叶夫根尼·P·韦利霍夫（1935—2024）

Günther Rüdiger，波茨坦莱布尼茨天体物理学研究所 m

莫斯科罗蒙诺索夫大学的硕士生E.P. Velikhov于1959年提出了磁旋不稳定性理论，该理论主导着当今的天体物理学。他的事业如流星般迅速发展，后来成为戈尔巴乔夫和叶利钦的科学、核能与裁军顾问。本文介绍了2000年代，Velikhov与来自波茨坦和德累斯顿-罗森多夫的PROMISE团队之间的合作，他们在实验室中对这一理论进行了实验检验。在西西里卡塔尼亚举行的一次磁流体动力学会议上，他向公众提出，可以在世界任何地方使用小型、可运输的俄罗斯核电站，直到目前正在研发的聚变装置最终解决能源问题。

1. 波茨坦（2004年）

我在柏林泰格尔机场的到达大厅等候从慕尼黑飞来的汉莎航空航班，手里举着事先约好的信号——一大瓶一升装的可口可乐，我以前总是把这种瓶子放在车里。一位精神矍铄、圆脑袋、年过65岁的乘客走上前来，用带着俄罗斯口音的英语自我介绍道：“韦利霍夫”。我问他从慕尼黑飞来的短途航程怎么样，他回答说自己“以前从没坐过经济舱”，而且机舱里人很多。我把这当作一种特别的幽默，接过他的包，我们便走向汽车——机场真够方便，车就在不到20米外。他的

不过，他这番话是认真的，大概是想暗示我根本不知道站在我面前的是谁。我从莫斯科收到消息，得知叶夫根尼·帕夫洛维奇·韦利霍夫正在慕尼黑的马克斯·普朗克研究所，于是联系了他，邀请他来波茨坦住几天。我给他寄去一张前往慕尼黑的普通二等舱机票，并在波茨坦-巴伯尔斯贝格预订了一间常住的三星级酒店客房。我以为眼前是一位境况窘迫的俄罗斯同事，他很高兴能受邀来到这个刚刚西化、热情好客的波茨坦。

45年前，我在莫斯科找到了一位学者。当时他还是一名研究生，提出了一套理论[1]，这套理论主导了当时的天文学研究长达十五年，而直到几个月前我打电话告诉他，他才意识到这一点。那个天体物理学问题是：类星体等最明亮的宇宙烛光，究竟从何获得它们以光的形式辐射出来的巨大能量？由此产生了这样一种观点：超大质量天体周围存在吸积盘；只要黏度足够大，吸积盘便能消除角动量，使大量物质向内流动。然而，要产生辐射所需的极高温度，黏度就必须大到似乎只能由湍流造成。难题在于，人们设想的吸积盘虽然具有开普勒旋转曲线，却绝不会发生湍流。在流体力学框架内，所有使它们失稳的尝试——包括我们自己的尝试——都失败了。1982年访问波茨坦期间，[2] 前核武器专家雅科夫·泽尔多维奇问道：“这些盘为何旋转稳定，却如此湍流？背后是非轴对称扰动还是声波在起作用？就在这座天文台里找出答案！”我从未忘记这个请求；他找对了地方，不过我们

[1] E.P. Velikhov：《实验与理论物理学杂志》36，1398（1959）。[2] 首席设计工程师安德烈·萨哈罗夫直到戈尔巴乔夫时期，在 Velikhov 的坚决干预下，才获准出国旅行。

当时大概还有别的事情要做。答案早已有人给出，藏在他一位莫斯科亲密同事的论文中，却被所有人遗忘，连作者本人也不例外。几年前，磁流体力学框架内已经提出过一个相当类似的问题[3]，，但由于采用了某种看似合理的近似，磁场总是起稳定作用，也就是说会抑制湍流，因此所得结果没那么有意思。假如泽尔多维奇曾把Velikhov的结果告诉我们这群毫不知情的波茨坦研究人员，许多事情或许会大不相同。此外，在如今对Velikhov那篇论文的数百条引用中，泽尔多维奇的名字一次也没有出现。

作为硕士生，Velikhov 在年长他仅 10 岁的斯坦尼斯拉夫·布拉金斯基指导下，解决了一个表述明确的问题：当理想流体在两个圆柱体之间旋转，且磁场沿旋转轴贯穿流体时，会发生什么？他发现，当外圆柱的转速低于内圆柱，且磁场不太强时，流动会变得湍流且不稳定。[4] 这篇论文很快被译成英文，却几乎没有受到关注，在最初 30 年里总共仅获 10 次引用；但如今引用次数已超过 600 次。Velikhov 的第一篇发表作品远远超过其他作品，成为他最成功的论文。一时兴起，我打电话到莫斯科，想告诉他这篇论文后来受到的关注，结果电话转到了接待处。不过，后来证明，这个消息还是传到了他那里。

在21世纪初，我们想在波茨坦弄清楚，为什么这种如今被称为磁旋不稳定性的现象

[3] S. 钱德拉塞卡：英国皇家学会会刊 A216, 293 (1953)。[4] 只要液体中没有电流流过，具有方位磁场的类似构型总是稳定的。

（MRI）在实验物理学中至今仍不为人所知。这个问题很快就有了答案。可用于磁流体力学实验的导电液态金属，如钠、镓或汞，在流体力学性质上与水相似，但其导电效率远低于等离子体；它们的磁普朗特数小于或等于 10^{-5}。对此类流动的理论计算，通常可在所谓的无感应近似下取得成功，即将普朗特数设为零。然而，维利霍夫不稳定性却是个例外，因为它并不能从简化的方程组中推导出来。正如我们后来发现的那样，对于有限但极小的磁普朗特数，流动确实会变得不稳定，但只有在圆柱体的旋转频率极高时才会如此。这就是为什么它此前一直未能通过实验发现，也解释了为什么我们同样无法设计出这样的实验。在这类首次研究中[5]，我们得出的液态钠导电材料所需雷诺数几乎达到100,000，根本无法实现；后来计算出的确切数值甚至还要高出十倍。由于对这个令人失望的结果心存疑虑，我将这篇论文搁置了将近一年，以观察进一步的发展。论文最终于2001年发表，与此同时，Hantao Ji及其普林斯顿团队的论文也在同一个月发表，并得出了类似结论。2003年初，我们与来自圣彼得堡的Dima Shalybkov一起，使用一套全新且改进的代码发表了最终计算结果；此前一年，这些结果已经在伊利诺伊州埃文斯顿的一次会议论文集中公布。若使用这种活性很强的液态钠作为导电流体，就必须让一个直径40厘米的双层壁圆柱体以20赫兹的频率无振动旋转，这在当时不幸是完全无法想象的。

[5] G. Rüdiger & Y. Zhang：《天文学与天体物理学》378，302（2001年）。



图1 叶夫根尼·P·韦利霍夫在波茨坦、迈克耳孙实验室、电报山

我打电话给格拉斯哥的 Rainer Hollerbach；我们曾合著过一部关于《磁性宇宙》的专著。他惊讶地发现，从数值上来说，我们如今讨论的“宇宙”竟然只有 40 厘米大小。“让它稍微复杂一点，让磁场或流动像托卡马克中的那样呈螺旋状，”他建议道。我讽刺地想，事情总能变得更复杂——这让我想起早年天文学家为了用理想圆形轨道描述行星轨道而引入的种种额外本轮，那是一种误入歧途的方法。在尝试其他方案无果后，我们把代码改为处理更复杂的磁性背景场，结果令人惊叹。年轻的 Velikhov

曾分别考虑过轴向磁场和方位角磁场，但我们实际上只是把两者结合起来，并处理固体壁面之间的真实流体；若没有计算机，这根本不可能做到。突然间，感应无关近似下也出现了解，只需原始旋转频率的 1% 就够了。另一个令人欣喜的好处是，不稳定性模式沿轴移动，因此很容易观测。数值结果甚至使我们得以用镓代替钠作为流体，这大大降低了开展实验的成本。磁旋转不稳定性的一个特点是，液态金属平均而言保持无电流状态；磁场不应施加任何力，它只需作为催化剂存在，而且本身不能衰减。为此，只需让电流通过内圆柱，便能在镓中产生环形真空磁场；它与轴向主磁场共同作用，就会形成所需的螺旋磁场。

在前往天文台的一小时车程中，Velikhov讲述了自己从罗蒙诺索夫大学到负有国家机密的库尔恰托夫研究所的经历，以及他此前曾到耶拿拜访Max Steenbeck，讨论建造一台磁流体动力学发电机——Max Steenbeck的别墅比他的研究所还大。他还讲述了苏联解体后，要在俄罗斯总理领导下将这座庞大、昔日高度保密的库尔恰托夫研究所转变为公共机构有多么困难。叶利钦在伏努科沃机场短暂的片刻中签署了这项影响深远的法令，甚至没有阅读内容。他告诉我，他当时在慕尼黑参与国际热核聚变实验堆[6] 项目，并抽出两天时间到波茨坦，了解自己昔日的工作后来怎么样了。他没有提到，正是他在恰当的时机把文件呈交给叶利钦，而且他本人是慕尼黑俄罗斯ITER代表团的团长，也是整个项目的推动力量

[6] 国际热核聚变实验堆 = 基于萨哈罗夫和塔姆的托卡马克原理。

。他没有提起这件事，但他说，他的两位祖父都曾在斯大林时代被捕并遭枪决，因为他们参与了非法组建政党的尝试，或试图拉拢他人参与此类尝试；如今，他甚至可以在国外谈论这些事。

照例向几位主任自我介绍一番后——他们对这位客人的姓名和住址并不怎么在意——Velikhov 希望参观失落的天体物理天文台中的迈克耳孙室。事实上，那里有一台仪器的复制品。年轻的迈克耳孙曾试图用它证明光速存在任何各向异性，却未能如愿；由于实验失败，他被柏林的资助者弃用。这台仪器非常灵敏，无法安装在柏林；只有天文台主楼东穹顶坚固的支柱，才能在电报山的沙地上支撑它运行。

Velikhov 的学术讨论会演讲题为《库尔恰托夫研究所的天体物理学》，内容是通常那种研究所所长的概述，不太可能留下长久的印象。我介绍他时，说他是当年磁旋不稳定性的年轻发明者；起初几乎无人注意到这一不稳定性，如今却已成为许多研究团队的工作重点。我还提到，他来自著名的库尔恰托夫研究所。或许我觉得，用太多头衔来介绍一个纯粹的天文学贡献者并不妥当。他开场便说，没错，他来自莫斯科的库尔恰托夫研究所，但他同时也是这个科学中心的主席——这大概是物理学家在俄罗斯担任过的最有权势的职位。就在这个地址，在“实验室2”的名义下，数千名员工在库尔恰托夫、萨哈罗夫和泽尔多维奇的领导下研制并改进了苏联核武器。如今，这座庞大军事工厂的继承者正站在德国天文学家面前，地点是

波茨坦天体物理研究所新建成的施瓦西尔德楼——几年前，这一幕还是难以想象的。

次日专门讨论物理学。我们的成果报告既包括我们对无法用轴向磁场实现标准磁旋不稳定性的失望，也包括我们确信能够借助螺旋磁场取得进展。Velikhov 的思路则不同：根本不必移动圆柱体。如果两者都固定放置，就会从外向内产生轴对称电流，该电流与轴向主磁场共同产生洛伦兹力，使液态金属快速旋转。然而，有人认为这种所谓的迪恩流存在一个缺点，因为刚性圆柱体不可避免地会形成一种从内侧向外增大、直至某一最大值的超旋转剖面，而这可能会严重干扰磁旋转不稳定性的形成。他问我们能否探究这一构型，我们回答：“是的，我们可以”。

Velikhov在泰格尔机场道别时说，他会在接下来的几周内，按照我们的计算建造他的新机器。他问我是否能答应前往莫斯科参加机器的调试？作为回报，我答应设法用我们的螺度概念，通过实验验证他早年的发现。两项实验中总会有一项成功，到时或许还能拿个奖。我真诚地说了声“Do swidania”（再见），与他道别；他转身再次走向安检时，我会意地挥了挥手。

2. 德累斯顿-罗森多夫（2005）

我此前在德累斯顿-罗斯恩多夫研究中心（Dresden-Rossendorf Research Centre）与 Gunter Gerbeth 和 Frank Stefani 有过几次会面；该中心也曾是核研究所。Velikhov来访后，我立即问他们，是否愿意为一种新型磁旋转不稳定性开发一项使用钠或镓的实验。他们当然愿意，但也指出这还得看资金情况。我们上次见面是在2004年3月初的卡塔尼亚，当时我们与 Robert Rosner 和 Alfio Bonanno 共同举办了首届“磁流体动力学库埃特流”会议。技术参数很快就确定了：外圆柱直径为16厘米，高40厘米。内圆柱内部要安装一根水冷铜棒，能够通过高达10千安的电流。为了计算两个同向旋转端盖的影响，我们需要在波茨坦招一名博士生，让他将一份源自英国、用于无感应流的代码重新设计，以满足我们的需要。总成本约为50万欧元。2005年夏，在里加举行的MHD会议上，我们公布了这台后来命名为PROMISE的机器的设计方案；只需让圆柱体以1赫兹的频率旋转，就能激发不稳定性。演讲结束后，来自普林斯顿的 E. Schart- man 告诉我，他们容器里的内圆柱一直都是实心的，因此很遗憾，无法像我们计划的那样让电流通过轴。



图2 德累斯顿-罗森多夫研究中心的PROMISE。从左至右：R. Rosner、Th. Gundrum、F. Stefani

莱布尼茨联合会推出了一项全新的科学项目竞赛，波茨坦天体物理研究所和德累斯顿-罗森多夫研究中心都属于该联合会，这项竞赛为项目提供了资金来源。80多家研究所每年都可提交一份提案，申请资助一项新颖且有风险的新项目，而所需资金额度必须相当可观。每年约有15份这类所谓的SAW申请获批。我们在里加商定的联合申请总额为400,000欧元，并于2005年11月24日收到科学部的电子邮件，获知申请已获批准。此前，我曾请芝加哥恩里科·费米研究所的Robert Rosner在一封写给研究所管理层的技术背景说明信中，推荐PROMISE[7] 作为AIP参加2005年竞赛的项目。后来，研究所负责人表示不赞成，我还收到这样的

[7] PROMISE= 波茨坦-罗森多夫磁不稳定性实验

建议：我们不如自己建造磁共振成像仪。对此我们只能耸耸肩，接受了这个建议；毕竟，我们的项目确实有可能挤掉了其他备选方案。

Rossendorf迅速制定了周密计划，快速完成建设，并立即开展实验——这里再合适不过了。PROMISE的首批成果早在2006年便发表于《物理评论快报》和《天体物理学杂志》等期刊[8]，部分原因是磁不稳定性的轴向波传播使实证验证容易得多。



图3 从左至右：R. Hollerbach、G. Rüdiger、G. Gerbeth

[8] Stefani、Gundrum、Gerbeth、Rüdiger、Schultz、Szklarski、Hollerbach：PhRvL 97，4502（2006年）；Rüdiger、Holler- bach、Stefani、Gundrum、Gerbeth、Rosner：Astrophys. J. 649，L145（2006年）。

3. 莫斯科（2005/2006年）

2005年2月2日，星期三，我收到一封正式邀请函，邀请我于当周六前往莫斯科库尔恰托夫研究所的宴会厅，参加维利霍夫教授70岁生日庆典。他的助理Andreev打电话告诉我，他的老板非常希望我能出席，也许还可以讲几句话；所有费用都会报销；我抵达柏林的俄罗斯大使馆后，当天就能拿到签证——我只需准备好400欧元，之后这笔钱也会报销。夜里，关于苏联机构的陈词滥调和过往经历不断困扰着我。万一没人到谢列梅捷沃机场接我，或者更糟，没人送我回来呢？万一酒店夜里不安全呢？万一库尔恰托夫收银处周末关门，或者无缘无故就关门呢？除此之外，周五仅有的机票都是我没听说过的航空公司的小型飞机，票价超过800欧元。第二天早上，票价已经超过1000欧元；我也不想坐俄罗斯航空——东德时期我曾多次饱受其苦。要是我第二天没有取消行程，这篇报道肯定会精彩得多。据说那场庆典堪称盛事，但我把首次拜访Velikhov的行程推迟了短短一周。

2月10日，我于下午抵达，一名司机举着一块很大的纸板牌来接我，然后开着一辆老式“伏尔加”汽车载我前往莫斯科。在希姆基，那里曾经是小镇的入口，如今看起来已位于城市中心，第二次世界大战期间曾显得颇具威慑力的坦克路障现在只成了装饰，旁边是一家巨大的宜家商场。我被送到一座气势恢宏的建筑前，那栋楼曾作为某个前苏维埃共和国的酒店或招待所，供应晚餐和俄罗斯式早餐，包括香肠和奶油。这家酒店

到了晚上有点令人毛骨悚然，因为据我所知，我似乎是唯一的客人。有人告诉我，第二天上午10点会来接我。

早上，我确实被准时从酒店接走，发动机已经发动着。我像国宾一样坐在后排右侧座位上，被开车穿过莫斯科，随后我们穿过一座气势恢宏且敞开的大门——行人也可双向通行——经过一间过大而空荡的警卫室，上面有一块醒目的大标牌，于是我来到了昔日绝密的库尔恰托夫原子能研究所，现称俄罗斯研究中心“库尔恰托夫”。Velikhov在罗蒙诺索夫大学之后，自1961年起一直在此连续工作，于1988年成为主任，并在戈尔巴乔夫和叶利钦时期担任该机构主席。未经任何检查便驾车穿过这扇神秘的大门，令人兴奋。在他的回忆录中，[9] 他详细讲述，每当出现危机，当局都会请他帮忙，因此1992年他同时成为库尔恰托夫研究所和RosShelf公司的主席，该公司负责开发俄罗斯北极地区的天然气和石油储量。

不知何故，我始终没见过 Velikhov 的办公室，也许是因为里面挂着一幅过大的俄罗斯现任总统画像。我是在一间会议室里见到他的，当时他的助手 A. F. 安德烈耶夫和一位被介绍为弗拉基米尔·P·拉欣的年轻科学家也在场。我向他祝贺70岁生日，并送上我们新出版的专著，[10] 其中新增了一章，探讨泰勒–库埃特流中的流体力学和磁流体力学不稳定性。他婉拒了，并吩咐安德烈耶夫支付书款和其他费用

[9] 叶夫根尼·P·维利霍夫：《来自切尔诺贝利的草莓》，www.createspace.com。

[10] G. Rüdiger 和 R. Hollerbach：《磁性宇宙》，威利出版社 2004年。

。安德烈耶夫从裤袋里掏出一沓50欧元纸币递给我；金额还算合理，但也仅此而已。一周前，我还担心研究所的收银处可能会关门，导致我无法拿到稿酬



图4 2004年阿奇特雷扎（卡塔尼亚）讲堂，左起：Lathrop、Bodo、Hollerbach、Stefani、Ferrari、Cattaneo、Dobler、Bonanno、Belvedere、Branden- burg、Lanza（未完整）。

按承诺报销差旅费用。事实上，俄罗斯已不再是苏联。

我的详细幻灯片演示只向五六位听众作了介绍，内容涵盖了当时泰勒-库埃特流领域正在讨论的各种不稳定性，包括磁不稳定性以及近期受到广泛研究的

流体动力学分层旋转不稳定性（SRI）。这种不稳定性发生在非均匀旋转下的密度分层流体中。我还简要介绍了PROMISE 背后的螺旋磁旋转不稳定性，但没有提及技术细节。讲座之后有人提出了两项请求，我都答应了。Andreev 希望将这篇演讲稿[11] 收录进一本文集，以纪念这位寿星；Velikhov 则建议让当时在场的 Lakhin 到波茨坦来熟悉相关科学。Vladimir 确实自费前来，并待了较长一段时间。我也撰写并提交了这篇献给 Velikhov 的文章，但此后再也没有听到有关那本文集计划的任何消息。

我演讲中的一张幻灯片提到了去年在卡塔尼亚以北举行的会议，Velikhov曾为会议论文集写了序言。[12] 我们曾亲自邀请他，但他没有前来。我详细介绍了Hollerbach关于容器端盖巨大影响的计算、Stefani对泰勒–迪恩流的讨论，以及来自马里兰的Lathrop和来自普林斯顿的Ji所作的贡献。这描绘了一场德美竞赛，预计不久便会有结果。Velikhov想必对此十分关注，因为他宣布将在次年于莫斯科举办一场研讨会，并让我致开幕词。他承诺，正式文件届时会及时送达。若卡塔尼亚再举办会议，他一定会出席，因为他对西西里怀有美好的回忆；在回忆录中，他称西西里是文明的摇篮，那里希腊神庙的数量甚至超过希腊本土。

晚上，拥挤的库尔恰托夫广场1号宴会厅里举行了鱼子酱宴会。我坐在主席团里，紧挨着Velikhov，并作了简短的开场致辞，

[11] G. Rüdiger：《泰勒–库埃特流：磁旋转不稳定性、剪切流不稳定性和 SRI》，天体物理数据系统，2005年，未发表（？）。[12] R. Rosner、G. Rüdiger 和 A. Bonanno：《磁流体动力学库埃特流：实验与模型》，美国物理研究所 733（2004年）。

解释说，我们之所以来到这里，是因为一篇几乎已被遗忘的硕士论文——它无意中包含着现代宇宙起源学的关键——而我们的科学竟如此奇妙。参加者中有许多兴高采烈的人，我始终没弄清他们是谁；但如果这是一次必须参加的活动，那么它无疑配备了所能想象的最上乘餐饮。

2006年10月，我确实收到了私人邀请，前往库尔恰托夫研究所的一场科学活动作报告，但没有得到有关议程和／或其他参与者的任何信息。我原以为终于会公布韦利霍夫本人的实验，也许还会展示实验结果，于是准备了一场报告，不仅介绍 PROMISE 的实验结果，也介绍新实验的计算结果。在他早期的论文中，Ve- likhov 不仅研究了轴向磁场，还考察了方位无电流场；在最简单的情况下，这种场始终表现为稳定。不过，我们发现，如果允许更复杂的非轴对称扰动，方位角磁场也会出现磁旋转不稳定性。后来在 Rossendorf 进行的一项实验，也证实了这种最初通过数值计算发现的“方位磁旋转不稳定性”（AMRI）的存在。

在和前一年一样昏暗的酒店里，我和丹·拉思罗普共进了早餐，但我们行业的其他活动人士都没有露面。事实上，被带到研究所的演讲厅后，我们才意识到，活动上只有我们是外国人。现场有许多年轻人，其中一些人兴致勃勃；除了 Andreev，还有其他教授，背景处有摄制组，也准备了饮料。简短致辞之后，有人便让我开始演讲。没有时间限制，我也不记得有印好的

日程安排，但我准备的“轴向与方位角MRI实验”[13] 内容足够讲将近一个小时。

Dan Lathrop随后介绍了他在马里兰大学开展的实验；他的报告比我的技术性更强。之后，一位年轻人走上前来，先是称赞并感谢在场的院士，因此我确信自己将听到有关莫斯科MRI实验的消息，但随后只有关于磁场不稳定性理论的简短理论贡献。在这些发言者中的第三位开始讲话时，他收到了Andreev的低声指示，此后各篇报告开头的个人赞誉便消失了。没有任何关于Velikhov实验的信息。以计划中的容器尺寸（内半径3厘米、外半径15厘米、高度6厘米）进行的理论前期工作[14] 已于2006年4月作为预印本提交。我曾在波茨坦使用我们的程序，在无盖条件下计算了这种具有静止壁面的流动的稳定性，发现由于固定内壁的干扰影响，磁场会使所涉较小普朗特数下的流动趋于稳定，即抑制磁旋转不稳定性。计算中缺失的盖代表了乐观情形；我认为它们的存在只会使情况更糟，并按约定把结果寄往莫斯科，但从未收到任何回复。

下午茶时间，我和丹乘车沿着积雪覆盖的小路前往 Velikhov 的私人住宅。那是一栋美丽而朴素的别墅，坐落在高层住宅区中央，车辆则停在一段恭敬的距离之外。房子曾

[13] Rüdiger、Schultz、Szklarski（波茨坦）、Hollerbach（利兹）、Gerbeth、Stefani、Gundrum（Rossendorf）、Shalybkov（圣彼得堡）。

[14] I.V. Khalzov、A.I. Smolyakov、V.I. Ilgisonis、E.P. Velikhov：《液态金属电驱动流动中的磁旋不稳定性：谱分析》，《流体物理学》18，124107（2006年）。

据说是由战俘建造的，如今显得庄严肃穆。主人穿着园艺服，带着他的狗迎接我们，我们随即被领进书房或图书馆，那里摆着几把椅子，围成一圈。一切都相当温馨，但我们始终不清楚这栋房子里是否还有更具代表性的房间。



图 5 E.P. Velikhov 和他的狗站在莫斯科家门口

Lathrop 和 Velikhov 谈得最多，主要谈测量技术，例如用于测量磁场的霍尔传感器和用于测量运动的超声波探测器；对此我无话可说。我试图把较新的实验，例如关于泰勒不稳定性的实验，引入谈话，却徒劳无功。最后话题还是回到了测量设备上，也可能当时正在商议相互合作的事宜。关于莫斯科的磁旋转不稳定性实验，当时有人说，技术

问题出在莫斯科郊外的设计办公室，而我寄给 Andreev 的计算结果是否已送到他上司手中，仍不得而知。Velikhov 评论道：在集体中，项目刚开始时往往人人赞成，但后来却遭到否决。茶和饼干端上来后，那位衣着优雅的女主人出现了，我们依次被介绍给她。

我还去了酒店附近的一家超市。那里的景象令人震惊，甚至让我应接不暇。长长的货架上塞满了来自世界各地的商品，大多包装成俄罗斯顾客喜爱的粉色和浅蓝色，与美国玩具店的色彩惊人地相似。这与苏联商店形成了鲜明对比：店里只有少得可怜的面包、盐、罐头食品和鱼，一名吞云吐雾的收银员坐镇柜台，头顶上挂着一块巨大的“禁止吸烟”标牌。



图 6 Evgeny Velikhov 和 Dan Lathrop 在韦利霍夫的书房

研究所的闭幕晚宴上，Velikhov再次被来自美国和德国的宾客簇拥，席间气氛十分雅致，不过有一半座位仍然空着。如今我们知道，库尔恰托夫研究所当年正面临重组。普京的朋友Kovalchuk出任主任、随后成为主席的时代，正是在那几周拉开序幕；新的优先事项或许导致磁流体动力学实验从计划中消失。与此同时，Ve- likhov与一位日本同事和一位法国同事刚刚获得了俄罗斯总统颁发的2006年全球能源奖。这项声望卓著、奖金丰厚的奖项旨在表彰他们“为国际热核聚变实验堆项目的科学技术基础所作的贡献”。直到多年后的2015年，Velikhov才卸任库尔恰托夫研究所名誉院长一职；该研究所后来更名为“国家研究中心”。晚餐时，他告诉我们，他曾在克里姆林宫推动将所有俄罗斯科学家的薪水提高一倍。后来我向来自伊尔库茨克的Leonid Kitchatinov求证，得知此事确实发生了。

4. 卡塔尼亚（2007年）

2007年10月初，卡塔尼亚天体物理天文台举办了第二届“用于地球物理学和天体物理学的磁流体力学实验室实验”研讨会。这次研讨会在市中心的教区博物馆举行，地点位于主教座堂广场，可沿埃特纳街眺望冒烟的埃特纳火山，并且紧邻卡塔尼亚大教堂。在欢迎致辞中，Alfio Bonanno 列举了自2004年卡塔尼亚会议以来开展的液态金属实验，并宣布新建成的库埃特流。研讨会旨在了解当前在实验室中研究磁不稳定性所面临的障碍。2004年在卡塔尼亚举行的会议上，讨论的问题



图7 Alfio Bonanno 开幕致辞：2007年卡塔尼亚会议

仍是理想的磁旋转不稳定性实验应是什么样子；唯一得到肯定的答案是，当纯轴向磁场被螺旋磁场取代时，磁旋转不稳定性发生所需的临界雷诺数会显著降低。已知的实验涵盖了范围广泛的应用，通常涉及差分旋转的稳定性、格勒诺布尔的DTS实验、卡达拉舍的VKS发电机实验，以及宣布将在莫斯科开展的实验。另一方面，里加、麦迪逊、马里兰和彼尔姆都在进行发电机效应实验，如今在那里甚至可以测量磁湍流扩散率。他提到彼得·弗里克最近的一项研究：在彼尔姆，人们测定了封闭环形通道内液态镓湍流流动的有效电导率。电导率相对于其欧姆值的最大偏差虽小，却确实存在。

所有仍在开展工作的实验室都派人参加了会议（科特布斯、洛斯阿拉莫斯、里昂、马里兰、默东、普林斯顿、里加、Rossendorf），贝尔谢巴、伯克利、芝加哥、利兹、波茨坦和斯德哥尔摩的理论学家也参加了。Velikhov兑现了自己的宣布，从巴西抵达卡塔尼亚。他以一场内容丰富、列出大量公式的报告拉开了会议中磁旋转不稳定性会议的序幕。报告还介绍了 Lakhin 的研究成果；他在波茨坦运用短波近似进行了全面计算。这场报告似乎缺乏个人色彩，准备也不充分，而且莫斯科实验再一次几乎没有被提及，甚至完全没有提到。



图 8　2007年卡塔尼亚，从左至右：Otmianowska-Mazur、Kitchatinov、Giesecke、Rogachevskii、Lathrop、Velikhov、Gailitis、Nataf、Szklarski、Leorat、Gellert、Kleeorin、Elstner、Hanasz、Cattaneo（不完整）

Stefani随后总结了PROMISE实验的设计、测量技术和结果。螺旋形磁旋不稳定性被观测为具有预测相位的行波

速度，使用超声波传感器，并在泰勒涡上进行了检验；当外圆柱静止时，在没有磁场的情况下总会出现泰勒涡。他介绍了两组具有不同电边界条件的实验，一组使用导电圆柱，一组使用绝缘圆柱。正如预期，螺旋不稳定性在高导电圆柱中更容易发展。在上下盖之间的中心出现了径向集中的流动，来自上方和下方的两个埃克曼涡在此相遇。绝缘内圆柱有助于抑制这一现象。在后来的设计（“PROMISE II”）中，铜容器的上盖按照我们的波兰博士生Jacek Szklarski从理论上确定的比例被切开，以进一步减弱埃克曼涡。



图9 从上方拍摄的 PROMISE容器，Stefani 的讲座（2007年）

来自普林斯顿等离子体物理实验室的Hantao Ji[15] 论述了最近提出的假说：即便纯粹的流体动力学不稳定性，也可能在吸积盘中造成所需的黏度值，从而使此处介绍的磁流体力学实验和模拟在天体物理学上的相关性降低。问题在于，在探测轴向磁旋转不稳定性所需的高旋转速度下，流体是否会在没有磁场的情况下也变为湍流。这一论点最初依据的是F. Wendt于1933年所做的测量，但这些测量在20世纪50年代末就已被批评为不充分。普林斯顿的研究人员利用其自身呈带分体端盖平盘形式的实验装置，获得了高雷诺数，由此带来的黏度增幅非常小，比磁旋转不稳定性理论所预期的低许多个数量级。[16] 他的结论是："对磁旋转不稳定性和发电机效应有利。"

在会议上发言之后，Velikhov手里仍然握着一张王牌，而且这张王牌可非同一般。报纸《La Sicilia》得知他在场，便联系了他，并于星期二刊登了几乎整整一版的专访，称他为"享誉世界的科学家、库尔恰托夫研究所主席、俄罗斯总统顾问以及莫斯科国家国防委员会成员"，并配上了核潜艇和核电站的图片。作为一个核大国的国防委员会成员——在场的磁流体动力学专家中，没人曾与这样一位举足轻重的人物同桌而坐——而我却因为担心收银台可能已经关门，错过了莫斯科生日派对的最后一刻邀请！

[15] 普林斯顿等离子体物理实验室。 [16] H. Ji等人：《自然》444（2006年），2013年在Egbers实验室的科特布斯勃兰登堡工业大学得到证实。



图 10：2007年卡塔尼亚，Hantao Ji 在演讲期间

我们现在知道，他的政治生涯始于戈尔巴乔夫时期。当时，身为一名野心勃勃的党委书记，他在1984年请求陪同戈尔巴乔夫前往伦敦会见撒切尔首相。据说，罗蒙诺索夫大学的两位昔日同学——她和戈尔巴乔夫——相处得很愉快；而戈尔巴乔夫很快便找到了未来的核能、国防与裁军顾问。此人兼具远见、外交手腕和专业知识，实属难得。Velikhov刚满50岁时，他的老朋友和／或新朋友次年成为国家元首，并不久后派他前往切尔诺贝利，考验他控制核灾难的能力。

“欧洲不会面临陷入寒冷与黑暗的危险；天然气供应是有保障的。”Velikhov首先这样回应了记者忧心忡忡的提问。“第二个切尔诺贝利?

不可能。现在已经有安全且可运输的小型核电站，即使在地球上最偏远的地区也能供应电力。核聚变？它将在10年内成为现实，尽管要到80年后才会成为地球的主要能源。但地球已经能源饥渴，需求每天都在增长，尤其是在印度和中国。因此，必须大规模建设核电站，以确保充足的电力生产。俄罗斯在这方面拥有丰富经验，曾建造了200多艘核潜艇。这项技术催生了一座原型发电厂，能够产生70兆瓦的电力，大小约如一艘船。俄罗斯只会出租这座反应堆，并对其实施严格控制。当然，我国也可以供应所需的燃料。在过去五年中，俄罗斯只发生过五起轻微事故，而且都与反应堆或其堆芯无关。”随后，Velikhov借此机会向意大利人，也许也向会议参与者介绍了自己毕生的工作：“就核聚变而言，[17] 已经有一个国家联盟正在努力在年底前拟定一份国际议定书。建造聚变反应堆的技术已经完备。这一项目涵盖整个欧盟，以及美国、中国、韩国和日本；它是一项规模宏大、影响深远的工程。再过几十年，我们就将实现普罗米修斯的伟大梦想。现实地说，还需要80年，核聚变才能成为地球上最重要的能源。在本世纪剩余的时间里，我们因此仍无法摆脱对天然气、石油、煤炭和核能的依赖。”事实上，Velikhov以俄罗斯代表的身份开启了新的职业生涯，于[18] 2006年11月在巴黎签署ITER协议时加入国际热核聚变实验堆理事会，该协议由总统雅克·希拉克主持。就在我们于卡塔尼亚会面几天后，这项巨型工程

[17] 自1973年（！）起，Velikhov 一直领导苏联的受控核聚变研究。[18] 自2009年起担任主席：Velikhov。

于2007年10月24日正式启动，工程建设随之开始。

.



图11 2007年会议照片，圣阿加塔大教堂，主教座堂广场，卡塔尼亚

5. 尾声

2010年代的某个时候，我收到一条来自莫斯科的消息，说 Velikhov 当时住在柏林，想在酒店里和我谈谈。多年来，我们一直通过互联网保持着松散的联系，我仍然很想知道，当年我的否定性计算究竟是否正确。但至少没有通过直接交谈发生任何类似的事。在他套房里一顿雅致的早餐期间，他邀请我前往库尔恰托夫研究所，就磁流体力学举办一系列讲座，因为这一领域在俄罗斯正受到忽视，无论是在天体物理学还是聚变研究方面。他开出了相当可观的报酬，却对住宿和工作条件避而不谈，

或许是出于安全原因。我同意了，而他也接受了我的建议，让 Rainer Hollerbach 参与这个项目，我们就此以盟友身份分别。后来，他没有再推进此事，我也没有。也许谈话过程中，这个计划显得过于雄心勃勃或太不方便；又或许我们这两位退休人员高估了自己继续实施宏大计划的能力。随后，新冠疫情时期到来，情况甚至变得更糟。2023年12月，Ji、Stefani 和我——2007年卡塔尼亚磁流体力学会议上 MRI会议四位参与者中的三位——在巴伯尔斯贝格天文台会面，交流近期的想法。Velikhov 曾说自己“既不信上帝，也不信马克思”，而在这段时间里，他又一次失去了联系。2025年间，传来了他在九十多岁时去世的消息；当时他在俄罗斯境外的一座土耳其核电站工作。



图12 Hantao Ji（普林斯顿）、Günther Rüdiger（波茨坦）和 Frank Stefani（德累斯顿-罗森多夫）于2023年12月在巴伯尔斯贝格天文台主楼的会议室内

6. 致谢

作者从 Alfio Bonanno、Hantao Ji 和 Frank Stefani 处获得了这一时期的资料，这些资料是他们在计算机上找到的。作者还要衷心感谢 La Sicilia 报社的档案管理员，感谢他们提供了 E.P. Velikhov 于2007年10月2日接受的采访。几乎所有照片均来自作者的档案。