**人类能否利用虫洞或曲相推进实现超光速宇宙航行**

黄志洵[[1]](#footnote-0)λ

（中国传媒大学信息工程学院 北京100024）

**摘要：**不久前，科学刊物《European Physics Journal C》报道了美国物理学家H.White领导的超光速宇宙航行研究，方法是使用1994年M.Alcubierre提出的曲相推进（warp drive）理论。据说已经由数值模拟建立了纳米级尺寸的曲速泡（warp bubble）。在中国，经由《科技日报》报道并采访理论物理学家后，引起了广泛的兴趣。本文作者对超光速问题曾研究多年，此文是一篇参加讨论的科学论文。

在超光速宇宙航行的可实现性这一问题上，许多物理学家绕开狭义相对论(SR)造成的困难，反复向广义相对论(GR)求助。本文认为不应当、也不需要这样做。因为SR对超光速运动的“禁令”是错误的，对其可以置之不理。……本文还认为，对同一个超光速宇宙航行的问题，理论物理学家与航空、航天专家(以及工程技术专家)的思考会不相同；对这一点，把本文的前半部分与后半部分对比，就可以清楚地看出：前一种人注重数学分析；后一种人认为数学分析是必须的，但应更重视研究物理实在(physical reality)。

虫洞或曲相推进都要求极度的时空弯曲和极大的负能量，不具有可实现性。因此本文提出当前仍应把注意力放在基础研究上。例如可以借鉴航空工程中突破声障(sonic barrier)实现超声速飞行的经验；也可以改造现有的高能粒子加速器以寻找超光速粒子等等。……关于负能量和特殊物质，我们认为最早由P. Driac提出的负能量概念，只是一种分析的手段或工具，实际上不一定存在。尽管如此，本文也提供了几种可能产生负能量的方法，以供探讨。最后，本文强调对超光速通信的研究是十分重要的。

**关键词：**超光速；狭义相对论；广义相对论；光障；负能量；时空一体化；时空弯曲

**1 引言**

飞出地球系统叫做航天(space flight)，飞出太阳系才叫宇航(astronautics)。宇宙实在是太大了——半人马座的比邻星距地球4.3ly，天狼星距地球8.8ly(ly是光年，1ly=9.5×1012km)；真空中光速=299792458m/s3×105km/s，按光速前进到那里也要好几年！Einstein[1]的1905年论文“论动体的电动力学”提出了狭义相对论(SR)，这个理论断言不可能有超光速运动。但是，Einstein[2]的1915年论文提出了广义相对论(GR)，一些物理学家认为，根据GR的时空弯曲理论，或许可以有超光速运动而又不违反SR。1988年，M.Morris和K.Thorne[3]在PRL杂志上发表论文，题为“虫洞、时间机器和弱能量条件”；论文说，虫洞(worm holes)可以解决星际旅行的困难，只要为时空(spacetime)构建非常大的曲率。可以设法建立星际旅行所需的虫洞并保持之；而且由虫洞甚至可创建时间机器(time machine)并对因果律造成冲击。2000年L.Ford等[4]在论文中说，如虫洞能存在，它将成为通往遥远地方的球状入口；它虽不违反现有物理定律，但它要求有大量的负能量。由于负能量的力是斥力，它可防止虫洞坍缩。而且，与空间弯曲起会聚透镜作用不同，负能量对光线起发散透镜作用，这对向虫洞的进入和从虫洞的输出是必须的。

相对论学者提出一种建基于GR而又不违反SR的超光速宇航方案——曲相推进(warp drive)。1994年M.Alcubierre[5]根据GR理论设想了一种实现超光速宇航的方法：由扭曲的时空建立一种“时空泡”（或称“曲速泡”)，飞船就在它的内部。如果同时使泡前方的时空收缩而后方的时空胀大，就可造成与目的地的距离缩短、与出发地的距离加大。这就相当于飞船在前进，而实际上它相对于邻近世界静止未动，当然也就不必顾虑SR理论的“光速上限”，亦即在使飞船以超光速前进时却不违反物理学的主流理论。但计算表明这要求负能量包围飞船。鉴于能量守恒定律不能违反，巨大的负能量要等量的巨大正能量相伴相生。没人知道怎样获得这些巨大能量，方案即使没有错误也是无法实现的科幻小说。因此除了在拍科幻电影时使用这一概念，在科学界一直无人重视。

虫洞和曲相推进是GR理论的产物，建基于时空一体化和弯曲时空的理念。虽然人人都知道SR断言“不可能有超光速运动”，但GR在实际上却否定了这一说法，表明相对论内部有不自洽性。但这些研究都断言“需要有能量为负的奇异物质”。

笔者本来是不接受时空一体化和弯曲时空的[6,7]；现在暂把个人观点放在一边讨论问题。我们注意到虽然许多物理学家拥护相对论，但却坚定地认为一定要争取在未来实现超光速宇宙航行，以便使人类能飞出太阳系（甚至银河系）进行探索，这与笔者的观点一致。美国的研究动向（例如K.Thorne对虫洞的坚持和H.White对曲相推进的坚持），使这个问题再次出现在广大公众面前。因此，笔者决定参加讨论，贡献自己的一些观点。

举例说，2012年秋季美国航天局(NASA)的科学家H.White在有关学术会议上说，可以通过改进曲速泡的形状来减低对能量的不实际的要求。他的意见以及NASA为此召开的会议都令人鼓舞。2022年初，《European Phys. Jour. C》杂志发表消息称，White率领团队做出了纳米级曲速泡[8]；人们的兴趣也大大增强了。

**2 虫洞与时空弯曲**

2014年，美国科幻影片《星际穿越》(Interstellar)在各国热映。故事设想在未来地球人类濒临灭绝，NASA设法使人们先离开地球飞往土星，然后再通过虫洞前往另一个银河系。由于费时极少而距离极大(5×106ly)，由土星轨道到达仙女座星系中心的旅行是以超光速完成的，该影片在加州理工学院(CIT)物理学家Kip Thorne(虫洞理论提出者之一)参与下完成。由于有虫洞这样的特殊时空隧道，把一端设在土星轨道，另一端设在仙女星系的中心，而一位男主角可以在片刻之间完成即便是光也要耗时超过500万年才能走完往返的星系穿越。这是影片中引人入胜的部分。

在GR诞生之初的1916年，L.Flamm[9]指出，如适当选择拓扑，Einstein引力场方程的Schwarzschild解描写了空的球形虫洞。这是最早的发现，当时距引力场方程发表才几个月。1935年Einstein和N.Rosen提出，虫洞实际上是发生了翘曲的变形空间，它可以把宇宙时空中两个不同的点连接起来。其结果便是一种可直可弯的隧道状结构。因此，虫洞是一条穿越时空的隧道，穿过它便能实现遥远地点之间几乎即时到达的旅行。20世纪50年代有J.Wheeler等、80年代有K.Thorne等继续研究。

又有人想象出一种“超空间”(superspace)，可把我们宇宙的弯曲空间和别的宇宙的弯曲空间画成嵌在高维超空间里的2D画面。超空间不过是想象出来的工具，但对说明虫洞有用。Thorne[10]想象虫洞是穿过超空间的，它可有2个洞口，例如1个在地球而另1个在织女星；两洞口通过超空间的隧道相联，或许长度只有1km。这样，从地球附近的口进去，可从26ly远的织女星附近的口出来。有一个著名的示意图——在把我们的宇宙想象为2D曲面而又强烈弯曲，沿曲面(它经过超空间)的距离是26ly，但连结两洞口的距离是1km，那个图似乎来自Wheeler论文，Wheeler的年轻助教M.Kruskal从引力场方程求解中发现了球状虫洞的演化过程——开始时没有虫洞，在地球和织女星附近各有一个奇点；然后二者可能在超空间中生长、相遇，再湮灭，而湮灭时生成虫洞。后来它会收缩、消失。虫洞从产生到消失的时间非常短。

Thorne[10]根据引力场方程作计算导致如下发现：①需要用某种奇异物质提供引力作用把洞壁撑开；②贯穿虫洞的奇异物质应有负能量密度；但这是指从穿过虫洞的光束看来如此，对虫洞参考系而言能量密度仍为正值。前已述及，Wheeler认为根据他的量子泡沫假设（即在任何时候虚粒子都十分怪异地不停出现并消失的理论)，虫洞有可能是自生自灭的。不幸的是，Wheeler的理论认为这些忽隐忽现的虫洞十分微小，仅达到Planck长度量级，即长度大约为10-33cm。换句话说，虫洞小得几乎是不可能测量的。为了使它们变大，必须要有奇异物质；因为奇异物质的负特性或许会把虫洞的周边向外推，使之变得足够大和足够稳定，以容纳人或宇宙飞船通过。

虫洞如要能穿行，起码要容许信号以光的形式通过。入口处光是会聚的，出口处是发散的。为了在虫洞中间某处使会聚光变成发散光，必须用负能量完成这种转换。而且，由于负能量的引力其实是斥力，就可以防止虫洞坍缩。……故一切均取决于产生负能量的可能性。1978年美国物理学家L.Ford提出了称为“量子不等性”(quantum inequality)的理论，说“容许的负能量的多少反比于其时间和空间尺度”，亦即越大的负能量存在的持续时间越短；反之，如负能量弱，则可持续较长时期。此外，负能量越大，对应的正能量就与之越靠近。在Casimir效应中[11,12]，为了获得较大负能量，两板块就要靠得非常近。1996年Ford等[13]证明虫洞半径小于10-30cm；如要得到宏观尺寸的虫洞，负能量就要集中在非常薄(例如10-19cm)的区域。……总之，尽管量子理论允许负能量存在，但严格限制了负能量的大小和持续时间，使得现阶段的虫洞成为一件没有实际意义的构想。

Ford和Roman解释了与负能量相关的自然规律。有一些机制（例如使黑洞与热力学相容)显示，负能量必须要有。但又指明不可能不受限制地产生负能量，因为这会与热力学第二定律发生矛盾。比方说，想象有一台奇异物质发生器向外稳定地供给负能量流；然而由于能量守恒定律，它必然有作为副产品的正能量流。如果人们把这二者引向不同方向，对正能量区域而言，成为一种用不尽的能源，从而可以制成永动机；但根据热力学第二定律这是不可能的。

Ford和Roman的论文“平直时空中对负能密度的限制”说，与经典物理不同，在量子场理论中在一个时空点上能量密度可以不受限制地成为负值。这就违背已知的经典能量条件，例如弱能量条件。特定例子如Casimir效应和光的压缩态(squeezed states)，它们都有实际观测的支持。黑洞蒸发的理论预期也包括负能密度。但在另一方面，量子场论的定律若对负能量不加限制，就可能产生违反热力学第二定律的显著宏观效应，如虫洞、曲相推进、时间机器等。

Ford和Roman导出了惯性系观察者所看到的负能量界限，这是针对4维Minkowski时空（平直时空）的自由无质量标量场的。对负能的幅度和持续时间的限制；采用与不确定性原理相似的形式，量子不等性写作

≥ (1)

式中是能量密度积分，是时间特性宽度。故要求维持的时间越长，则可得到的负能的数量越少。总之，分析计算表明虫洞尺寸受到严格限制。

回过头来看1988年M.Morris和K.Thorne[3]的论文；虫洞是空间拓扑结构的一个短的“手柄”，它广泛地连接了宇宙的分离区域。在拓扑结构选择正确的情况下，Schwarzschild度规描述了一个虫洞。然而，虫洞的界限阻碍了双向运行，且它的管颈(throat)夹断太快以至于甚至只在一个方向中它也不能通过。为了防止夹断（奇点）和界限，穿过管颈必须在非零的压力和能量的情况下，那么面临两个问题：(i)量子场理论是否允许要求维持一个双向可通过的虫洞的压力—能量张量的类型？（ⅱ)物理规律是否允许在空间部分最初是简单连接的宇宙中建立虫洞？如果物理规律允许可穿过的虫洞存在，那么它们可能也允许这样一个虫洞被转换为一个违背因果性的“时间机器”？

虫洞的创造必须伴随着封闭的类时曲线与/或一个未来光锥(future light cone)的不连续的选择，同时也违背了弱能量条件。有着这样的虫洞创造的时空是已知的，然而不知道的是被在那些时空中的Einstein方程规定的压力—能量张量是否被量子场理论所允许。

伴随着极大的时空曲率的虫洞创造将被量子引力规律控制。一个看似合理的情况需要量子泡沫(quantum foam)，对于一个在Planck-Wheeler长度量级的长度规模下的拓扑结构类型的有限的几率振幅（probability amplitude)，有

=1.3×10-33 cm (2)

可以想象一个先进的文明把虫洞拉出量子泡沫并且放大它到经典尺寸。这可能通过正在发展的对量子隧穿产生的自发虫洞的计算来分析。

另外，对任意可穿过的虫洞，一个双球环绕一个出入口（但它的外部时空几乎是平的)，如看到的那样，从另一个出入口穿过虫洞，是一个外部束缚表面。这意味着没有视界的情况下，虫洞的压力—能量张量必须违背平均的弱能量条件(AWEC)；即：要通过虫洞必须有零测地线，有着切向量=，沿着它将有

<0 (3)

因此，如果能说明量子场理论禁止对AWEC的违背，则可能排除先进文明维持可穿过的虫洞的可能性。

**3 Alcubierre时空度规分析**

Miguel Alcubierre是墨西哥物理学家，长期在英国工作，他的著名论文[5]题目是“在广义相对论框架内的曲相推进高速旅行”，但在文中说明warp drive这个词语是引自科幻小说。在论文中他提出，要利用GR的(3+1)形式语言实现一个简单度规，这时可由恒定时间坐标的类空超曲面的叶理来描述。用多个参数决定时空的几何结构，可写出

==

=++ (4)

只要度规对所有的值都是正定的，时空就能确保是完全双曲线型的。

假设飞船沿坐标运动；想找一个度规“推动”飞船沿时间的随机函数描述的轨道飞行；故在归一化条件下写出：

=1

=，==0

=

其中，=，=，而为

= (5)

因此现在度规可写作

= (6)

故可描述时空结构如下：超曲面的3D几何结构总是平坦；垂直于超曲面的类时曲线是测地线，除了少数区域，时空总是平坦的。

看一下外部曲率张量，它描写3D超曲面如何嵌入4D时空：

= (7)

引入体积扩张角概念：

=

并可绘图说明，体积在飞船身后扩张，在前面压缩。飞船轨迹实际是类时曲线，本征时间等于坐标时间。飞船在测地线上飞行，没有时间膨胀。

可以证明=，故飞船在类时曲线上运动。故可得出结论：当飞船在飞行时，并没有经历时间的膨胀。这也直接证明了飞船在测地线上飞行。这意味着即使协调加速度是一个任意的时间函数，沿飞船飞行路径的本征加速度将是零。

为了能观察人们怎样利用该度规用相对很小的时间去完成与遥远星球之间的往返旅行，可以考虑以下情形：恒星A和恒星B在平直时空中相距距离为D。在时刻，一艘飞船用它的火箭引擎推动，以速度*v*从A出发。然后飞船在与A相距*d*处停止飞行。假设R«*d*«D，此时以飞船位置为中心，上文所描述类型的时空的扰动首先出现。该扰动是飞船在以从0迅速增加到恒定值*a*的协同加速度推动下远离A造成的。因为飞船刚开始是静止的(=0)，扰动将从平坦时空平稳发展而来。当飞船飞至A、B中间时，扰动按以下方式做出改变，即协同加速度从*a*迅速变为(-*a*)。如果飞行第二阶段协同加速度按这种与飞行第一阶段相反的方式设置，飞船在与B相距*d*的位置上保持静止；在这个位置上，飞船的扰动将消失（因为=0）。通过又一次在平坦时空以速度飞行，这趟旅程便结束了。

此外我们看到，当太空飞船在平坦时空飞行时，时间的扩张仅来源于飞行的开始和结束阶段。由于往返旅程仅仅是两地距离的二倍，无论从飞船的角度还是星球的角度，我们能以任意小的本征时间回到星球A。飞船将能够飞得比光速更快。但是，它将始终保持类时轨迹；也就是说，在它的局域光锥中，光本身也会因时空的扭曲而被推动。

以上分析建基于：超曲面的三维几何结构总是平坦的；关于时空曲率的信息将确定的时间流逝表明垂直于超曲面的类时曲线是测地线；后者被包含在外部曲率张量规中，该张量描述了3D超曲面是怎样嵌入到4D时空中的。……问题在于前文描述的度规有一个重要的缺点：它违背了三大能量条件（弱能量条件，主能量条件和强能量条件）。弱能量条件和主能量条件对于所有观察者而言，需要能量密度为正。如果有人能从度规计算Einstein张量且利用Euler观察者的4维速度，那么就能展示出这些观察者将看到下述能量密度：

 (8)

该表达式恒为负值这一事实表明它违背了弱能量条件和主能量条件，用相似的方法也能证明它也违背了强能量条件。

我们看到，当它发生在虫洞里，需要奇异物质来完成超光速飞行。但是，即使我们相信奇异物质是被禁止的，众所周知量子场论允许在一些特殊环境里负能量区域的存在（例如在Casimir效应里）。对奇异物质的需要并没有消除如上文描述的超快星际旅行那样使用时空扭曲的可能性。

总之，计算表明必须要有负能量，它必须环绕在星际飞船周围。这实现起来困难非常大；首先是要求巨量的奇异物质。例如后来有人证明，一个以*v*=10*c*运动的曲速泡，其壁厚10-30cm；而星际飞船尺寸假设为200m，那么所需的负能量相当于可观察宇宙质量的百亿倍！还有人提出了其他改进方案，但就可实现性而言没有多少进步。……2015年8月19日英国媒体报道说，天体物理学家称：在未来100年内warp drive可能成为现实，电影《星际迷航》式的太空旅行有可能实现。这是澳大利亚Sydney大学教授J.Lewis对美国广播公司(ABC)说的，他认为这一未来主义概念是相对论的一部分，相对论描述了我们可以怎样扭曲时间和空间。这样你就可以在宇宙中旅行，速度想多快就多快。这在理论上是可能的，但我们能否造出一台曲速引擎？我们掌握的线索表明，宇宙中存在需要的材料，但能否集齐全部材料并造出一台曲速引擎还是未知数。

这位物理学家的观点（未来的宇航必然需要超光速飞行)，其实早就由中国科学工作者（包括宋健院士、林金院士和笔者)提出了[14-16]。而且我们早已注意到相对论中的不自洽性——SR说不可能有超光速运动，GR却说它是可能的（否则也不会出现虫洞理论和warp drive理论)。这种内在矛盾导致出现这样的令人匪夷所思的说法——未来的超光速宇航的理论基础仍是相对论？

**4 对曲相推进方案的讨论**

必须承认，如果GR是一个无懈可击、完全正确的理论，则Alcubierre把它利用到极致。在他之后出现了一些类似论文，似乎更多地是为了满足数学上的兴趣。我们则只关注一件事，未来有无可能用他的方法去做超光速宇航？是不是仅为空谈？

所谓warp drive译作曲相推进或曲速引擎，是一个关于超光速宇航的理论预言或设想。基本原理是，一艘置于时空曲速泡中的飞船，在相对于附近空间（参照系）保持不动的前提下，却可以获得任意大的速度，飞向遥远的宇宙深空。这是因为已设法使曲速泡前方的时空收缩，缩短了与目的地之间的距离；但同时又使曲速泡后方的时空膨胀，增大了与出发点之间的距离。处于扰动区域外的观察者可能会观测到飞船是以超光速飞行。

Alcubierre说，SR认为没有物体可以按照超光速运动，这在GR中“依旧正确”。但是描述应更准确——在GR中，“没有物体能在本地以超光速飞行”（In GR，nothing can travel locally faster than the speed of light)。

因为人类日常生活是基于Euclid空间的，我们很自然会认为如果没有物质能在本地以超光速飞行，然后使两地分隔适当的空间距离D，正如始终呆在出发位置的观察者测量的那样，在两地间做往返航行的时间不可能小于2D/*c*。当然，从我们对SR的研究中知道如进行往返飞行的人是以接近光速飞行，他测量的时间要小一些。但在GR的框架内、在不引入奇异拓扑结构（虫洞）的情况下，人们实际上可以用比保持静止的观察者测量的要短的时间来完成这种往返航行，这或许会让许多人吃惊。但是，如果我们想想在早期宇宙的膨胀阶段且考虑到两个共同运动的观察者的相对分离速度，就容易理解这一想法。如把相对速度定义为本征时间里固有空间距离的改变率，就将获得一个比光速大很多的值。这并不意味着观测者将以超光速飞行，他们总是在本地（局域）的光锥里运动；巨大的分离速度来源于“时空”本身的扩张。上述例子展示了怎样利用时空的扩张以一个任意大的速度远离某地。同样也可以利用时空的收缩以任意速度抵达某地。以这种方法，飞船将通过“时空”本身被推动远离地球并向遥远星球推进。我们可以反转这一过程来返回地球。

曲相推进的论文发表后，反响似比虫洞热烈（见[14-20]）；但大多仍为数学分析，从物理上讨论如何设计、如何实现的文章基本没有。但有的文章有新意，如Santa-Pereira等[20]提出，“用流体力学处理曲相推进时空几何学”，这与中国科学家引用空气力学来处理与相对论有关问题相似[21]。此外，文献[20]提出，或许可以避免使用负能量密度。该文说：Alcubierre曲相驱动度规是一种时空几何体，具有时空扭曲，称为warp bubble（曲速泡）。其中一个巨大的粒子获得全局超光速。给出了以流体物质为重力源的Alcubierre度规的场方程的解。所考虑的能量-动量张量有两种流体：完美流体和参数化完美流体(PPF），这是一种试探性的更灵活的的模型，其目的是探索具有正物质密度成分的曲相驱动解决方案的可能性。已经证明，Alcubierre度规将这种几何结构与Burgers方程联系起来，Burgers方程描述了激波在无粘性流体中的运动，但将解带回了真空。同样的情况也发生在完美流体的四分之二溶液中。理想流体的其他解决方案表明，正物质密度的曲相驱动是可能的，但其代价是复杂的驱动调节功能解决方案。关于PPF，也得到了解决方案，表明正物质密度可以产生速度。计算了所有研究子类别的弱能量、主能量、强能量和零能量条件，以满足完美流体的要求，并在PPF中产生约束，从而使正物质密度也有可能产生曲速泡。综合所有结果，描述更复杂形式的物质或场分布的能量-动量张量生成了具有曲相驱动度规的场方程的解，其中负物质密度可能不是获得曲相速度的严格先决条件”。

但是，笔者认为可以不求助负能量密度，这个论点仍须经过时间的检验，因为上述情况仅为流体力学的分析结果。

**5 时空一体化在概念上的混乱**

我们已经在前面对虫洞和曲相推进的基本理论作详细的讨论。这是违反笔者本意的，因为从根本上讲，我们并不赞成相对论[6,7]，尤其不同意它的两个立论基础——时空一体化和时空弯曲。众所周知，无论SR或GR均以时空一体化作为出发点，这个概念来自Minkowski；所有相对论著作都大谈space-time(或spacetime)，但这个spacetime究竟是什么意思？其实人们并不真的了解。教科书中的描述给人的感觉是，Minkowski的处理方式虽在数学表达上有某些好处，但恰恰违反了物理真实性(physical reality)。把空间矢量与时间矢量“相加”，在实际上不可能，也没有意义。从根本上讲不应把时间和空间混为一谈。我们认为，空间是连续的、无限的、三维的、各向同性的；时间是物质运动的持续和顺序的标志，是连续的、单向的、均匀流逝无始无终的。空间、时间都不依赖于人们的意识而存在。而且，空间是空间，时间是时间；它们都是描述物质世界的基本量。所谓spacetime在计量学及国际单位制SI中是不存在的，也不具有可测量的特性。人为地以不同量纲的物理量来构造一个新的参量（所谓4D时空），从而把时间和空间这两个完全不同的物理学概念混为一谈，是缺乏合理性的作法。

因此，在写作本文时笔者是违反自己的本意，尽量站在相对论者（包括Thorne和Alcubierre）的立场，去考虑飞船作“超光速宇宙航行”的可能性。可是，我们看到的却是基本概念的混乱；现以文献[8]为例作说明。当然我们不是在这里指责[8]的撰写者及采访对象，而是说相对论确有这种概念上的漏洞和混乱。[8]引用日本物理学家加来道雄的话说，超光速移动有两种途径：延伸空间（例如曲速引擎）和卷曲空间(例如虫洞)”——这里他是说“空间”而非“时空”。[8]又说，“曲速泡附近的时空扭曲得非常厉害”；但在后面却说：“曲速引擎的超光速可以归结为空间膨胀”。那么，到底是时空在扭曲，还是空间在扭曲?！相对论本身（以及崇信它的人们）确实常把“时空”和“空间”混为一谈。这是不能允许的，因为既然整个相对论都建基于“时空一体化”的基础之上，怎能用“空间”取代“时空”?！但是，从warp drive的物理意义来看，确实可以用“飞船前面的空间在压缩，同时飞船后面的空间在扩张”，来说明实际上发生了什么事。既如此，有space这个概念就够了，可以用不着spacetime了；但这还是相对论吗？！

本来是研究warp drive的文章，却不得不停下来讨论时空一体化，这是令人遗憾的。空间的标志物是长度，单位是米；时间的单位是秒。但时空（spacetime)却无法作为一个独立物理量存在和挺立，也不能赋与它专有的单位。在天文学及宇宙学中，按GR的说法“物质使时空弯曲”，实际上常常是指“物质使空间弯曲”。“时间弯曲”的说法一直都是莫明其妙的——“时间”如何能“弯曲”? 弯曲是一种属于几何学的位形描述，对于不可见的时间而言，说时间弯曲与否没有意义，是不通的说法。这一概念不具有物理实在性。……这些老问题如今却影响我们对warp drive的讨论，使得“求助GR以实现超光速旅行”成为空洞而不切实际的想法。

**6 怎样获得负能量**

负能量概念最早是在20世纪20年代由P. Dirac提出的，按照他的理念发现了正电子(positron)，这也是最早发现的反物质。但Dirac只是使用这种概念来分析问题，他并未说“自然界可能有负能量物质”或“可以人工制造负能量”，而正电子也是携带正能量的。超光速研究使这个负能量问题突出起来，故有讨论的必要。

GR理论的核心是时空弯曲。通常物质赋于时空以正曲率，如同一个球面。虫洞理论引出时间机器，该理论说为了作时间旅行（回到过去)，时空需有负曲率，如同一个马鞍形。但这种形象化比喻或许不好理解；warp drive似乎也要求负曲率时空……。关键之点在于，量子定律（它以不确定性原理为基础)允许在一些地方的能量密度为负，只要它可以由其他地方的正能量密度作补偿，使总能量密度保持正值[22]。

值得称道的是，早在1968年G. Feinberg[22]在其“超光速粒子的可能性”的论文中就论述了负能量这一命题。他说：“超光速粒子有别的问题，其产生是由于下述事实：对于相空间的动量矢量，可由Lorentz变换改变能量的符号。在波方程的正、负能量解之间比相时间动量包含有更直接的联系。这个联系想来含有超光速粒子，必须包括负能态的存在。然而，我们将看到为超光速粒子的负能解十分相似于为普通粒子所用者，即在量子场理论中这些解是与产生算符代替湮灭算符相联系着”。实际上，Feinberg是指出超光速问题与负能量概念有关的第一人。但也要看到他的思想是矛盾的——如果说超光速粒子携带的是负能量，则导致负质量；但Feinberg快子(tachyon)理论的核心却是虚质量(取=,>0)，这两者并不能兼容。

后来，多国科学家指出，任一种超光速宇航方案都要用负能量——俄罗斯天文学家S.Krasnikov(提出一种单向超光速通行的时空管道，但与虫洞不同)，以及美国的K.Olum，英国的B.Bassett等人，都是这个意见。

现在，我们讨论获取负能量的几种可能方法，但它们并非肯定能成功，提出来只是为了活跃思想：

**A. 利用压缩真空态**

量子真空概念与经典真空概念不同；因为有起伏和涨落，表示存在一种虚激发过程，虚粒子们(virtual particles)不断自发地冒出又消失。有涨落的真空对应的平均能量密度为零，但科学家们想出的方法有可能使其小于零。例子之一是“压缩真空态”，使空间某处为正能量而在另一处为负能量，但在整个空间二者保持平衡。据说，使激光束穿越非线性光学材料就能有这种效果[参看R.Slusher在1988年的文章“挤压光”]；由于光子们增强或抑制真空涨落，从而造成交替的正、负能量。

**B. 利用强引力产生负能粒子**

英国物理学家S.Hawking[23]认为真空有虚粒子对存在包括这种情形——一个是粒子而另一个是反粒子；它们先一同创生，然后分开，再会合到一起并且湮灭。由于能量不能无中生有，故粒子反粒子对中一个具有正能量，另一个具有负能量，但后者的寿命短，是虚粒子，它要找到伙伴并与之湮灭。……Hawking就这样提出了关于负能粒子的概念；在他看来虚粒子（无法由测量证明存在的粒子)的能量有正有负。如果存在黑洞，其中引力太强，实粒子的能量也可能为负。也可能出现这种情况：负能虚粒子落入黑洞变成为实粒子或实反粒子。然而所谓Hawking radiation是正能粒子。

Hawking理论是从量子场论出发的，与“量子真空观”一致，而“黑洞通过辐射而蒸发”的观点是在1974年提出的。按照广义相对论(GR)，黑洞附近的时空弯曲非常大，对真空涨落构成扰乱；正是这个极大的时空曲率决定，必有负能量产生出来并进入黑洞，才能说明正能量会从黑洞出来。因此能量守恒总不能违反，而黑洞物理学亦须与热力学一致。由此看出经典物理学并非一无可取，能量守恒定律、热力学定律都是要遵守的。……不过，负能粒子的存在，笔者认为迄今仍是假说，尚缺少实验证明。

**C. 在类星体那里寻找负能量**

2004年出版的胡宁[24]著作在“引力场的能量动量分布”小节中，复杂的推导竟出现了“引力场总能量为负”的结果。负能量密度不被接受的原因是这将导致“负质量”。而不用负能密度概念就无法解释星体之间的吸引力。引力能量及储藏在引力场中的能量必须为负，胡宁说这是线性引力场方程存在的无法克服的矛盾；意思似乎是说更严谨的理论方程将克服这一点。

**D. 利用Casimir效应**[11,12]

通常认为利用Casimir效应可以获得负能量。1948年荷兰物理学家H.Casimir[11]在论文中提出，取两块平直光整的金属板，把它们相互平行地置于真空中，如果距璃(*d*)很小，就会发现它们之间有一种互相吸引的力（后来称为Casimir力），它不是Newton的万有引力，如真存在就很奇怪。大物理家W.Pauli曾认为这些是胡说八道，但在Casimir坚持下逐步接受了该理论。

关于Casimir效应中的“负能真空”，笔者于2021年发表一篇英文文章[12]。现在简述其要点——

量子化的电磁场是一个有无限多个谐振子的量子系统，基态存在零点振动和相应的零点能(ZPE)，而所有模式的零点振动是量子电磁场的真空涨落——虽平均值为零但均方值不为零。故量子理论认为真空有能量，总体上的大小为。由于自由度数(即振动模数)是无限大，上限也是无限大，这个真空能是发散的而且不能观测。尽管如此，我们却可以计算和测量真空能的变化——置入两块互相平行的金属平板，构成一个开腔(open cavity)，使场的边界条件发生改变，因而谐振子频率改变，造成真空态能量改变。虽然置入腔后的ZPE仍为发散亦不能观测。但它置入前后能量的差值却可以计算和观测。这就是Casimir能，记为，相应的作用在金属平板上的力即Casimir力，记为。现在，等于板间真空的ZPE与两板不存在时的ZPE之间的差值：

= (9)

我们这样表述可得到更清晰的物理概念；在上式中，代表Yes，是置入板后的情况；代表No，是无板的情况。

值得注意的是，上述推导给出的、的表达式都有一个负号；其物理意义是什么？有一种看法认为，Casimir能是负能，两导体板间的Casimir力是互相吸引。“负能量”可理解为“板间的虚空比真空还空”，必定产生内向力使板子靠近。正因为如此，1997年Lamoreaaux[25]的测量结果被认为是“测出了负能量”；但这个问题存在争论。

为什么许多人一直认为Casimlr能()是负能量？两块平行金属板置入工程真空环境后，量子效应造成板间的能量密度低于板外的能量密度；一般认为板外能量密度为零，故板内是负能量密度。这一论断使人们认为Lamoreaaux[25]测出了负能量。但实验者本人并未说自己测出了负能量，他是设计了精密的装置从而测出了Casimir力()，由此推算Casimir能=(10～15)J，所用于计算的间距值*d*=1μm。这个实验发表于1997年，距H.Casimir论文发表已有半个世纪。Casimir本人直到2000年(91岁)才去世，1997年、1998年时已是高龄，此时才听到精确测量Casimir力成功，肯定会有一种复杂的心情。

**E. 利用负波速**

2000年WKD实验在《Nature》上刊出[26]，题为“增益辅助的超光速光传播”，是个负波速实验（实际上是负群速NGV)实验。结果公布后，引发了热烈的讨论。有人不同意说该实验是一个超光速实验，为了证明自己的论点进行了分析计算，但却出现了负能量密度的结果[27,28]！由于实验中光脉冲与铯(Cs)原子气体之间的相互作用，他们由电磁理论计算出的电磁场能量密度只是铯原子气体内能中的电磁部分。计算的结果是，负能密度大约以负群速=-*c*/310从出口处向入口处移动。他们认为难以解释能量密度为负值，猜测其物理意义或许是表示“从铯原子气体中提取能量”。

文献[28]给出了最终结果；代入WKD实验中的参数，得<0；如认为是脉冲在媒质中的电磁能量密度，那么它是负的！再者，能量密度增加的方向是*A*(,)的反向。由于可以证明能量传输速度近似地等于群速，故知<0，能量密度向与入射波相反方向传播。

**F. 利用超材料**

超材料的英文是meta-materials，字头meta是拉丁文，意思是超常、脱颖、另类的意思。广义的概念包括：光子晶体(PC)、左手材料(LHM)、吸波材料、隐身材料等，范围很广。狭义的理解是负折射率(NRI)材料，也就是左手材料。

1964年V.Veselago[29]发表了有关研究的首篇论文，题为“、同时为负时物质的电动力学”。文章提出了一个全新的概念——尽管过去从未发现有<0和<0同时发生的物质，但它即使存在亦不与现有的物理定律相冲突。很显然，Veselago认为发生波的负折射传播的充要条件是介电常数、导磁率同时为负。

在这里我们关注的是能量关系；在各向同性媒质中，电场能量密度、磁场能量密度分别为

= (10)

= (11)

式中是电场强度，是电场磁度；那么或为负将导致负能量密度。如空间既有电场也有磁场，则总能量密度为

=+=+ (12)

如<0、<0同时成立，则<0；但如或有一个为正，则总能密度不一定是负的。

出现负能量的可能性使Vesselago不安，因为经典物理学中不会有负能量的地位。他利用频率色散概念作解释；在无色散、无吸收的条件下讨论，如果保持总能量不能为零的约束（这与传统上对能量的认识相符），那么、为负是不可能的，即不存在同时满足<0、<0的可能性。然而，下述表达式更具有一般性：

= (13)

如要保持>0，则需满足

>0 (14)

>0 (15)

两个不等式不意味着、不能同时为负；但是，为满足上述不等式的要求，最终将取决于、与频率的关系。

虽然Vesselago从经典电动力学出发排除了<0的可能，在论文发表的几十年后实验技术发展的成果给这个问题作了结论。2000年3月美国物理学会召开大会，其间有圣迭戈加州大学(UC-SD)的科学家D.Smith[30,31]宣布在微波完成了负折射率实验，做出了多年前预言的LHM。

**7 不依靠“时空弯曲”的基础性超光速研究**

相对论建立在时空一体化和时空弯曲的基础上，但这两者都可能是有问题的[6,7]。事情发展成这样——SR禁止超光速，一些物理学家却绕过SR而利用GR发展超光速理论，宣传虫洞或曲相推进。近来的趋势似乎使warp bubble(曲速泡)成了热门词语，这有赖于美国物理学家H.White对研究warp drive的坚持，也得力于《European Physics Journal C》持续不断发表相关的论文。

2022年2月，中国的《科技日报》发表记者唐芳[8]的文章“真实世界中发现曲速泡？——别急，超光速旅行为时尚早”。文章说：

“科幻作品中的主人公经常借助一种被称为曲速引擎的工具进行超光速星际旅行。在《星际迷航》的虚拟宇宙中，曲速引擎就是一种超光速的推进装置。受此启发，从广义相对论出发，物理学家M.Alcubierre于1994年提出科学意义上的曲速引擎概念。

日前，国际知名期刊《欧洲物理杂志C辑》报道称，美国国防高级研究计划局(DARPA)物理学家H.White率领团队在真实世界中发现了一个曲速泡。有人认为，White的纳米级曲速泡有望为制造曲速引擎打开一扇门，引领人类进入超光速时代。

对此，中国科学院理论物理研究所副研究员李理2月中旬对科技日报记者表示，White团队做了一些数值模拟，预言在某种特定的微结构下可以给出负的能量密度分布，这有些类似于维持Alcubierre时空结构（曲速泡）所需要的负能量。但是其能否跟曲速泡或曲速引擎联系起来，还有待研究”。

当笔者看到这个报道时，感觉亦喜亦忧。喜的是在新世纪超光速研究有重振之势，虽然提到的项目我们可能并不看好；忧的是公众不清楚多国（包括中国）科学家对超光速问题已抓住基础和要害研究数十年，似乎却还要走“依靠GR”这个我们不赞成也不喜欢的路子。如果GR确实有问题[7]，那怎么办？！

如果从G.Feinberg[22]的严肃的超光速研究论文算起，相关研究的历史已有55年之久。参加研究的有美国、英国、中国、俄国、意大利等多国的科学家，理论工作和实险工作都很丰富。在这种情况下，说“任何物体的运动速度都无法超过光速，这已深入人心”[8]；又说“没有发现任何可信的超光速的实验迹象”[8]；就显得不实事求是了。例如,1993年的SKC实验[32]，在人类实验室中把光子速度加快70%，即达到=1.7——这算不算“任何物体”的超光速运动？几句话就抹杀了那么多国家、那么多工作者的努力与探索，是不是有些过份呢？……虽然笔者已做超光速研究长达20余年并有多种著作出版[33-38]，今天仍愿意从头学起。以下是我们想说的几个重点问题。……下面将列出中国科学家在超光速研究方面的一些观点和所做的工作——札实地做基础性研究可能好过空谈“人类超光速宇宙的航行”。

**Ⅰ. 我们不赞同“绕开SR、求助于GR”的研究路子**

许多物理学家向往“超光速宇航，却又畏惧SR“禁令”，觉得GR可资利用，遂进去摆弄数学公式，把物理问题变成数学问题。这种作法能使我们更接近“超光速宇航”吗？不可能！就以负能量问题来说，虽然笔者也提示一些可能获取负能量的手段，但很难有实际效果。

建议有趣的研究者先看SR对超光速的“禁令”对不对。根据质速公式，运动中的粒子的质量为

= (16)

式中为粒子的静止质量，而=/，是粒子速度，是光速。故粒子的能量为

= (17)

故当从低值逐步增加时，逐渐增大；当=，为无限大。如果>，变为虚数。无论无限大的或虚数的能量，在实际中均无意义，故SR理论判定“超光速不可能存在”。

必须指出，这些观点是肤浅的。首先，Lorentz质速公式是根据电子的电磁质量推导出来的[39]，即使它适用于电子和质子这类带电粒子，也不能像SR那样推广于一切动体。实际上缺少质速公式适用于中性粒子和中性物体的实验证明，故所谓“光障”不一定真的存在。

另外，电子并不是一个普通的动体，而是特殊的带有电荷的动体。故即使=，能量也不是无限大。另外，还可证明当速度增大时动体荷电量*q*和受力*F*都减小。这就很好的解释了1901年的Kaufmann实验。类似地，分析表明1964年的Bertozi实验也不能证明光速不可超越。

其次，众所周知光子是以光速运行的(=)，这并没有什么问题，而光子的速度()并非靠加速获得，而是本来固有的。况且，或许自然界有超光速粒子存在，其速度并非通过加速手段得到的。就是说，一个以亚光速运动(<)的粒子可能无法通过加速而达到超光速，但Feinberg快子可能具有虚数的静质量

= (18)

式中为实数。这时，即使>(>1)亦不会出现虚数的能量。大自然是非常复杂的，科学界一直用中微子作为例证，说Tachyon也许存在。

取=/(是动体速度)，则可看出SR中有一处处起作用的因子()-1/2，笔者称之为光速极限因子，正是这个因子造成了光障(light barrier)。2001年曹盛林[40]指出，用不着像Feinberg那样假定超光速粒子(快子)具有虚数静质量。在他的理论中，光速极限因子()-1/2变成(+)-1/4，也就没有必要否定超光速运动了。他认为，LT只适用于亚光速体系，这是问题的关键所在。过去Einstein利用LT的局部特征来否定超光速运动的可能性，既不充分也无必要。现在写出曹盛林导出的动体动质量、能量方程

= (19)

= (20)

由于=()2=()2，故在<1时，立即得到与SR理论一致的公式。如果>1，就可写出

= (21)

= (22)

此时分母仍为实数。故此理论不要求以超光速运动的粒子（或任何实体物质）具有虚质量。现在由式(18)可知，当增大(增大)，能量减小；当减小（减小)，能量增大。这正是A.Sommerfeld在20世纪初时对超光速粒子的预期——减少粒子能量时快子将加速，增加粒子能量时快子将减速。

那么，自然界是否可能有天然的超光速粒子呢？可能性最大的就是中微子(neutrinos)。这是一种非常微小但却无处不在的粒子，它不带电荷，分子、子、子三种，其物理性质与光子有些相似。很早就有人认为它是以超光速运动的粒子。……2015年黄志洵[41]发表论文“论1987年超新星爆发后续现象的不同解释”。文章说：1987年2月23日发生了超新星爆发，在1987A超新星的第一批光子抵达前7.7h，意大利布朗峰下的探测器检测到第1批中微子到达，包含5个事件。而在第1批光子抵达前3h，第2批中微子抵达，日本神岗Ⅱ的探测器收到11个，美国Ohio州的IMB探测器收到8个，前苏联Baksan的探测器收到5个。这怎么会发生？一直没有得到合理的解释。只有3种可能：①光子速度为光速，中微子速度是超光速；②中微子速度为，光子速度为亚光速；③中微子速度为超光速，光子速度为亚光速。从当时情况来分析，可能发生了情况①或③；我们认为可能是①！

从2008年到2011年，欧洲核子研究中心(CERN)组织多国科学家进行中微子飞行速度的实验研究；中微子从瑞士、法国边界处的CERN发射，接收点设在意大利Gran sasso的地下实验室，两地相距730km，测距误差小于10cm；中微子飞行时间误差小于10ns。这显然是一个精密的实验，得出了超光速的结果[42]，=2.48×10-5。后来174位参与实验的科学家在待发表论文上签了名。但后来说实验设备有故障，导致此结果错了——一项持续3年的大型研究(OPERA项目)竟毁于一旦（说是光缆接头松动)，即使今天来看也是一件令人匪夷所思的事。……总之，这在2011年至2012年热闹一阵后，就结束了；但仍有一些物理学家坚持认为中微子是超光速粒子[43-46]。

**Ⅱ. 应当重视突破声障与突破光障的比较研究**

在航空工程中，航空器飞行速度与空气中的声速(为了方便比较，声速也用表示)之比，称为Mach数，规定符号是*Ma*=/。所谓突破声障是指飞机实现超声速(*Ma*>1)飞行，1947年10月14日，美国X-1火箭动力机达到速度=1078km/h，对应*Ma*=1.105。1954年2月28日，美国F-104战斗机试飞，达到声速的2倍(*Ma*=2)。

真空中光速=299792458m/s，为声速340m/s的8.8×105倍。如此之大的差距，再加上真空中光速是基本物理常数之一（声速却不是），把两个领域（声学、光学）的事情放到一起，似乎没有可比性。但波动力学的发展史却告诉我们相反的结论。1759年L.Euler首次得到2维波方程，是对矩形鼓膜振动的分析；以(,,,)代表膜位移，是由膜材料和张力决定的常数，他得到

+= (23)

在他的论文（“论声音的传播”）中，进一步分析得到了3维波方程

= (24)

式中是振动（力学振动或声学振动）变量。故从一开始波方程(wave equations)就是横跨力学、声学而发展的，对数学家而言声学和力学的边界是模糊的。由于光的电磁波本质，声学与光学的关系又可理解为声学与电磁学的关系。从Maxwell方程组出发得到的波方程为

= (25)

式中是波函数，=1/，而、是波传播媒质的宏观参数。(25)式与(24)式的一致性说明，波动过程有统一的规律存在。

如所周知，静电场是无旋场，在体电荷密度为零的区域电势函数满足Laplace方程。在空气动力学中，研究流体运动时使用两个基本函数，即势函数和流函数；当气流速度低时平面流动中视气流密度为常量，并以Laplace方程描写2维流动：

+=0 (26)

+=0 (27)

这是不可压的无旋流方程，它们是2阶的线性微分方程。如气流速度增大到一定程度，应视为变量；可压缩流体作平面无旋流动时的基本方程为

-2+=0 (28)

-2+=0 (29)

式中为声速；显然，若→∞，方程退化为较简单的Laplace方程，此即不可压流体的情形。我们注意到，虽然出现了因子，但并未出现“声速不能超过”的情况。那么为什么在光学领域中，当是光速时，这个因子作用就那么大，光速就“不能超过”了？！

理想流体的可压缩流有多种解法，其中之一是扰动线化法。参考直匀流的情况，规定来流的流速为，声速为，Mach数为；那么势方程经处理和线性化后，在2维流动条件下可得

+= (30)

线化过程中限定不能太大，即不是高超声速流；亦不能是跨声速流。我们注意到，在亚声速流场上，<1，>0，方程是椭圆型的；其性质与不可压流的Laplace方程基本一样。然而对超声速流场而言，>1，<0，方程成为双曲型的，情况有很大变化。总之，描写亚声速、超声速的运动方程是不同类型的。而对描写跨声速流动的运动方程而言，是混合型、非线性方程，求解析解十分困难。这样就出现了“计算流体力学”，它与我们熟悉的“计算电磁学”十分相似，所用的方法（如有限元法、有限差分法）也是相同的。

所谓声障是指飞行器的速度曾长时间在亚声速(*Ma*<1）的水平上徘徊，以声速(*Ma*=1)飞行的企图遇到了实在的困难。早期的飞机速度慢，按不可压缩流体处理空气动力学问题便可满足要求。当*Ma*≥0.4，可压缩效应渐显，接近声速(*Ma*→1)时机头前空气密度急剧增大。当*Ma*=1，流体中的扰动相对于飞机已不传播，而是集中形成波面：机头与前面空气相遇时强烈压缩，密度剧增形成无形的墙（激波），造成的阻力称为波阻。它消耗发动机功率约75%，带来很大困难。这时需要发展“近声速空气动力学”和“超声速空气动力学”。20世纪20年代、30年代都有关于跨声速流动的理论研究，决定性的进展却是在40年代。1945年美国科学家提出了后掠翼理论，对克服激波影响的效果是把飞机速度提高到近声速。克服声障的努力是科学家、工程师、设计师协力进行的，从理论研究到超声速飞行成功，科学界与航空工程界联合攻关仅用了约20年。

在空气动力学中，可压缩流体的速度势的波方程，经过线性化的形式为

+= (31)

这里我们再用符号取代符号*Ma*，是为了把相对论与空气动力学作比较。上式表示，从本质上讲波动力学的基本操作是对微分方程的辨识和求解。钱学森(1911-2009)和T.von Kármán(1881-1963)一起，在20世纪30年代最早提出了高超声速流的概念，为飞机克服热障、声障提供了理论依据。他们的理论应用于高亚声速飞机的设计；实际上是在亚声速区域内把小扰动理论向非线性有所推进。虽然不能用于超声速问题的计算，但避免了奇点——在=时不会出现无限大质量密度。

现在让我们来看看奇点问题。前面所说的“当*Ma*=1时空气密度剧增形成激波”，并没有说“当*Ma*=1时空气密度剧增到无限大”。杨新铁[21]指出：早期只研究了亚声速流动；按照小扰动理论，对于缩口管道流动，如把相对静止时的质量密度定为，那么相对速度为时的质量密度就增长为：

= (32)

上式与狭义相对论(SR)的质速公式完全一样。如果完全遵从上式，在超声速时就会算出虚数质量密度。然而，后来的发展用事实证明了那个质量密度无限大只是数学上的无限大。原中国航天工业部总工程师宋健[47]指出，超声速飞机穿过声障时的气体密度只增大6倍(不存在无限大的事实)。正是在非线性处理的前提下，超声速实验研究和相关理论选项及处理均为最优化，才造成了超声速运动（飞行）的成功。在这里，“奇点”的事不再提起。我们归纳出以下3个方程：

亚声速 （<，<1，*Ma*<1）

= (32)

超声速 （>，>1，*Ma*>1）

= (33)

声 速 （=，=1，*Ma*=1）

= (34)

式中是Mach数，是系数，是相对静止时的密度。现在整个事情得到了完美的诠释，超光速运动研究也必须走这条路。

然而公式(30)的规律需通过技术改进才能实现。在19世纪末，为了发展蒸汽涡轮机需要流速尽可能高的气流。人们依照传统缩小管道截面，以为可以获得超声速气流，结果都失败了。瑞典工程师Carl Laval(1845-1913)用先收缩截面再扩大截面，即把不断缩小的喷管后面加接一段截面逐步扩大的扩张管，发现只要压力够大，在扩张管那里竟出现了超声速流动。这就证明所谓无限大只存在于数学公式中。20世纪40年代的科学家和工程师进行风洞实验，在Laval管的启示下造出了超声速飞机。

**Ⅲ. 应当在高能加速器上用改进了的技术寻找超光速粒子**

相对论者会说，加速器的技术实践早已表明，提高能量是使粒子（电子或质子）加速飞行的有效手段，甚至是唯一方法。而且加速粒子实际上只能达到非常接近的值，例如0.99999；既如此，Einstein的1905年论述怎么可以反对？……对此笔者提出以下观点；首先，“用现在加速器没有得到过=或>的粒子”，与“宇宙中没有超光速粒子”，不是一个概念。根据电磁场与电磁波原理设计的加速器，其中飞行的带电粒子速度只能无限接近而不能达到，是很自然的，因为电磁波本征速度就是；这说明不了问题。其次，我们不否认加大电磁能量能使电子加速，但这与证明SR质速方程和整个SR能量关系不是一回事。目前完全没有针对中性粒子（如中子、原子）的实验证明，因而提出速度上的普遍限制没有道理。再者，更大的问题在于Einstein仅把电子看成一个质量、速度的一般动体(general moving body)，推导中没有考虑电子是携带电荷的特殊动体(special moving body)，因而缺少一个计入了运动电荷影响的电动力学理论。中国学者进行分析，得到的结果与Einstein显著不同[48]。

必须指出，在争取用高能粒子加速器寻找超光速粒子这件事情上，我们争取到加速器专家的支持。例如2017年裴元吉教授[49]在文章“超光速实验方案探讨”中说：

“到目前为止，带电粒子动力学都是建立在光速为极限的条件下，即以狭义相对论动力学为基础的。尽管目前所建造的加速器尚未发现与这一基础理论有矛盾之处，但是设定所有测试粒子运动参数的方法的理论基础也是以相对论为基础的，因此即便有矛盾也很难发现。为发现是否存在矛盾，我提出一种试验方法也许可发现一些疑点，如若果真发现，那可以深入开展研究其原因。

实验装置中，电子枪是能产生能量为几个MeV、束团长度为ps(10-12s)级的电子枪（如光阴极微波电子枪、外置阴极独立调谐微波电子枪等)；加速管1、加速管2是常规加速结构（其相速度分别为接近1和等于1)，它们将电子束加速到电子束的相对能量=100，即电子束的速度达到0.99995(是光速)；加速管3是采取特殊设计的加速管，使波的相速度大于光速；磁铁分析1、2和其后面的荧光靶是用于束流能量测量的装置，其能量分辨率好于0.1%；束流垃圾箱是用于吸收电子束的装置。K1是为常规加速管提供微波功率的器件，其脉冲功率约为50MW，K2是为超光速相速加速管提供微波功率的器件，其输出功率为25MW；IAΦ是用于调节进入加速管3微波功率的相位和功率的元件”。

以后，裴教授详细说明了“电子束在加速管3中的能量模拟”和“试验方法”，并附有多个计算图表。测量的目标是发现一些特殊现象，进而考虑是否能用“有的电子速度大于光速”来解释。

2019年3月，笔者收到杨新铁教授发来的《超光速电子加速器探讨》。这是一份由多位专家联名（裴元吉、杨新铁、黄志洵、陈长乐、李开泰、黄艾香、周渭）的研究计划书。在“项目的立项依据”中，提出的理由与裴元吉相似，即“用按SR设计的仪器不可能发现SR自身的矛盾”。这份报告书提出了探索性实验方案，其中把3个加速管的最后一个（3号加速管）改为一种经特殊设计的超光速加速管，使其中波的相速度大于光速。期望电子在这里向超光速方向加速（这个区的能量不是增加而是减少）。

杨教授是空气动力学专家，他认为，在连续介质力学发展中也遇到过这些问题。按照小扰动近似理论，声速点也是无限大；拿亚声速方程计算超声速，也有虚数产生。但力学家无人认为应做时空描述。……理想流体可压缩流动的算法本含有尺缩变换，但空气力学家称为压缩变换，本质上相同。

对于改造现有加速器以进行寻找特殊电子（meta-electron）一事，笔者认为应当吸取设计超声速飞机时采用Laval管的经验。恰好笔者是研究微波技术中波导理论的专家，专著《An Introduction to the Theory of Waveguide Below Cutoff》[50]，曾获优秀科技图书的国家奖。截止波导内的特殊功能（场强自起点按指数率下降），以及书中曾谈到Conic Waveguide Below Cutoff（圆锥状截止波导），用到加速器改造上可能是合适的；故特写下这段文字以供参考。

**Ⅳ. 应当考虑航天专家的独特见解**

理论物理学家是受人尊敬的，但他们也有弱点。例如以数学代替物理，甚至某个公式过不去就会认为整个工程都不可进行。中国已是航天大国，它培养了许多航天专家，其中也有人关心未来能否以超光速作宇宙航行的问题。他们的意见很有启发性，这里举两个例子。

第一个例子是宋健院士，他是工程控制论专家、航天技术专家，过去曾任中国航天工业部的副部长兼总工程师；2004年他在一个学术会议上说[51]：

“现在的火箭发动机主要是化学燃料发动机，速度只有10-5。未来的氘聚变发动机，速度或许能高达(0.05～0.1)。如果飞船速度接近光速，甚至超过光速，那么往返最近的恒星只需数年。……Einstein在1905年论文中设想了一个光障(light barrier)，说超光速不可能；但这只是猜测，不是科学定律，因为无实验根据。从技术角度看光障，用光学或雷达往返信号时间之半去测距，这是看不到速度≥的目标的，也就无法判断那里的情况。因此，不了解超光速状况不能成为它不存在的理由。……另外，从数十年的航天技术实践检查SR的计算结果，发现即使是«的情况，自主导航的工程实践也与SR动力学发生某些冲突。例如，发动机推力依赖于其惯性速度的现象就从未发现过。”

宋健又说：

“宇航的光障问题使人想起20世纪航空工程中出现的声障问题。超声速飞机出现前都以为飞机接近声速时形成的激波是无法穿过的。但后来由理论分析和风洞实验表明，机头处气体密度只上升不到6倍。航空界立即开始设计建造新飞机，于1947年实现超声速飞行。……光障问题是否会含有类似前景呢？”

另一个例子是林金院士，他是中国运载火箭技术研究院研究员，是卫星导航与惯性导航专家，在同一个学术会议上，林金[51]就自主惯性导航提供一个新理论模型，用来分析处理惯性导航的时间定义、测量机制和超光速运动。他认为，一个运动质点自己可以测量自己相对一个给定惯性系的位置、速度和加速度，作为质点自带的运动钟固有时间的函数。原理上不需要与外界交换信息，不存在任何信号传递的速度问题。自主惯性导航是基于引力场的性质，即使这个世界没有电磁场、没有光，纯惯性系统照样工作，照常自主定位、测速。既如此，3×108m/s为何会成为速度的极限？！简言之，惯性导航的宇宙飞船的时间定义即飞船运动钟固有时间。只要未来能开发出新型动力源，飞船的速度不存在上限。……林金还认为，应恢复光子和其它微观粒子相同的普通地位，即有静止质量，其速度也不是极限速度。

宋健、林金二位航天专家都是笔者的朋友，而我自己也是一位航天迷。他们看问题的方式发人深省；老实说，这些话是理论物理学家讲不出来的！

**V. 应当重视信息能否以超光速传送的研究**

信息、信号并不是实体物质，却也在SR“禁止超光速运动”的名单上，这是令人奇怪的。2003年1月美国航天局(NASA)1972年发射的《先驱者-10》探测器飞出了太阳系，但与它联系的时间竟长达11h，传达指令和通信不能及时完成。相对论不仅认为物体的运动速度不能超光速，信号传播也不能超光速。但在量子理论中却无此限制，2008年8月《Nature》发表了瑞士科学家的实验结果[52]，证明量子纠缠态的传播速度是超光速的，即=104~107；这是很重要的进展，增加了我们的信心。有关超光速通信的论述详见文献[53]。

**8 结束语**

本文详述了一些企图绕过SR而依靠GR来实现超光速宇航的方法，例如虫洞与曲相推进。但我们并不看好这种理念，主张面对SR给超光速运动下的“禁令”，踏实地做基础性研究，为此提出了多个建议。对虫洞我们认为是空谈，没有多少价值；warp drive则充满机智，但与物理实在脱节。为了使人类将来能飞出太阳系，甚至走得更远，需要几代人的持续努力，想“速成”是不可能的。

本文还指出，既然GR的理论基础是时空一体化和时空弯曲，如果仅用空间的压缩和伸张就可以说明warp drive的原理，那么它就不是由研究GR带来的成果了。在学术界不能一方面要求人们接受warp drive的概念，在遇到实际问题时又用“空间”代替“时空”。warp drive究竟靠什么工作——是spacetime还是space? 是不能含糊其词的。

**参考文献**

[1] Einstein A. On the electrodynamics of moving bodies. Ann. d. Phys., 1905, 17(7): 891～895

[2] Einstein A. The field equations for gravitation[J]. Sitzungsberichte der Deutschen Akademie der Wissenschaften. Klasse f'ur Mathematik, Physik und Technik, 1915: 844~847.

[3] Morris M, Thorne K. Yurtsever U. Wormholes, time machines and the weak energy condition. Phys. Rev Lett, 1988, 61(13): 1446～1449.

[4] Ford L, Roman T. Negative energy, wormhole and warp drive. Sci. Amer., 2000, 282: 40～53

[5] Alcubierre M. The warp drive: hyper-fast travel within general relativity. Class Quant Grav, 1994, 11(5): 73～77.

[6] 黄志洵. 爱因斯坦的狭义相对论是正确的吗？中国传媒大学学报（自然科学版），2021, 28(5)：71～82

[7] 黄志洵. 对广义相对论的研究和讨论. 中国传媒大学学报（自然科学版），2022, 29(1)：64～80

[8] 唐芳. 真实世界中发现曲速泡？别急，超光速旅行为时尚早. 科技日报，2022年2月16日

[9] Flamm L. Beitrage zur Einsteinschen gravitations theorie. Phys Zeit, 1916, 17: 448.

[10] Thome K. Black holes and time warps. Norton Comp, 1994.

[11] Casimir H. On the attraction between two perfect conducting plates. Proc Ned Akad Wet, 1948, 51: 793～797.

[12] Huang Z X. Two kinds of vacuum in Casimir effect. Current Jour. of App. Sci., and Tech., 2021, 40(35)：61～77

[13] Ford L, Roman T. Restrictions on negative energy density in flat space time. TUTP-96-2, 1996, (2 oct): 1～17

[14] Van Den Broeck C. A warp drive with more reasonable total energy. Class. Quantum Gravity. 1999, 16: 3973

[15] Natario J. Warp drive with zero expansion. Class. Quantum Gravity. 2002, 19: 1157

[16] Lobo F, Visser M. Fundamental limitations on warp drive spacetimes. Class. Quantum Gravity, 2004 , 21: 5871

[17] Lee J, Cleaver G. Effects of external radiation on an Alcubierre warp bubble. Phys. Essays, 2016, 29: 201

[18] Santos-Pereira O, et. al., Dust contents solutions for the Alcubierre warp drive spacetime, Eur. Phys. Jour. C, 2020, 80: 786

[19] Mattingly B, et. al. Curvature invariants for the Alcubierre and Natario warp drives. Universe, 2021, 7: 21

[20] Santa-Pereira O. et. al. Fluid dynamics in the warp drive spacetime geometry . European Phys, Jour. C, 2021, 81: 133

[21] 杨新铁. 超光速现象理论基础探讨. 北京石油化工学院学报，2002, 10(4): 27~32

[22] Feinberg G. Possibility of faster-than-light particles. Phys. Rev, 1967, 159: 1089~1105.

[23] Hawking S. A brief history of time. Bantom Books, 1988

[24] 胡宁. 广义相对论和引力场理论. 科学出版社，2000.

[25] Lamoreaux S. Demonsration of the Casimir force in the 0.6 to 6 μm range Phys. Rev. Lett., 1997, 58: 5~8

[26] Wang L J, Kuzmich A, Dogariu A. Gain-assisted superluminal light propagation. Nature. 2000., 406: 277~279.

[27] Huang C G, Zhang Y Z. Poynting vector, energy density and energy velocity in anomalous dispersion medium. E print: ArXiv. Phys/0104005.

[28] 张元仲. 反常色散介质“超光速”现象研究新进展. 物理，2001, 30(8)：456~460.

[29] Veselago V. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of permittivity and permeability. Sov. Phys. Usp., 1968, 10(4): 509~514.

[30] Smith D, et. al. Composite medium simultaneously negative permeability and permittivity. Phys Rev Lett, 2000, 84(18): 4184~4187.

[31] Smith D. Kroll N. Negative refractive index in left-handed materials. Phys Rev Lett., 2000, 85(14): 2933~2936

[32] Steinberg A, Kuwiat P, Chiao R. Measurement of the single photon tunneling time. Phys. Rev. Lett, 1993, 71(5): 708~711

[33] 黄志洵. 超光速研究——相对论、量子力学、电子学和信息理论的交汇点. 科学出版社，1999

[34] 黄志洵. 超光速研究新进展. 国防工业出版社，2002

[35] 黄志洵. 超光速研究的理论与实验. 国防工业出版社，2005

[36] 黄志洵. 超光速研究及电子学探索. 国防工业出版社，2008

[37] 黄志洵. 波科学与超光速物理. 国防工业出版社，2014

[38] 黄志洵. 超光速物理问题研究. 国防工业出版社，2017

[39] 马青平. 相对论逻辑自洽性探疑. 上海科技文献出版社, 2004

[40] 曹盛林．芬斯勒时空中的相对论及宇宙论. 北京师范大学出版社，2001

[41] 黄志洵. 论1987年超新星爆发后续现象的不同解释. 前沿科学，2015，9(2)：39～53

[42] Adam T, et. al. Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam. m/olr, http: // stctic. arxiv. org/pdf/1109. 4897. pdf.

[43] Ai X B. A suggestion based on the OPERA experimental apparatus. Phys. Scripta, 2012, 85: 045055 1~4

[44] Ehrlich R. Tachyonic neutrinos and the neutrino masses. Astroparticle Phys., 2013, 41: 1~6

[45] Ehrlich R. Six observations consistent with the electron neutrino being a tachyon with mass m2=-0.11±0.016eV2. Astroparticle Phys., 2015, 60: 11～17

[46] 黄志洵. 论有质粒子作超光速运动的可能性. 中国传媒大学学报（自然科学版），2015, 22(3): 1~15

[47] 宋健. 航天纵横——航天对基础科学的拉动. 高等教育出版社，2007

[48] 刘显钢. 电荷运动的自屏蔽效应. 重庆大学学报（专刊），2005, 27: 26~28.

[49] 裴元吉．超光速实验方案探讨. 前沿科学，2017, 11(2)：22~24

[50] Huang Z X. An Introduction to the Theory of Waveguide Below Cutoff (2nd edition). China Metrology Press, 1991

[51] The Xion-Mountain Conference of Science (No. 242): Frontier Issues on Astronautics and Light Barrier, Nov. 26-28, 2004

[52] Salart D, et. al, Testing the speed of spoky action at a distance. Nature, 2008, 454: 861~864

[53] 黄志洵. 以量子非局域性为基础的超光速通信. 前沿科学，2016, 10(1)：57~78

1. **作者简介：**黄志洵（1936-），中国传媒大学教授、博士生导师，中国科学院电子学研究所客座研究员。 [↑](#footnote-ref-0)