

期待一个新的黄金岁月（下）

王玉明 张海青 邹浩 译 李学潜 校



四、暗物质

源于超对称的暗物质 令 B 、 L 、 S 分别为重子数、轻子数和自旋，相乘量子数 $R \equiv (-1)^{3B+L+2S}$ 对于所有标准模型粒子来说为+1，对于其相应的超对称伴子来说值为-1。由于 B 、 L 和 S 在很高近似程度上守恒，我们可以预测 R 宇称在很高近似程度上也是守恒的。因此，最轻的 R 为奇数粒子可能非常稳定，在接下来将要讨论的许多低能超对称模型中它在宇宙学尺度下都是稳定的；注意，此结果并不是在任何低能超对称模型中都成立。

如果具体给定一个低能超对称模型，我们可以计算宇宙自大爆炸以后的热过程，并且估算宇宙稳定粒子的残存密度。在相当大的参数范围内，最轻的奇 R 粒子以适当的丰度产生来提供暗物质，而且要求它和正常物质的相互作用非常之微弱（图 14）。

“任务已完成？” 虽然初步的数据鼓舞人心，但它还是太简单，以致无法从中外推出需要的结果。如果在 LHC 上发现了低能超对称及暗物质的候选者，那么将会实施一个重大计划来检验这源于大爆炸的粒子的具体性质是否导致目前观测具有的暗物质密度。这并不仅仅是形式上的检验。因为还有 LHC 观测到的最轻奇 R 粒子的其他有生命力的以及理论上很有吸引力的替代理论，也给出宇宙学观测密度，理论上同样非常有吸引力。我们下面将会解释“过多”与“过少”的超对称暗物质是与重要且很有道理的物理观点相容的。

① 过多？——Superwimps（引力子的超伴子*）：宇宙年龄与 LHC 上能测量的粒子的衰变寿命相差一个很大的空档，因此有可能某种粒子既可以在 LHC

上表现为稳定粒子，通过计算又可知其丰度在当今的宇宙中很大；然而它在现实中并不存在——因为它的衰变寿命处于亚宇宙学时间尺度上。上述可能性并不像乍听起来那么人为或怪异，下面我们给出理由。极微弱相互作用粒子的超伴子，例如引力微子或轴微子，与正常物质的耦合非常弱，以至于在 LHC 上观测不到，他们同样有着奇 R 宇称。这样可以观测到的最轻奇 R 粒子很可能衰变成一个更轻的不可观测奇 R 粒子，其寿命正好补上前述

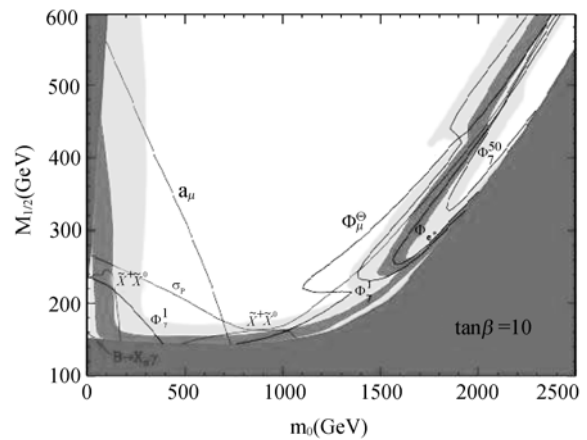


图 14 许多低能超对称模型都给出暗物质候选者 这里画出的是基于最小超引力媒介模型宇宙学稳定粒子产生图，取 $\tan \beta = 10$ ，标量普适范围及规范微子质量 $m_0, m_{1/2}$ 。右下方深色区域因为或是其中的稳定粒子带电的或是其预言的有荷微子应该已被观测到（事实上没有），因而已被排除掉。在中间及上方白色区域里暗物质不是多了（中心区域）就是少了（右边的长条区域）。浅灰色条带显示的是宇宙学感兴趣的适量中性微子暗物质的产生，深色条带中的一些数据已与观测值接近。下面将会给出其中的某些定性描述。

p (14.67MeV)，被称为先进核燃料，因为它的聚变反应产生质子而不产生高能中子。而氘氘反应产生的高能中子辐射在聚变堆结构中的退化效应是目前设计的聚变堆的技术难题之一。但是氦 3 聚变反应要求更高的温度。而在这样的温度下，等离子体在磁场中的回旋辐射能量损失会增加很多。考虑到这

种聚变燃料的特点，可能要研究不同于托卡马克的磁约束装置类型。但目前对氦 3 聚变的研究尚相当于托卡马克研究的战国时期，以及考虑到从月球取回氦 3 的技术困难及成本核算，使用氦 3 作为聚变堆的燃料应属更长时期考虑的问题。

（中国科学院物理研究所 100080）

的空档。然而，并没有好的论据支持最轻的标准模型超伴子一定会比引力微子、轴子或其他可能“隐藏部分”的粒子（见下文）轻，所以这也只是一种非常有活力的可能性。所以说，如果 LHC 上观测到的暗物质候选者事实上提供了过多的暗物质，或其带电荷，抑或对宇宙学来说是危险的，还有一个似乎可信的理论解释。

②过少？——轴子：给定相对论量子场论的简洁结构及广泛的对称性后，QCD 的定义只要求、事实上也只允许一组被严格限制的参数，那就是夸克质量、耦合参数还有 θ 参数。物理上结果周期性依赖要求 θ 只能取 $\pm\pi$ 之间的值，而只要不满足 $\theta \equiv 0 \pmod{\pi}$ 的条件，分立对称性 P 与 T 就会破缺。我们现在无法确定 θ 的实际值，实验上主要利用中子电偶极矩的限制给出了它的一个范围极限： $|\theta| < 10^{-9}$ 。在此之外的值均已被实验结果排除。我们的世界里，P 和 T 的相互作用是破缺的，所以 θ 参数在任何严格对称性下也不会为 0。如何理解如此小的参量，意味着挑战，同时也是机遇。

Peccei 和 Quinn 发现如果强加某种渐近的对称性，并且如果这对称性是自发破缺的， θ 的有效值很接近 0 的结果。温伯格和我解释了 $\theta \rightarrow 0$ 的逼近可以理解为一种弛豫过程，一个直接对应 θ 的很轻的场会停在它的最低能态。这个场就是轴子场，场量子称为轴子。轴子的唯象学基本上由一个有质量量纲的参数 F 控制。它就是 Peccei-Quinn 对称性破坏的能标。

我们现在要简略阐述的是，如果轴子确实存在，它对宇宙学具有重要意义。在温度 $T \gg F$ 时，Peccei-Quinn 对称不会破缺。而当这个对称性破缺时，序参量相位的初始值在当时的视界外是随机的。我们可以通过解膨胀宇宙的标量场方程得知这些涨落如何演化。

主要结果如下：引入一个有效的宇宙粘滞系数，只要哈勃参数 $H \equiv \dot{R}/R \gg m$ ，它就能保持场不变，这里 R 是膨胀因子、 m 是轴子质量。而在相反极限 $H \ll m$ 下，场演化像轻微的阻尼振动，使能量密度以 $\rho \propto 1/R^3$ 形式衰减，就是说，联动体积包括一个固定质量。故这种场可以看成相干态下的非相对论粒子气，即玻色-爱因斯坦凝聚。同时在中间演化期也有另外的阻尼存在。我们可以粗略地说，轴子场，或是任何经典领域里的标量场，在 $H \gg m$ 时以有效宇宙学项的形式表现，在 $H \ll m$ 时则表现成冷暗物

质。非齐性微扰在其长度尺度超过表观视界尺度，即 $1/H$ 时被冻结，然后随着进入视界而开始阻尼衰减。

如果忽略暴涨的可能性，当给定了微观模型之后，宇宙的轴子密度只有唯一的结果。对 $T \sim \sqrt{M_{\text{Planck}}/F} \Lambda_{\text{QCD}}$ ，判据 $H \sim m$ 满足。在这时（甚至到现在）总视界体积包含了很多由 Peccei-Quinn 尺度而来的视界体积，按现在的宇宙学标准，还是包含一个可以忽略的能量值。因此若与目前观测结果比较，可以从统计上平均掉起始振幅 a/F 。如果我们不固定重子对光子的比率，而只是要求空间平坦，我们就应该像暴涨要求的那样，将 $F \sim 10^{12} \text{GeV}$ 作为对应于观测到的暗物质密度。假如 $F > 10^{12} \text{GeV}$ ，我们就得到太多的暗物质，我们就能推断相对重子密度小于观测值。

如果暴涨在 Peccei-Quinn 跃迁之前发生，上述分析仍然合理；但当暴涨在跃迁之后发生，事情将变得很不一样。这时 a 近似齐性的时空坐标片将被放大到非常严重的程度，每一片都远比现今观测的宇宙大。宇宙的观测量将不再包含 a/F 的良好统计样本，相反取为特定的“偶然”值。当然这是在一个更大的广度范围下，Martin Rees 称之为多宇宙 (Multiverse)，尽管这些值在其中变化，但我们仅仅是在其中一小部分里取样。

现在如果 $F > 10^{12} \text{GeV}$ ，只要起始振幅满足 $(a/F)^2 \sim (10^{12} \text{GeV})/F$ ，我们仍然可以确信轴子密度的宇宙学约束是正确的。 a/F 的实际值控制着可观测宇宙至关紧要的规律，暗物质密度也同样是很重要的。事实上它在多宇宙中不同的位置取值也可能不同。

在这种意义下，人择原理表观上是正确并且适当的。在 a/F 值很大并且轴子比重子多的区域，似乎证实了它不适合复杂结构的发展演化。轴子本身相互作用微弱因而基本上没有耗散，同时它们稀释了重子密度，使后者同样分散开来。原则上讲，实验是可以发现 $F > 10^{12} \text{GeV}$ 的。如果这得到了证实，我们将不得不说多宇宙的广大部分都不适合智慧生命存在，而且只有诉诸于人择原理来解释为何我们居住的宇宙里轴子密度如此不合逻辑地适宜。

尽管实验上并不必须，我们还是可以分析一下 $F > 10^{12} \text{GeV}$ 导致的宇宙学结果。最近我和 Tegmark、Aguirre、Rees 做了这样一个分析：我们推断，虽然

多宇宙的绝大部分存在更高比率的暗物质，如果暗物质是轴子，一个典型的观测者还是应该看到一个类似于我们现在观测到的暗物质比率（图 15）。

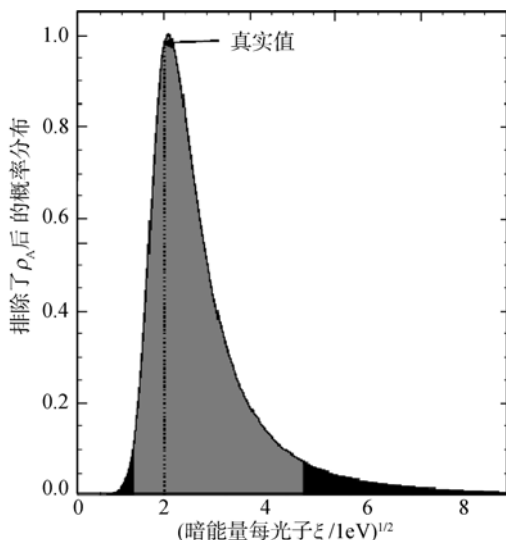


图 15 后暴涨轴子宇宙学中，在非常大尺度下轴子暗密度对普通重子密度比率的变化，这受选择效应的支配。在微观物理中已经可以决定的效应被适当地以合理的近似考虑进去。值得注意的是，我们可以看出观测到的暗物质密度实际值接近理论最可能值

这种后暴涨轴子宇宙学在很多方面都很有吸引力。它避免了传统轴子宇宙学中令人厌恶的轴子弦问题，这使我们不必引入一个新尺度，而现在 F 可以是统一尺度，或普朗克尺度。它带来了潜在的宇宙学信号，因而提供了一个较可信的等曲率涨落源，而此涨落的振幅会大于引力波的涨落，可在未来的微波背景各向异性测量中找到。同时如果低能超对称提供的暗物质不足，后暴涨轴子宇宙学可以为我们产生正确的宇宙学暗物质。所以如果 LHC 上观测到的暗物质候选者提供不了足够的暗物质，特别是如果哪怕有一点耦合的最轻的奇 R 粒子会衰变到轻的其他种类或是比宇宙学膨胀速率还快地衰变到正常物质，那么我们这个可能正确的候选暗物质源就会变得有意义了。

五、未知的领域以及如何发现它们

LHC 是不是有可能什么都找不到 LHC 是不是有可能什么新物理都找不到，我相信肯定是一个很有争议的问题。通常的答案是：“不，LHC 肯定会找到一些新粒子或者是一些新的相互作用，不然的话我们没有办法解释一些量子场论中的问题（譬如说 W 玻色子的缺失）”。然而正确答案是 LHC 确实

什么都找不到，让我来解释一下我的理由。

①分流与稀释：如果我们给标准模型再添加一个新的单态实标量场（不妨称它为“幽灵”场） η 。所有规范场和费米子的耦合，以及它们同希格斯粒子的耦合都保持不变，这一点是保持理论的规范不变性以及可重整性所必须的。但是希格斯势发生了变化，现在成了 $V(\phi, \eta) = -\mu_1^2 \phi^\dagger \phi + \lambda_1 (\phi^\dagger \phi)^2 - \mu_2^2 \eta^2 + \lambda_2 \eta^4 - \kappa \phi^\dagger \phi \eta^2$ 。 η 和标准模型唯一的联系要想满足基本原则的话，只能与希格斯场进行耦合，耦合系数为 κ 。

以上这种耦合的结果是，当 ϕ 和 η 具有真空期望值的时候，质量的本征态（可以被观测到的粒子）就会来源于标准模型中的希格斯场和幽灵场的混合，但是幽灵场和我们所熟悉的粒子（例如夸克和胶子）没有任何关系。这样同一个希格斯粒子的产生几率现在被分流成了两部分。如果想得到同样的发现，本来的信号噪音比为 $S/N=2$ ，现在是两个 $S/N=1$ 的道，这样的结果就不是很好了。

当然我们还可以继续做下去。添加更多的幽灵场，这样分流就变得更严重了。想想看，本来一个 5σ 的信号可以被认为是一个发现，但是现在假如换成 5 个独立的 1σ 的信号，那就没有什么意义了。更糟糕的是，也许幽灵场本来就是一种希格斯场，只是它属于一个我们现在还不知道的有自己规范场和物质的领域而已。这样希格斯场和幽灵场的混合也许会衰变成新领域中的粒子，而这些新领域中的粒子我们根本就观测不到。因此结果是希格斯的产生不光被分流了，还被稀释了。分流和稀释的效果很容易导致根本就找不到希格斯粒子，但是又几乎不影响到现象学的其他方面。

不过也有好的消息：如果我们从最小标准模型出发，也就是说我们的理论中只包含一个二重态的希格斯场（这样电弱对称性破缺后，就只有一个中性的标量场），这时候找希格斯的入口可能是一件很有挑战性的事情。假如希格斯的内容更丰富一些，包含带电场（像低能超对称理论一样），并且希格斯粒子可以作为衰变产物被观测的话，那么寻找到希格斯就会更容易一些。这样，一个新的领域就会向我们开启它的大门。

②一个例子——量子场论中的质量：如果我们再给标准模型加上一个 $SU(4)$ 对称性，这样规范群就变为 $G = SU(4) \times SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 。

基于相互作用统一的精神，假设 $SU(4)$ 是一种超强相互作用。它可以支持手征对称性的破缺，我们用某种 σ 模型来表示。在最简单的情况下， σ 是一个四维矢量；但它也可以是某种更复杂的矩阵。假设所有 $SU(4)$ 下的带电场都是 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 的单态，则添加的 $SU(4)$ 对称性对标准模型的修改主要是通过改变有效势来体现的： $V(\phi, \eta) = -\mu_1^2 \phi^\dagger \phi + \lambda_1 (\phi^\dagger \phi)^2 - \mu_2^2 \sigma^2 + \lambda_2 \eta^4 - \kappa \phi^\dagger \phi \sigma^2$ 。 κ 耦合和前面的情况一样，会包含混合。具有和 σ 差不多大小的非 Goldstone 场 σ_0 ，可以衰变成无质量幽灵场一样的 Nambu-Goldstone “ π 介子”。这样我们又要分流了。

考虑一下 $\mu_1^0=0$ 的情况也是件挺有意思的事情。那样我们有一个没有经典质量参数的基本模型。电弱对称性的破缺可以由幽灵场部分非微扰、内在的手征对称性破缺，通过交叉耦合 κ 实现。通过这种途径，我们得到了人工色模型的一些效果，但是没有这类模型唯象上的困难。人工色模型的困难主要是因为它们提出的强相互作用并不属于未知领域，并不是 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 的单态，而且超强凝聚本身就破坏了 $SU(2) \times U(1)$ 。

寻找未知领域的动机 我们刚才讨论的两个小模型本身并非毫无意义。相反，它们展示寻找未知领域的可能性是被鼓励的。下边我还要列举一些寻找未知领域的原因和动机。

开始的誓约：一个医生在就职时都要宣誓，保证“远离那些危险的和有害的东西”。对于我们来说，与其他一些对标准模型的扩展不同，那些未知的 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 的单态对现在的理论体系不会有多少破坏。它不会破坏关于相互作用统一的成功理论，更不会打开味道破缺的潘多拉魔盒。

堆栈和咽喉：在弦论中，未知物质可以从遥远（在额外维）的 D 膜堆栈或轨形点衍生出来。原初的 $E_8 \times E_8$ 杂化弦中就包含着未知物质的雏形。

和超对称很协调：在几种超对称的破缺机制中都涉及一些隐藏的部分。次最小超对称标准模型中 (NMSSM) 中引入了一个额外 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 单态手征超场，这种模型由于唯象的原因一直被提倡。它简化了一些根本问题。

味道和轴子：假如能把各种复杂的夸克和轻子的质量以及它们的混合看成是一个简单方程比较复

杂的解，这种想法必定是很诱人的。特别的是，更基础方程具有对称性自发破缺的味道对称性。唯象学似乎要求味道的自发破缺是在一个比较高的质量标度进行的。因此序参量场必定是 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 单态，它们构成了我们所谓的隐藏部分。在理解夸克质量矩阵（即整体相位）方面轴子物理明显具有这种特性。

给我们的疯狂带来一些现实的解决方法 未知领域同现有物理之间的联系可以用有效场论的方式比较抽象地讨论。我们寻找一些低维算符，这些算符可以包含进现在既有标准模型、又有未知领域的世界——拉氏量中。我们假设这些算符是规范和洛伦兹不变的。未知领域和自旋为 0、1/2、1 的场最简单的耦合并且量纲不高于 4 有以下四种情况。

自旋为 1：一个 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 的矢量 V^μ 有三种方式构成一个量纲为 4 的不变算符。它可以跟费米子流 $\bar{f} \gamma_\mu f$ 耦合。这种情况在很多关于“Z' 玻色子”的文献中被讨论过。矢量场还跟超荷规范曲率 $B_{\mu\nu}$ 通过流 $\partial^\nu B_{\mu\nu}$ 耦合。这样就给出了“运动学”上的混合。（它也有可能通过同对偶的流 $\partial^\nu B_{\mu\nu}$ 耦合，这样可以给出一个以 θ 作为参数的混合，不过这种情况意义似乎不大）。最后， V^μ 还可同希格斯场耦合，耦合形式为 $(\nabla^\nu \phi^\dagger) (\nabla_\nu \phi)$ 。作为希格斯场的凝聚，这导致了 V^μ 和标准模型规范玻色子在质量本征态层次上的混合。总之，运动学和质量混合都会让未知领域的粒子获得与我们熟悉的单位不尽相同的电荷（并且想来必须小很多）。

自旋为 1/2：一个 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 自旋为 1/2 的费米子场 ξ 可以通过和一个量纲为 5/2 的单态 $\phi^\dagger L$ 进行耦合得到一个量纲为 4 的不变算符，这里 L 是一个左手的轻子九重态。如果这种相互作用通过一个很小的耦合常数发生，就会得到一个有质量的狄拉克型中微子；如果耦合常数不是很小，而且 ξ 本身有一个比较大的内禀质量，我们就可以把 ξ 积分掉，得到所谓的跷跷板机制而生成一个比较小的物理的中微子质量。

自旋为 0：一个 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 自旋为 0 的粒子可以通过量纲为 2 的单态 $\phi^\dagger \phi$ 耦合。这样就可以开启通往未知领域的希格斯大门。

很明显这个框架可以帮助我们几个已有的理论组织起来，并且将通过希格斯研究未知领域的想法变

利用太阳能

何景棠 编译



太阳向地球提供大得惊人的能量，它驱动巨大的洋流和气流，令水产生蒸发和凝结的循环，给大地送来清洁的水，汇聚成河流；有时也形成破坏自然和城乡的台风、飓风和龙卷风。1906 年旧金山 7.8 级的大地震，释放出约为 10^{17} 焦耳的能量，其实这相当于太阳在 1 秒钟之内照射到地球上的能量。地球可开采的石油资源，估计约为 3 万亿桶，约合 1.7×10^{22} 焦耳能量，这相当于太阳在一天半之内照

射到地球上的能量。人类 1 年内消耗的能量约为 4.6×10^{20} 焦耳，这相当于太阳在 1 小时之内照射到地球上的能量。太阳向地球连续输送的巨大能量，功率约为 $1.2 \times 10^5 \text{TW}$ ($1 \text{TW} = 10^{12}$ 瓦 = 1 万亿瓦)，胜过任何其他可再生或不可再生的能源，大大超过了人类日常生活所产生及利用的能源（约为 13TW ）。

利用太阳能可以采取不同形式（图 1）。太阳能电池产生激发电子，把太阳光转变成电能；通过绿色植物中的自然光合作用或人造工程系统中的人造光合作用，把太阳光转变成化学燃料；聚焦或非聚焦的太阳光可以产生热能，可以直接利用或进一步转变成电能。

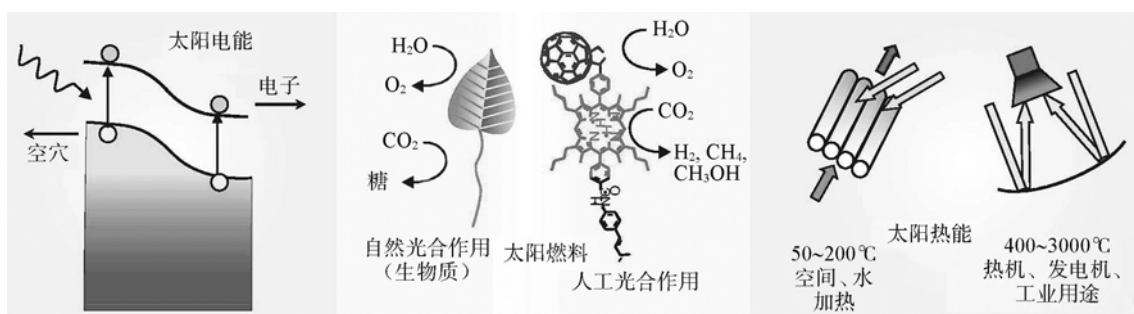


图 1 太阳光转换成三种形式的能源：电能、化学燃料和热能

成切实可行的。

六、总结与结论

伴随着大型强子对撞机的运行，我们将在以下方面拓展基本物理学的前沿：

- 通过一些杰出的物理学研究，我们将理解什么使真空表现为宇宙超导体。
- 我们将会明白已有的关于统一与超对称的想法是大自然的启示还是嘲弄我们的臆想。
- 超对称世界如果确实被打开，它将可能提供一个很好的暗物质的候选者。那时，确定或推翻这个候选者将是一个非常雄心勃勃的想法。
- 希格斯粒子的存在完全是有可能的。在短期内它可能是一个复杂工程，但是从长远来看，它将给我们很多启迪。

即将来到的将是一个黄金岁月，它同样可以因低能区物理的高精度实验（基本电偶极矩），稀有

过程的测量（质子衰变），以及宇宙学上的发现（原初宇宙的各向同性或者引力波振荡）而更加丰富。

鉴于时间和讨论的范围，我已经在选题上带有很大的针对性，而且即使是所讨论的话题也是很粗略的。但是，我仍然希望已经告诉你们关于在接下来的几年中人类预期取得重大进展的一些雄心勃勃的议题和预想。

（王玉明、张海青、邹浩，北京市中国科学院高能物理研究所 100049；李学潜，天津市南开大学物理学院 300071）

本文译自美国麻省理工学院教授、2004 年诺贝尔物理学奖得主 Frank Wilczek 2007 年 2 月发表在 <http://arxiv.org/> 上的文章 *Anticipating a New Golden Age* (hep-ph/07084236)。

*[译者注] Superwimp 是 wimp（即有质量且参与“比较弱”的相互作用的粒子，“比较弱”是说其相互作用不会比弱相互作用强，比如引力作用或弱作用）的一种，可以认为是引力子的超对称伴子。