

电磁波在真空中的衰变与宇宙学红移

肖立业^{1,2}, 伍岳¹

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 真空充满了量子涨落和真空零点能,这已经被多方面的实验所证实。电磁波在真空中传播时,可能会与真空发生相互作用而衰变。本文提出了一个用于计算电磁波在真空中衰变的理论模型,该模型认为电磁波可以激发出量子谐振子(即受激量子涨落)或虚粒子对而损失能量,而所损失的能量会以其他形式再放出光子(即受激真空辐射),从而对宇宙学红移和微波背景辐射(CMB)产生贡献,并由此认为宇宙学红移和宇宙微波背景辐射之间具有内在联系。基于此模型,可以对宇宙学红移和CMB观测结果做出适当解释,计算推导表明:星光衰变红移与基于宇宙匀速膨胀模型得到的宇宙学红移量具有相同的数学形式。在此基础上,本文对“暗能量”问题等也进行了讨论。

关键词: 受激量子涨落; 受激真空辐射; 电磁波衰变; 宇宙学红移; 暗能量; 宇宙微波背景

DOI: 10.12067/ATEEE1903017

文章编号: 1003-3076(2019)04-0001-04

中图分类号: P141.91

1 引言

量子场论认为,空间中每点的场都是一个量子谐振子,因此真空也有极其复杂的结构。量子场论进一步提出了“真空不空”的观点,即在没有物质存在的真空仍充满了量子涨落并具有真空零点能。基于上述理论,荷兰物理学家 Hendrik Casimir 于 1948 年提出存在一种被后来称为 Casimir 效应的真空电磁涨落现象,并于 1996 年被证实^[1]。Casimir 效应表现为:在真空中两片平行的平坦金属板,当其距离足够小时,它们之间会产生吸引力。其原因是,中性金属板边界的出现改变了金属板周围真空电磁涨落的模式,使得板间和板外的真空零点能出现差值,因此金属板间会产生净吸引力,且距离越近则吸引力越大。Casimir 效应及其验证进一步说明了真空中量子谐振子能谱的存在。

我们知道,拉曼效应目前已经广泛应用于分子结构的测定。拉曼效应表现为:当光照射到物质上时会发生散射,散射光中除了与激发光波长相同的成分外,还有比激发光的波长更长和更短的成分,这一现象被称为拉曼效应,一般也把由分子振动、固体中的光学声子等元激发与激发光相互作用产生的非

弹性散射称为拉曼散射。拉曼效应起源于分子振动(点阵振动)与转动,因此从拉曼光谱中可以得到分子振动能级(点阵振动能级)与转动能级结构的知识。产生拉曼散射的物理机制是,当分子受到入射光照射时,处于振动基态的分子被激发到较高能态(虚态)后又回到振动激发态时,此时的散射光子能量将低于激发光子的能量(斯托克斯线);反之,当分子受到入射光照射时,处于振动激发态的分子被激发到较高能态后又回到振动基态时,此时的散射光子能量将高于激发光子的能量(反斯托克斯线);若分子被激发后回到原始状态,则散射光子的能量与激发光子的能量相等(瑞利线)。

综上所述,真空是具有某种量子谐振子能谱的体系结构,而物质分子的振动与激发光相互作用会产生拉曼效应。基于上述原因,我们自然会问一个问题:光经过真空时,也可能产生类似拉曼效应那样的光散射效应吗?假如存在这样的类似效应,同时由于真空零点能是真空可能所处的最低能态,因此不大可能出现类似拉曼效应中的反斯托克斯线,而瑞利线情形在此可以不予考虑,那么就可以认为星光在真空中的传播有发生衰变(类似拉曼效应中的斯托克斯线)的可能,从而对宇宙红移产生了部

收稿日期: 2019-03-06

作者简介: 肖立业(1966-),男,湖南籍,研究员,博导,博士,研究方向为电工理论与新技术;

伍岳(1987-),男,湖北籍,助理研究员,博士,研究方向为电工理论与新技术。

分贡献。为此,本文提出了一个用于计算电磁波在真空中衰变的理论模型,并得出新的宇宙学红移计算方式。事实上,德布罗意也曾经提出过光子疲劳效应的理论来解释宇宙学红移^[2],但其物理机制与本文提出的机制有很大的不同。本文中,星光、光波、光子等不同的用法均为电磁波。

2 理论机制与计算模型

在没有外部激励的情况下,真空量子涨落是自发产生。本文假设量子涨落也可通过光子激发而产生,此过程可被称为受激量子涨落(Stimulated Quantum Fluctuation, SQF)。由光子激发产生受激量子涨落,会使得真空短暂处于不稳定高能态。与分子的拉曼效应类似,SQF可能会出现这种情况,即激发光子可能会将全部能量用于激发一个较高能态的量子谐振子,较高能态的量子谐振子回到较低能态的激发态,释放出一个光子,然后较低能态的量子谐振子回到零点时,再释放另外一个光子。为保持动量守恒,在此过程中释放出来的两个出射光子仍然保持激发光子原来的行进方向。由于真空零点能是真空所处的最低能态,故也不会出现出射光子能量大于激发光子能量的情况(类似拉曼效应中的反斯托克斯线情形),而类似拉曼效应中的瑞利线在此不用考虑。或可以按照另外一种理解方式,光子可以激发出一对虚粒子对,同时自身变成了两个光子或多个光子,而虚粒子对随后会立即湮灭。通过以上物理机制,电磁波在真空中的传播过程就有可能发生衰变,变成了两个乃至多个光子。因此,在宇宙空间行进的星光,就会不断地损失能量,从而对宇宙学红移产生贡献,同时由上述机制而损失能量会以电磁波形式释放(也可称之为受激真空辐射,Stimulated Vacuum Radiation, SVR),从而也对宇宙微波背景辐射(Cosmic Microwave Background, CMB)产生了贡献。

由于星光在宇宙真空行进时激发 SQF 或者虚粒子对是一个概率事件,行进距离越长则激发一个 SQF 事件或者虚粒子对的可能性越大,因而在达到在某个临界距离上,就有几乎 100% 的概率会激发一个 SQF 事件或虚粒子对。同时,我们假定激发光子的能量(频率)越高,则激发一个 SQF 事件或虚粒子对的可能性越大。因此,在宇宙大尺度上来看,星光因激发量子涨落或虚粒子对而损失的能量与距离和频率的微分关系可以简单地表示为:

$$df = -kf dx \quad (1)$$

式中, f 为光的频率; x 为星光行进的距离; k 为与真空性质有关的常数,可以通过观测数据推算得到。关于常数 k 值的意义,将在下文进行讨论。由式(1)可以得到星光频率随距离的变化关系为:

$$f = f_0 e^{-kx} \quad (2)$$

式中, f_0 为星光发出时的频率。由式(2)可以得到星光的红移量与距离的关系为:

$$1 + z = e^{kx} \quad (3)$$

式中, $z = \Delta\lambda/\lambda$, λ 为星光发出时的波长, $\Delta\lambda$ 为星光行进过程中的波长变化量,以下称 $\Delta\lambda$ 为受激真空辐射红移(SVR 红移)。当 $kx \ll 1.0$ 时,式(3)泰勒级数展开的一阶近似即为:

$$z = kx \quad (4)$$

如果定义 $k = H/c$, 则式(4)可以表示为:

$$z = \frac{Hx}{c} \quad (5)$$

式(5)就是著名的哈勃定律,是哈勃于 1929 年对近距离星系观测得到的结果,其中 H 为哈勃常数, c 为真空中的光速。哈勃定律在不太远距离的宇宙尺度上,与实际情况符合得很好,对应于本理论模型的一阶近似。因此,根据观测数据确定哈勃常数后,就可以得到常数 k 。

总之,由该理论机制可以适当地解释宇宙学红移和宇宙微波背景辐射的来源,并可以将哈勃定律作为其一阶近似。

3 宇宙学红移的计算

按照现代宇宙学的观点,不存在一个静态的宇宙。根据 FLRW (Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker) 宇宙模型,在宇宙常数项为零时,允许存在一个均匀且各向同性的宇宙以均匀的速度膨胀^[3]。因此,在考虑宇宙学红移时,即使 SVR 红移有实质性贡献,也还应考虑宇宙膨胀的贡献(以下我们称之为膨胀红移)。为此,我们首先来讨论一个均匀且各向同性的宇宙以均匀速度膨胀时的宇宙红移。

两个天体相互退行示意图如图 1 所示,天体 A 和 B 在 $t = t$ 时刻相距 x , 在 $t = t + dt$ 时刻相距 $x + dx$; $t = t$ 时刻的相对退行速度为 v , 在 $t = t + dt$ 时刻的相对退行速度为 $v + dv$ 。由于宇宙以均匀的速度膨胀,则有:

$$\begin{cases} v = hx \\ v + dv = h(x + dx) \end{cases} \quad (6)$$

式中, h 为退行速度与距离的关系,与哈勃关系含义

相同,先假定 h 与 H 不同,因此暂时定义为 h (不是普朗克常数)。由式(6)可得 $dv = hdx$, 由于 $dx = vdt$, 因此可得:

$$dv = hvd t \quad (7)$$

因此,天体 A 和 B 相对退行速度随时间的变化关系为:

$$v(t) = v_0 e^{ht} \quad (8)$$

式中, v_0 为 $t = 0$ 时刻的相对退行速度。由于天体的相对退行速度与距离成正比,则可得:

$$x(t) = x_0 e^{ht} \quad (9)$$

式中, x_0 为天体 A 和 B 在 $t = 0$ 时刻相互之间的距离。

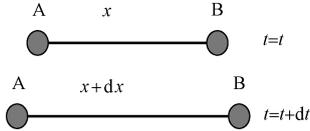


图1 两个天体相互退行示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two celestial bodies retreating

膨胀红移的物理机制可理解为:光波在行进过程中,由于空间的膨胀,光波被拉长了(而非相对退行速度造成的多普勒红移效应)。为此,光波波长的变化应该按照宇宙标度因子变化关系来计算,即可按照光子从出发的天体 A 到达接收天体 B 的过程中两个天体之间的距离变化关系来计算,即有:

$$\frac{\lambda + \Delta\lambda}{\lambda} = 1 + z = \frac{x}{x_0} = e^{ht} \quad (10)$$

也就有:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = z = e^{ht} - 1 \text{ 或 } \frac{d\lambda}{\lambda} = e^{ht} - 1 \approx hdt \quad (11)$$

由于有以下关系:

$$d\lambda = \frac{c}{f + df} - \frac{c}{f} = \frac{cdf}{f(f + df)} \approx -\frac{cdf}{f^2} = -\lambda \frac{df}{f} \quad (12)$$

式中,随着光的波长被拉长,频率会降低,因此 df 应该为负值。根据式(11)和式(12)可得:

$$df = -fhdt \text{ 或 } df = -f \frac{h}{c} dx = -k_0 f dx \quad (13)$$

式中,定义 $k_0 = h/c$ 。现在重新回到式(1),即星光因激发量子涨落或虚粒子对而损失的能量(即频率)与距离和频率的微分关系。如果在光行进过程中,光波被同时拉长了,即光波频率在因激发量子涨落或虚粒子对而变小的基础上进一步变小,则有:

$$df = -k f dx - k_0 f dx = -(k + k_0) f dx \quad (14)$$

因此,在综合考虑 SVR 红移和膨胀红移后,式(3)可以变成以下关系:

$$1 + z = e^{(k+k_0)x} = e^{kx} e^{k_0 x} \quad (15)$$

如果将红移表示为时间的函数关系,则有:

$$1 + z = e^{(k+k_0)ct} = e^{kct} e^{k_0 ct} \quad (16)$$

由此可见,由电磁波在真空中的衰变造成的红移,与宇宙匀速膨胀情况下的膨胀红移具有完全相同的数学形式,其共同造成的宇宙红移可简单地合并为式(15)的关系。SVR 红移和膨胀红移具有完全相同的形式,故我们无法仅仅通过宇宙学红移的测量来区分它们,这是巧合还是意味着更深层次的问题,我们目前尚不清楚。式(15)说明,我们观测到的宇宙学红移,不能全部归根于宇宙膨胀的贡献。同时,式(15)允许 $k_0 < 0$ (其中, $k+k_0 = H/c$, H 也即哈勃常数观测值),也就是说,它可以允许宇宙出现收缩的情况。

至此,我们已经将宇宙学红移的起源问题做了推广,这意味着精确的宇宙学红移测量结果能够得到更加丰富的物理内涵。

4 讨论

(1)由上文的推导可知,如果 SVR 红移贡献了宇宙红移一部分的话,则在实际中需要区分 SVR 红移和膨胀红移各自的贡献。尽管在式(15)中,我们对 SVR 红移和膨胀红移有关的两个常数进行了合并,但其物理意义却有很大的差别, k 是与真空某种性质直接有关的项,而 k_0 是宇宙膨胀项。随着宇宙的不断膨胀和演化,真空性质也可能发生了较大的变化,导致 SVR 红移的常数项发生了变化。因此,对于已经观测到的宇宙加速膨胀和存在暗能量的证据^[4],是否能够真正确信其为加速膨胀和暗能量的问题,就需要重新审视。也许我们需要进一步的宇宙观测实验来区分 SVR 红移和膨胀红移的各自贡献后才能下确定的结论。根据有关观测结果认为^[5],大约 100 多亿年前(对应红移 $z = 1.9$)是恒星生成的高峰期,而今天能够观测到的恒星的 50%是在 $z = 1.3$ 的时间前形成的。由于恒星的大量形成,宇宙开始变得更加明亮起来,因而受激量子涨落或受激虚粒子对的产生会变得更加活跃起来,由于量子谐振子与相邻谐振子可以产生相互作用,从而可能导致更加频繁的受激真空涨落或受激虚粒子对生成事件,表现为 SVR 红移的常数项 k 在某个时期开始增大了,从宇宙学红移角度来看,其效果等同于

“宇宙加速膨胀”的情况。如果可以进一步证明这一点,则可以将暗能量选项排除在外。如果 $k_0 < 0$, 且其绝对值在某个时刻开始减少,宇宙学红移效果也等同于“宇宙加速膨胀”的情况。

(2)考虑到宇宙在大尺度上是均匀和各向同性的,因此星光密度总体上也是均匀和各向同性的,因而受激真空辐射(SVR)也大体上是均匀和各向同性的,并对宇宙背景辐射至少产生了部分贡献。由于真空存在受激量子涨落,因而真空所处的能态为激发态,等同其温度 $T > 0\text{K}$,受激真空辐射就可以等同 $T > 0\text{K}$ 时的黑体辐射。此外,由于 SVR 可能受真空某种性质的影响,代表这种性质的参数如果在局部有差异,也会导致 CMB 出现局部差异;星光密度的局部差异,也会造成 CMB 在空间分布中的局部差异。这也许能够在某种程度上对 CMB 观测结果的局部差异给出一定程度的定性解释。同时,由于远处的 SVR 在行进过程中进一步激发新的受激量子涨落或虚粒子对,并产生新的辐射(也就是说,SVR 本身也会有红移),因此,我们预计实际探测到的宇宙背景辐射谱中,其长波部分的辐出度也许较 2.7K 绝对黑体辐射谱对应波长的辐出度更大、而短波部分的辐出度可能会更小,因此更加精确的 CMB 观测结果也许是验证 SQF 是否存在的方法之一。

总之,本文提出了受激量子涨落和受激真空辐射的概念和物理机制,基于此机制,可对宇宙学红移和宇宙微波背景辐射观测结果给予适当的解释,并

认为宇宙学红移和宇宙微波背景辐射之间具有内在的联系。计算推导表明,宇宙膨胀红移和受激量子涨落造成的红移具有相同的数学形式,因此只有通过进一步的实验来确认其各自的贡献,才能对暗能量问题做出更加准确的结论性意见。

致谢:感谢中国科学院电工研究所林良真老师和中国科学院天文台田文武研究员的有益帮助,感谢同事张东、研究生腾尚甫和艾力旺同学的有益支撑。

参考文献 (References):

- [1] Lamoreaux S K. Demonstration of the Casimir force in the 0.6 to $6\mu\text{m}$ range [J]. *Physical Review Letters*, 1997, 78 (1): 5-8.
- [2] Croca J R. De Broglie tired light model and the reality of the quantum waves [J]. *Foundations of Physics*, 2004, 34 (12): 1929-1954.
- [3] 罗杰-彭罗斯 (Roger Penrose). 通向实在之路-宇宙法则的完全指南 (The road to reality: A complete guide to the laws of the universe) [M]. 王文浩 (Wang Wenhao) 译,长沙:湖南科学技术出版社, (Changsha: Hunan Science & Technology Press) 2016, 27: 514-518.
- [4] Perlmutter S, Aldering G, Goldhaber G, et. al. Measurements of Omega and Lambda from 42 high-redshift supernovae [J]. *Astrophysical Journal*, 1999, 517 (2): 565-586.
- [5] Madau P, Dickinson P. Cosmic star-formation history [J]. *Annual Review of Astronomy And Astrophysics*, 2014, 52: 415-486.

Decay of electromagnetic waves in vacuum and cosmological redshift

XIAO Li-ye^{1,2}, WU Yue¹

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The vacuum is full of quantum fluctuations and zero point energy (ZPE), which has been confirmed by various experiments. Then, when an electromagnetic wave propagates in a vacuum, it may decay by interacting with the vacuum. In this paper, a theoretical model is proposed for calculating the decay of electromagnetic wave in vacuum. In this model, electromagnetic waves can excite quantum harmonic oscillator (i. e., Stimulated Quantum Fluctuations, SQF) or virtual particle pair, and then lose energy. The lost energy will reproduce photons in other forms (i. e., Stimulated Vacuum Radiation, SVR), thus contributing to cosmological redshift and Cosmic Microwave Background (CMB). Based on this theoretical model, the observation results of cosmological red shift and CMB can be properly interpreted. The calculation also shows that the redshift of starlight originated from both of SQF and expansion has the same mathematical form. Based on the above calculations, the “dark energy” problems are also discussed.

Key words: stimulated quantum fluctuations (SQF); stimulated vacuum radiation (SVR); decay of electromagnetic waves; cosmological redshift; dark energy; cosmic microwave background (CMB)