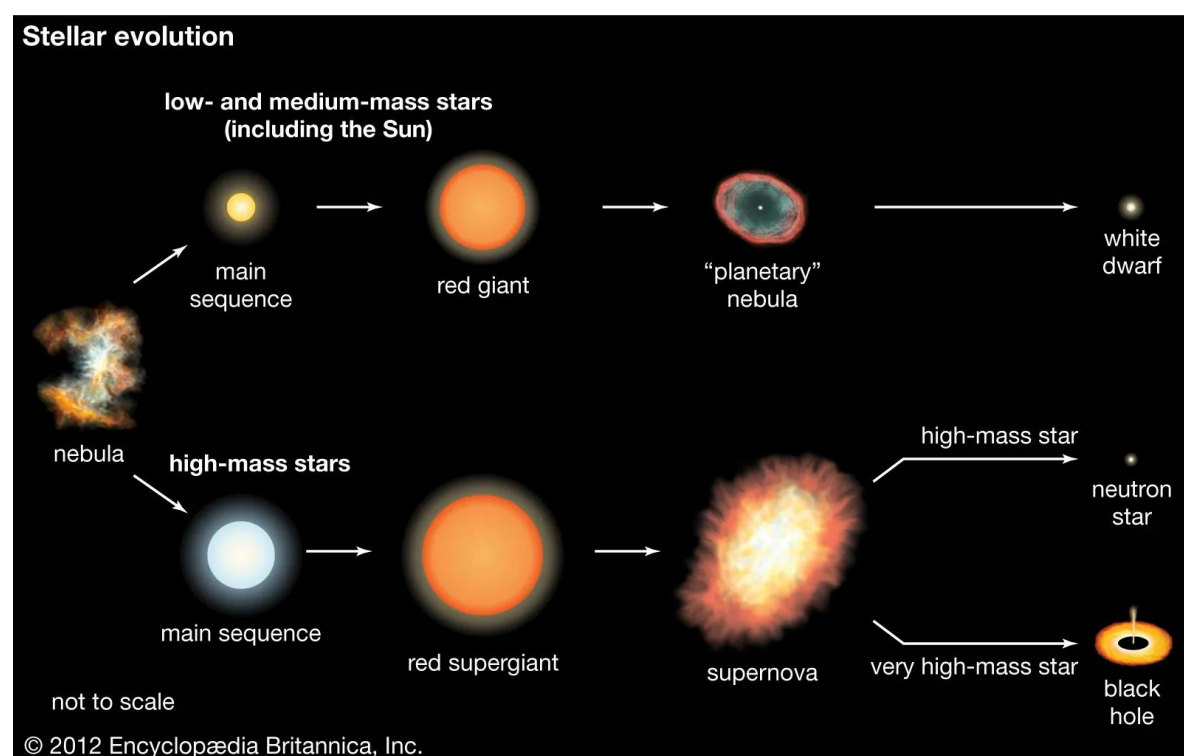
之前物理学家就知道另一种机制，但是那个机制似乎太难得了。

✱

我们前面说了，如果一颗恒星的质量不到太阳的 8 倍，它就会经历红巨星，最终变成白矮星。如果质量超过太阳 8 倍，它就会变成红超巨星，并且经历超新星爆发。而爆发之后，它又有两种可能的命运。

如果超新星爆发剩下的那个内核的质量超过太阳质量的 3.2 倍，这个内核将会成为一个黑洞；如果剩下内核的质量不足太阳的 3.2 倍，它将会成为一个中子星，主要成分就是中子。

所以任何恒星的大结局只有三种：白矮星、中子星或者黑洞。



白矮星、中子星和黑洞是恒星的尸体。它们默默地存在于宇宙之中，长期不变。黑洞咱们这里不管，咱单说中子星。

本来中子星的剧情已经落幕，但如果机缘巧合之下，一颗中子星附近又遇到另一颗中子星，它们就会在引力作用下互相吸引，一边旋转一边合并，引发剧烈的爆炸事件。

2017 年 8 月 17 日，科学家很幸运地探测到一次中子星合并事件。那正好是刚出炉的引力波探测器 LIGO 小试身手，当时赶上我们专栏第二季，我们还专门做了讲解 [4]。

我们当时没注意到的是，这次中子星合并产生了大量的重元素，其中就包括相当于 20 倍月球重量的黄金。就在那次发现的发布会上，LIGO 执行主任戴维·赖茨 (David Reitze) 还特意把他曾祖父传下来的金表带来了，说你看，这些黄金可能就是几十亿年前一次中子星合并生成的。



这很有道理。如果超新星指望不上，那么合理的推测是，周期表上所有铕（40 个质子）以上的元素，都是中子星合并产生的。这可不仅仅是金的问题，这意味着如果不是因为中子星合并，我们地球上就不会有像锡、碘、钨、汞、铅等等这些常用的元素！

但是这里有个问题。中子星合并事件应该是非常罕见的。从 2017 年到现在，我们已经观察到了超过 100 个引力波事件，这些事件通常都是黑洞和黑洞合并，或者黑洞和中子星合并——而中子星和中子星合并，除了 2017 年那次，到现在只有一次。而且那一次的烈度不够，没有产生任何重元素。

理论天体物理学家，同时也是科学作家，伊桑·西格尔 (Ethan Siegel)，认为 [5] 中子星合并不足以解释这么多重元素的来源。他推测了几种可能性，比如也许早期宇宙有更多的大烈度中子星合并事件，也许更大的



超新星事件能产生很多重元素，又或者有些红超巨星能在内部产生重元素.....但是这些猜测目前都不符合观测证据。



[Ethan Siegel]

✱

所以地球上如此之多重元素的来源，目前还是个悬念。

重元素不是在宇宙中均匀分布的，但的确是很多地方都有 [6]，地球在这一点上并不特殊。

但中子星合并的确是非常罕见的事件 —— 你想想，怎么就那么巧，一颗中子星能遇到另一颗中子星？你要知道宇宙中比太阳重的恒星本来就少，大约只占 10% [6]，其中正好能坍缩成中子星的就更少了。

对科学家来说，这种观测数据的「对不上」是大好事 —— 他们绝对不会说什么“物理学不存在了”然后纷纷自杀 —— 这里面蕴含着新科学发现的可能性！每一个对不上都是大机会。

对老百姓来说，想想家里的黄金不知道是从哪来的，也是一种趣味。



## 注释

[1] Bill Bryson, A Short History of Nearly Everything (Crown, 2003).

[\*] 其中第 43 号元素锝，因为具有放射性会衰变，自然界几乎没有，主要是人工合成的；除此之外都是地球上天然就有。

[2] 本文部分图片来自 Siegel, Ethan. “This Is Where the 10 Most Common Elements in the Universe Come From.” Forbes, May 25, 2020.

<https://www.forbes.com/sites/startswithabang/2020/05/25/this->

is-where-the-10-most-common-elements-in-the-universe-come-from/.

[3] Siegel, Ethan. "Gamma-ray Burst is the New B.O.A.T. — Brightest of All-Time." Big Think, March 29, 2023.

<https://bigthink.com/starts-with-a-bang/gamma-ray-burst-brightest-all-time/>.

[4] 精英日课第二季, 引力波事件到底牛在哪

[5] Siegel, Ethan. "Our Best Idea for the 'Origin of Gold' Doesn't Add Up." Big Think, May 8, 2024.

<https://bigthink.com/starts-with-a-bang/origin-gold/>.

[6] Stevenson, John. "Research Provides Insight into How Heavy Elements Such as Gold and Platinum Reach Our Galaxy."

Clemson News, December 8, 2022.

<https://news.clemson.edu/research-provides-insight-into-heavy-elements-such-as-gold-and-platinum-reach-our-galaxy/>.

[7] NASA. "Stars Basics" NASA Science.

<https://science.nasa.gov/universe/stars/>.

## 划重点

1.超新星爆发不能产生重元素, 中子星合并事件非常罕见, 最近的一次也没用产生重元素, 科学家推测的几种可能性, 目前都不符合观测证据。

地球上如此之多重元素的来源，目前还是个悬念。

2.这里面蕴含着新科学发现的可能性。