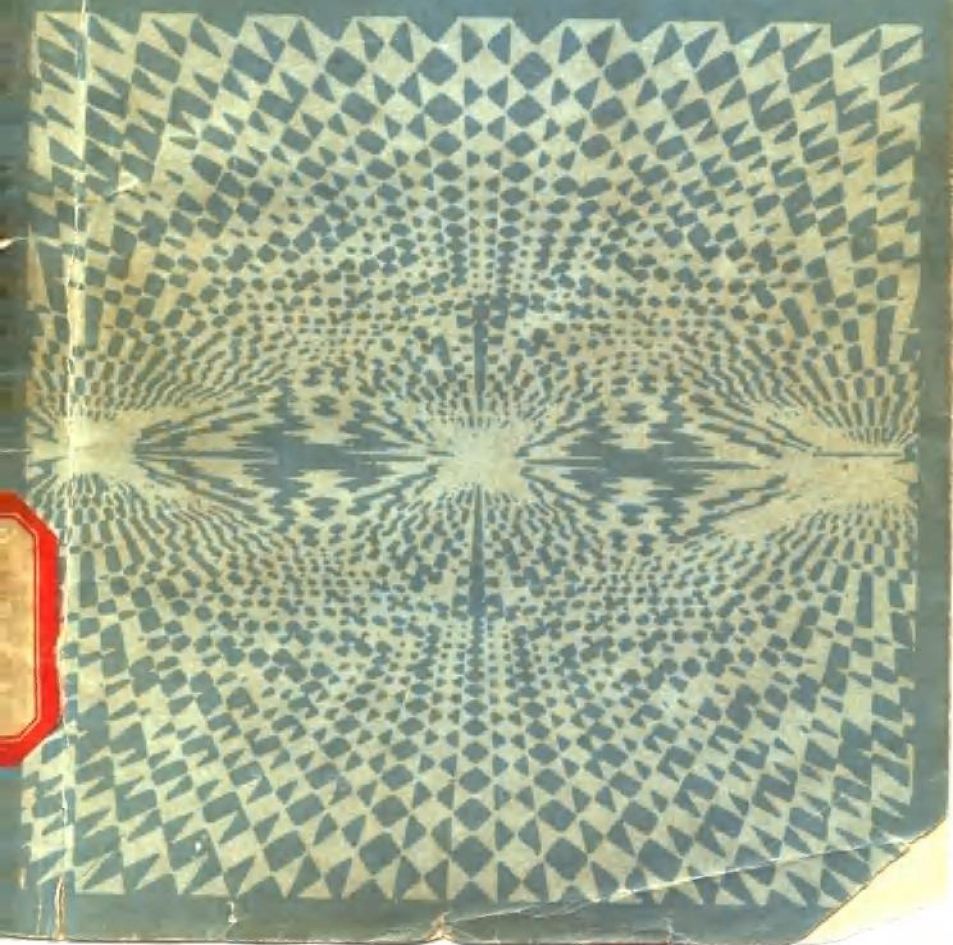


物理学和天体物理学中的 若干重要问题

(苏) B. Л. 金兹堡 著

科学出版社



物理学和天体物理学中的 若干重要问题

〔苏〕B. Л. 金兹堡 著

王贞松 王 苓 罗 崑 译

科学出版社

1987

内 容 简 介

本书是一本高级科普读物，旨在向刚刚参加物理学工作或对物理学研究现况不太了解的读者，介绍物理学和天体物理学近年来力图解决的一些重大问题。作者在讨论中，一般先介绍该问题过去所取得的成就和近期的研究状况，然后指出可能的发展前景，从而使读者对各个问题能得到比较全面的了解。

本书译者的分工如下：§1 到 §8——罗崑，§9 到 §14——王苓，其余部分——王贞松。

V. L. Ginzburg

KEY PROBLEMS OF PHYSICS AND ASTROPHYSICS

Mir Publishers, 1978

物理学和天体物理学中的 若干重要问题

〔苏〕B. Л. 金兹堡 著

王贞松 王 苓 罗 崑 译

责任编辑 吴伯泽

科学出版社出版

北京朝阳门内大街147号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1987年9月第一版 开本：787×1092 1/32

1987年9月第一次印刷 印张：4 3/8

印数：0001—5,200 字数：80,000

ISBN 7-03-000034-X/O·7

统一书号：13031·3895

定价：1.10 元

绪 论

当前,物理学和天体物理学涉及大量各式各样的问题。由于科学家们的努力即使不能揭示自然界的秘密,至少也能得到一些关于它的新知识,因此其中绝大多数问题是相当合理的。那种可以被恰如其分地说成不重要或没意思的问题是不存在的。这里需要说明,要想较为一致地定义科学中什么是“不重要的”或“没有意思的”,这几乎是不可能实现的。而事实上,有一系列问题。在一切科学(有时不仅仅是科学)活动中都得到反映。“特别重要的物理问题”往往由它们将要对技术和经济产生的潜在影响来确定。其原因常常是该问题具有特殊的魅力或特殊的根本实质,但有时也可能是出于赶时髦,或是由一些模糊因素或冒险因素的影响造成的(自然,我们将试图避免讨论后一种情况)。

制定“最重要的问题”的清单并且加以评论,这已不是第一次。为了做到这一点,总是要频繁地召开会议,或者建立各种专门的委员会,汇编许多洋洋大观的报告。我并不想以偏概全,但是可以说,我从来没有见过什么人很有兴趣地去阅读那些关于最重要问题的“备忘录”。专家们似乎并不真正需要它们,而它们又不能吸引更广泛的读者(当然,这些文件在为科学的发展作计划和投资时可能被证明是必要的)。

然而,初露头角的物理学家与天文学家(而且不仅仅是他们)不禁要提出一个简单的问题: 什么是物理学与天体物理学中的“热门”? 换句话说,目前物理学与天体物理学中,什么问题看起来最为重要和最有意思? 本书正是假定有足够多的读者对这个问题感兴趣而试着给出答案。所以这本书并不是什么委员会审议的产物,甚至也不是某些作者经常说的那种特别的调查研究的结果。它仅仅代表作者个人的观点。而这至少使它有可能避免那种多少有些官方文件味道的枯燥干巴的风格。

下面列出的是我目前认为最有意思和最重要的问题。我并不打算严格地为重要性和趣味性这样的概念下定义,也不打算使选择标准具体化。任何人都有权保留自己的观点,他不应该因自己的观点与他人不一致感到压力而去迎合他人,除非别人宣称其观点是得到公认或高人一等的。作者根本不打算这样做,也不谈任何组织性的建议。为了强调这种个人的探讨,我甚至打算使用第一人称代词,尽管这在科学出版物中通常是要避免的。

把各种人所编制的“物理学和天体物理学中最重要的问题”清单作一比较是很有趣的,也可能很有用。遗憾的是,据我所知,还没有进行过这类科学想法的民意测验。所以我只能说,如果下面那个困难的条件得到满足,大多数这样的清单会有很多相同之处。这个条件就是: 在定义一个特定的物理问题时(比方说,从其范围,趋势或物理研究对象上),大家的观点能够达到一致。如果不深入定义的细节,我将仅仅指出,

我所谈的问题是指那些其答案的特点和内容基本上都还不清楚的问题。我们将不涉及技术发展、测量规划等问题,但要涉及创造一些具有异常特性的新材料(例如,高温超导体)的可能性;建立理论(例如,广义相对论)应用极限的可能性,或是阐明一些尚未被人了解的问题(譬如说, K 介子衰变过程中复合宇称不守恒的原因或机制)。这正是为什么我们在本书中不谈量子电子学(包括激光应用的大部分)、半导体物理中的许多问题(包括器件和线路的微型化)、非线性光学和全息照相以及现代光学发展中的其他有趣方向、计算机技术问题(包括研制新型计算机问题)和其他许多问题。上述问题无疑非常重要,它们会产生大量不仅是技术的、而且也是物理的影响。然而它们目前并不包含任何根本的“物理问题”,或者说,有关其物理原理已不存在根本的“不确定性”。例如,在研制出第一个激光器之前存在过这样的不确定性,尽管后来用于激光器设计的原理是清楚的。提高激光器或其他任何器件的功率或改变其他参数也许是一个必要的、艰苦的和值得赞赏的任务,但这在性质上显然与根据新的原理研制新的器件或装置有所不同。同时,这个例子对于说明划分物理学中的基本问题和技术问题的界线的任意性来说也十分典型。例如,将激光器的功率提高好几个数量级的问题(这个问题目前很重要)不能被算做纯技术的或某种“非根本性”的任务。研制X射线激光器和伽玛-伦琴激光器(X射线与 γ 射线的激光器类似物)也是这样。X射线和 γ 射线激光器不仅仅远没有建成,而且还没有足够清楚的概念去研制它们。于是根据

• ▼ •

我们的选择原则,它们就成了典型的“重要而有趣的问题”。一个意义重大的突破几乎总是构成一个问题,这几乎在任何领域里都是相同的。但是并不是所有这样的问题都已经足够成熟,也不是所有的“奖赏”都能充分吸引人们去努力,因此,事实上存在着一系列的问题。

前面曾提出,若进行一次“科学想法的民意测验”,对于现代“特别重要和有趣问题”的选择将会在很大程度上得到一致看法。然而相当大的分歧也是不可避免的,特别是在资源分配的优先权方面以及考虑集中力量解决各种问题的時候。这一点在参考文献[1—5]中尤其清楚。然而财力和优先权的问题与纯科学问题以外的一些因素有关。例如,建造庞大加速器无疑有着巨大的科学意义,而其争论的焦点是其相应的支出所产生的结果是否能证明削减其它方面的研究经费是合算的。我们将把这点放在一边,而仅仅考虑科学问题本身。但是,即便在这种“简化”和限制下,各人的意见仍会有尖锐的分歧。例如,以下是本书所列的固体物理中最重要的问题:高温超导、金属氢以及其他具有异常性质物质的研制、半导体中的金属激子液体、表面效应和临界现象理论(特别是二级相变理论)。然而一篇题为“固体物理中尚未解决的最根本问题”的文章^[1]却声称,关于结晶过程中晶体形成热的经验公式的解释也属于这类问题。我花了一番努力才找到了这个问题的一些意义,但我完全不明白为什么这个问题是“最根本的”,而且对此抱有极大的怀疑。结论是什么呢?似乎只有一条:不可能也没有必要提出一个关于最根本问题的绝对清单。但是却

很有必要去仔细地思索什么重要、什么不重要,并对此进行争论,大胆地提出并捍卫自己的见解(但不是硬凑),这是大有好处的。这也正是本书所想设法表达的精神。

因此,本书中很明显地带有主观的和矛盾的特征,并且我已对读者提出了警告(虽然这种警告当然很少会引起注意)。唯一剩下要注意的是,本书三个部分(宏观物理、微观物理和天体物理)的划分法也是很任意的。例如,超重核问题虽然可以看作是一个微观物理问题,但实际上我们却在宏观物理部分进行讨论。同样,我们在天体物理部分讨论广义相对论问题,而没有把它放在宏观物理部分,这样做的唯一的原因是广义相对论主要用在天文学中(这里不牵扯下述事实:天体物理同宏观物理的区别,与物理的微观、宏观划分是两类性质根本不同的区别)。最后,应该注意到,本书实际上忽略了生物物理,也没有谈其他与物理和天体物理有关的较不重要的研究领域,尽管已经证明,正是物理学与生物学的合作和物理方法和概念在生物学中的应用,对生物学的发展是富有成效、十分重要的,并且对医学、农业科学等的发展也有潜在影响。物理学家若以为某些“偏于生物学的”问题不是“物理学的”问题而加以回避,那就大错特错了(这已在[2]中使人信服地论证了)。更有甚者,可以想象到,与生物学的合作和解决一些生物学问题的尝试,也将会促进物理学的发展,正如物理学曾经是、现在也仍然是鼓舞许多数学家的新思想的源泉一样。因此,虽然本书没有给物理学与生物学的结合以适当的注意,但这绝不是因为我低估其重要性,而首先是由于我关于生物物

理和生物学的一般知识不够,其次,也由于本书的篇幅有必要加以限制。

目 录

绪论.....	iii
1. 宏观物理	1
§1. 受控热核聚变反应	1
§2. 高温超导电性	5
§3. 新物质(生产金属氢和一些其他物质)	9
§4. 半导体中的金属激子(电子-空穴)液体.....	12
§5. 二级相变(临界现象)	15
§6. 超强磁场中的物质	20
§7. X射线激光器、伽玛-伦琴激光器和超高功率 激光器	23
§8. 甚大分子、液晶和一些表面现象的研究.....	26
§9. 超重元素(远铀后元素)	29
2. 微观物理	32
§10. 什么是微观物理?	32
§11. 质谱(第三谱学).....	36
§12. 基本长度(量子化空间等).....	42
§13. 高能和超高能粒子的相互作用.....	44
§14. 弱相互作用—— CP 不变性的违反	47
§15. 有超强电磁场时真空中的非线性现象.....	51

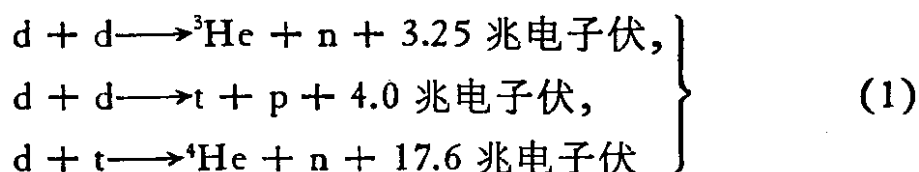
§16. 微观物理的昨天、今天和明天·····	53
3. 天体物理 ·····	62
§17. 广义相对论的实验证明·····	62
§18. 引力波·····	64
§19. 宇宙学问题。 广义相对论和宇宙学中的 奇点·····	67
§20. 天文学中需要“新物理学”吗？ 类星体和星 系核·····	71
§21. 中子星和脉冲星。“黑洞”物理学·····	76
§22. 宇宙线和宇宙 γ 射线、X 射线辐射的起源··	86
§23. 中微子天文学·····	96
§24. 天文学发展的现状·····	98
结束语 ·····	102
补遗 ·····	107
参考文献 ·····	118

• 目 •

1. 宏观物理

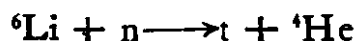
§ 1. 受控热核聚变反应

受控热核聚变问题的解决预示着核聚变反应在电力生产中的应用。与聚变有关的基本反应如下：



(这里 d 和 t 分别为氘核和氚核, p 是质子, n 是中子)。

还有一些其他的反应可能也很重要,特别是反应



在这个反应中使用了中子,同时重新产生了氚。

核聚变的能量将以某种方式被利用,这似乎是毫无疑问的。只需提一下利用地下爆炸的“明显”的可能性,就可以理解这一点。另一方面,尽管 20 年来受控热核反应一直吸引着人们极大的注意力,但未来热核反应堆的轮廓却还远远没有搞清楚^[6,7]。

一个热核反应堆所应满足的最基本的、同时也是最重要的条件是 $n\tau > A$ 。这里 n 是等离子体*中电子和原子核的浓

* 当然,在反应堆运行所要求的高温 ($T \geq 10^8 \text{K}$) 下,等离子体完全电离,因此在准中性条件下,电子浓度与氢同位素(氘和氚)原子核的浓度是相等的。

度, τ 是机器中等离子体的约束时间或寿命(例如, τ 可看做是等离子体能量减少到 50% 以下的时间)。至于常数 A , 它表征核燃料的特性。纯氘的 $A \approx 10^{16}$ 厘米⁻³·秒, 含有等量氘和氚的混合物是最优异的核燃料, 它的 $A \approx 10^{14}$ 厘米⁻³·秒。因此, 为使反应堆完成其功能(它所产生的能量应比在等离子体中建立和维持高温所需要的能量大得多), 应满足下列方程式:

$$n\tau > 10^{14} \text{ 厘米}^{-3} \cdot \text{秒} \quad (2)$$

从物理学角度说, 这一条件已经够清楚了。它表明反应过程越长, “燃烧”反应可能就越缓和(其速度与 n^2 成正比)。

对于等离子体反应堆来说, 等离子体的磁约束看来可能是最简单的特性。由于托卡马克具有环形磁阱, 它似乎是目前这类反应堆中最先进的(从某种程度上说也是最流行的)一种。在这样的系统中, 正如在任何其他的磁约束系统中一样, 等离子体浓度 n 不能过高, 否则磁“壁”将被热等离子体的高压所摧毁。现在在托卡马克运行过程中, n 可高达 3×10^{13} 厘米⁻³, 持续时间 $\tau \approx 0.1$ 秒。所以为满足条件 (2), $n\tau$ 之积至少应加大 30 倍。等离子体温度也应显著提高(氘-氚混合物仅在 $T \geq 10^8$ K 时才“燃烧”得足够迅速, 而在托卡马克中所能达到的离子最高温度仅 10^7 K^[7])。更重要的是要记住, 传到托卡马克器壁的热量相对来说仍很高。所以, 根据 [6b, 8], 若用现有水平的等离子体热绝缘方法和 $H = 10^5$ 奥斯特的磁场来建立一个含等量氘和氚的自持反应堆(即满足条件 (2)), 装有等离子体的环形室的短半径应为 $a = 1.4$ 米。但在这种

情况下,产生磁场的线圈半径要有 4.5 米之大。于是我们就不得不建立一个体积为几百立方米的巨大磁场。有理由认为,只要有一点点可能性,我们都应使用超导电磁铁(否则,抛开一切其他的考虑不谈,似乎也无望获得有利的能量平衡)。

尽管困难已如此巨大,但在实际系统中可能会被证明还要更大。这就促使人们寻找其他途径来解决问题。在这一领域中人们提出了大量的建议^[6-11]:应用“开放”型磁阱,在等离子体中进行短时间放电(“快速收缩效应”)或高频放电,用激光束^[9,10]或强大的电子束^[11]加热氘粒子或氘板,用加速带电粒子加热氘,等等。

最近,使用激光的可能性特别令人注意(“激光热核聚变”)。可以说,激光热核反应堆是与托卡马克型和其他类型的“慢”热核反应堆相反的。实际上,激光方法(顺便提一下,用电子束加热也同样)意味着要从各个方向加热原子核初始浓度 n 约为 5×10^{22} 厘米⁻³(这是大气压下固态氢原子核的浓度)的固态颗粒。因此,为满足条件(2),一个颗粒只需“作用” 2×10^{-9} 秒就足够了,而对于浓缩的材料来说,这一时间甚至还可以更短。但首先,激光脉冲能量在这种情况下应达 $10^4 - 10^5$ 焦耳 $= 10^{11} - 10^{12}$ 尔格之高,甚至可能还要更高。同时,现有的激光器所产生的持续时间为 $\tau \approx 10^{-9}$ 秒的脉冲的能量 E 仅为 10^3 焦耳(功率 $W = E/\tau \approx 10^{12}$ 瓦)。其二,必须选择(更重要的是产生)脉冲形状,从而使颗粒没有时间散开,反而将由于表面受热而辐射(蒸发)出物质的“反作用”而向内收缩。其三,现有能产生短周期脉冲的强激光器效率很

低——低于百分之一。要建成一个有用的反应堆(自然是所需要的唯一能解决电力问题的反应堆),激光器的效率看来必须提高到不低于 10—20%。如果所有这些问题都能解决,未来热核反应堆的轮廓便可描述成如下的样子:把由氘-氚混合物形成的固体或液体小颗粒(半径的数量级为 0.01—0.1 厘米)滴到或以某种方式送到几个环形室中的激光焦点。这些颗粒“燃烧”之时,将发射出能量为 14.1 兆电子伏的中子,可用来加热周围物质并重新产生氦(在反应 $d + t \rightarrow {}^4\text{He} + n$ 中释放出的其余 3.5 兆电子伏的能量转移给 ${}^4\text{He}$ 核;从原则上讲,这一能量也可以利用)。完全“燃烧”大小约为 1 毫米的颗粒,可释放出大约 3×10^8 焦耳的能量,这相当于大约 50 公斤梯恩梯炸药爆炸时所释放的能量。

在具有磁等离子体约束的热核反应堆和激光热核聚变系统或其他爆炸型系统(用电子束或其他手段对颗粒进行脉冲式加热)能够建立之前,还要克服巨大的困难;具体地说,现有装置(模型)的某些特性参数必须再增大几个数量级。不管怎样,现在与前不久不同,大家普遍都感到很乐观。似乎基本上有可能建成一个某种类型的热核反应堆。但究竟可能建成哪一种或哪几种类型的反应堆,什么时候实现,以及需要克服哪些困难——这些问题目前还一点也没有搞清楚。再者,其中所包含的困难实在太大了,以致不能把它们看作是纯粹的技术问题。因此,建立受控热核反应堆应列入最重要的物理学问题之列。同时,似乎需要在解决热核聚变的各种途径之间展开竞争(我们所指的是合理的,而不是敌意的竞争)。

受控热核聚变问题清楚地说明了一个更具有普遍意义的问题：实际上任何大型的物理学问题都不是与其他问题无关的，而是紧密地与整个物理学相联系的。因此，在解决某个问题时所做出的巨大努力可能孕育出具有更普遍意义的成果，它们可能激发大量的研究，引出新的方法和途径等等。例如，尽管早在五十年代初期，受控热核聚变问题出现之前，等离子体就引起了广泛的科学兴趣，但正是对聚变问题的研究才促进了等离子体物理中涉及气体等离子体、固体等离子体和宇宙等离子体的几个分支的发展，因此，这一研究工作的重要性是不管怎样强调也不会过头的。

§ 2. 高温超导电性

超导电现象发现于 1911 年。多年来这不仅一直是个无法解释的问题（也许是宏观物理中最令人困惑的现象），而且实际上也毫无用途。其所以找不到用途，主要是因为事实上迄今为止，超导电现象还只在低温状态下观察到。例如，第一个被发现的超导体汞的临界温度 T_c 是 4.1 K。一直到最近研究 Nb, Al 和 Ge 的某些合金时，才发现一个较高的数值 $T_c \approx 21$ K。1973 年有人发现 Nb_3Ge 的 $T_c = 23.2$ K（有一种大家比较熟悉的化合物 Nb_3Sn ，1954 年发现它是 $T_c = 18.1$ K 的超导体）。在 T_c 附近使用超导体变得异常困难（但温度当然要低于 T_c ，因为根据定义，在 $T > T_c$ 时，金属便不再具有超导电性了）。关于这一点，只要提一提在这一区域内临界磁

场 H_c 和临界电流 J_c (即能破坏超导电性的磁场和电流) 都很小(当 $T \rightarrow T_c$ 时, H_c 值和 J_c 值趋近于零), 就可以明白了。因此, 超导体只能在用液氮(沸点 $T_b = 4.2\text{ K}$) 冷却时才可使用, 因为液态氢(沸点 $T_b = 20.3\text{ K}$) 在 14 K 时已经凝固(一般来说, 使用固体做冷却剂既不方便, 又很难办到)。

在七十年代以前的 25 至 30 年中, 氮的产量很低(甚至到今天也不够用), 而且液化技术也不完善。那时世界上只有少数低容量的氮液化器在运转。使用超导体制造超导电磁铁(这是目前超导体的最重要的应用) 在不小程度上受到了当时可以得到的低 H_c 值和低 J_c 值材料的限制(对于 Hg 来说, 即使在 $T \rightarrow 0$ 时, 磁场仍为 $H_c \approx 400$ 奥斯特)。

然而到了七十年代, 事情已经发生了根本的变化。现在液态氮已经可以随时得到了。在做得较好的地方, 实验室和研究所甚至不安装液化器, 而是通过电话向专门的公司或工厂定购所需数量的液氮(氮用大型杜瓦车装运)。上述“磁场和电流的障碍”也已经克服, 现有的超导材料可以制成 H_c 高达几十万奥斯特的电磁铁(要破坏上述 $T_c \approx 21\text{ K}$ 的铌、铝、锆合金的超导电性, 需要有 $H_c \approx 400,000$ 奥斯特的磁场)。确实, 如今常用材料的磁场和电流的临界值都太低, 以致于不能形成 $300,000\text{—}400,000$ 奥斯特的磁场。但这看来似乎是一个纯技术问题。从原则上讲, 似乎没有什么因素能阻止在液氮温度*

* 具有高 H_c 和高 J_c 的超导体基本上是大规模研究和技术发展工作的结果。在这方面, 理论研究不起决定性作用, 特别是在形成高临界电流的问题上。相反, 有些其他方面的进展却是从理论研究的发展开始的。可见, 通向成功之路实质上会因为条件不同而各不相同。