

D0 和 TOTEM 实验证实 三胶子胶球存在

乔从丰¹ 汤亮²

(1. 中国科学院大学 101408; 2. 河北师范大学 050024)

2021年3月5日,费米实验室太电子伏质子加速器(Tevatron)的D0合作组与大型强子对撞机(LHC)的TOTEM合作组联合宣布发现了奇异子(Odderon)的实验证据,相关论文已提交到了物理专业最著名的杂志《物理评论快报》(PRL)^①。其中,Tevatron是正反质子($p\bar{p}$)对撞,LHC上是质子-质子(pp)对撞。这是实验上首次报道探测到了奇异子。

奇异子是理论物理学家在大约50年前就已预测的一种新型复合粒子^{②③},它在一种名为电荷共轭变换的操作下会出一个负号(即 $C=-1$);而与之相对应的 C 宇称为+1的强子态称为坡密子(Pomeron)^④,坡密子具有真空量子数。奇异子除 C 宇称为-1之外,也有定义其 P 宇称变换下为-1^⑤。理论预言,坡密子对 $p\bar{p}$ 弹性散射和 pp 弹性散射截面的贡献相同,而奇异子则不同。奇异子在两种散射过程中造成的不同正是实验物理家孜孜不倦努力找寻的目标。现在,D0和TOTEM终于实现了重大的突破。图1展示的是D0正反质子实验(蓝色圆点)和TOTEM质子-质子实验(红色三角形)的弹性微分散射截面的比较,研究人员发现从该图中能看到理论预言的奇异子的显著特征,即:蓝色圆点和红色三角形都存在一个比较尖的谷底,且红色三角形位于蓝色圆点下方;紧随其后,两者又都出现一个凸起的峰,这时两者的大小又基本相符^①。

坡密子和奇异子都是由胶子构成的,不含价夸克。在基本粒子理论中,胶子是一种传递强相互作用的媒介粒子(也被称为强力)的媒介粒子。胶子将夸克紧紧地“胶合”在一起,从而形成质子、中子等构成这个

世界基本物质的粒子——强子。胶子在粒子物理标准模型中的地位和性质如图2所示,位于图的右上部,用字母 g 表示。

强力是自然界中的四种基本力之一,解释强力的理论被称为量子色动力学(QCD)。QCD理论下,夸克和胶子携带色荷。正如带电粒子通过彼此交换光子而产生电磁力,带色的夸克之间也会交换胶子。上面提到的胶子是负责传递强力的载体粒子。但是胶子与光子相比还是有差别的。光子是电中性的,但胶子本身也携带色荷,所以它们对自己也有作用力(图3)。这就产生了一个有趣的问题:能不能不要夸克,找到一种完全由相互粘连的胶子组成的物质呢?

胶球就是这样一种只含胶子不含价夸克的强

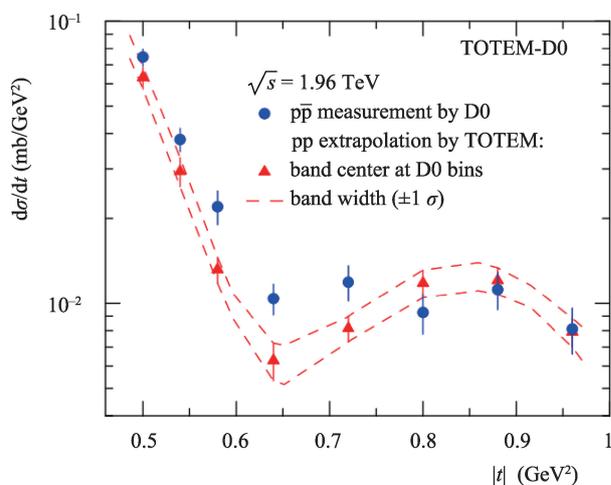


图1 比较D0正反质子实验(蓝色圆点)和TOTEM质子-质子实验(红色三角形)的弹性微分散射截面, $|t|$ 表示散射转移动量平方的绝对值。其中数据点上的竖线表示误差,虚线显示1倍的标注偏差范围。(图片来源于文献^①)

粒子物理标准模型

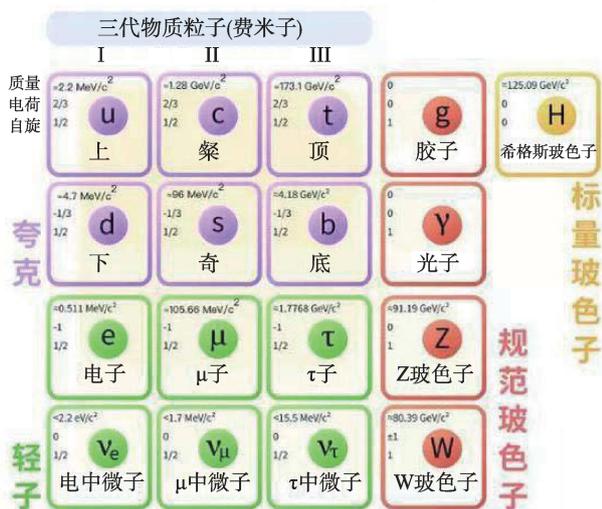


图2 标准模型中强力的规范粒子为胶子(图片来源于网络)

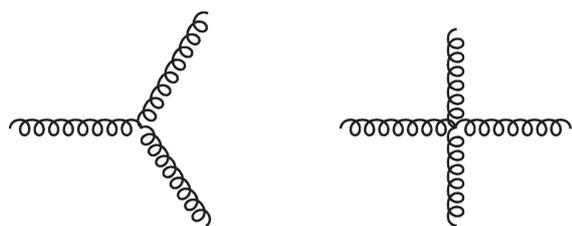


图3 胶子自相互作用顶点图

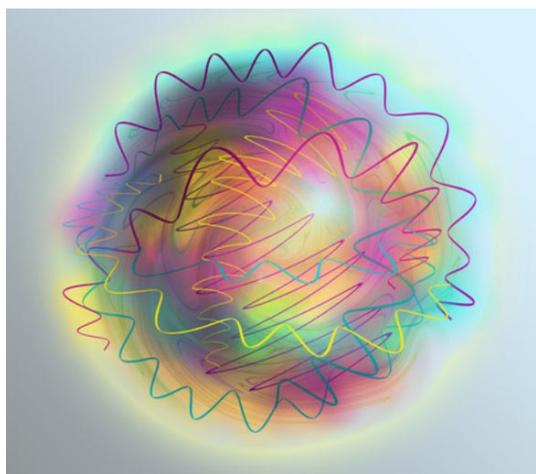


图4 胶球想象图(图片来源于网络)

子态。简言之,胶球由两个、三个或更多胶子构成。2021年3月16日,欧洲核子研究中心(CERN)官网以“*The TOTEM collaboration at the LHC and the DØ collaboration at the Tevatron collider at Fermilab have discovered an elusive state of three gluons*”为副

标题报道了这次的新实验结果^⑥,文中阐明 pp 或 pp 弹性散射在 TeV 量级是通过交换坡密子和奇异子发生相互作用的,它们是以虚的胶球态形式出现的;其中,奇异子发生在动量转移的中间能区。因此,坡密子和奇异子也可以视作胶球。虽然实验关于奇异子的证据并没有直接测量到胶球,但是对于进一步寻找胶球态是具有重要意义的。

在实验方面,虽然从20世纪70年代开始就发现了胶球的“证据”,但是迄今为止仍然没有胶球的确定的证据,尽管已经寻找了许多年。因为胶球一般总是与其他普通的介子束缚态一同产生,胶球的信号中都可能混杂着任意数量的电中性的强相互作用粒子,如泥沙俱下,所以实验上很难在粒子加速器中探测到它。实验上为寻找胶球态做了大量的工作,例如,1982年,实验家发现存在超出夸克模型预言数量的 0^{++} 介子态^⑦,进而认为这有可能是夸克强子与胶球构成的混合态,如图5所示;此外文献^⑧认为如果把新发现的两个 2^{++} 态看作胶球便可以解释反应中的 OZI 压低破坏现象。随后,实验上还有其他一些类似的关于胶球存在的“线索”,然而并没有给出其他更明确的结论。理论研究表明通过现有的对撞机和探测器水平,已经达到了胶球产生和探测的水平。但是,由于上述种种困难,直到2020年,胶球依然只是有迹象,没有得到明确认证。物理学家等待“胶球”出现已经等了整整五十多年!

即使我们最终也未能成功分离出一个胶球,至少有一个地方物理学家会相信它会出现,那就是在正反质子对撞机(Tevotran)或大型强子对撞机(LHC)中,当质子在衍射(弹性散射)相互作用中进

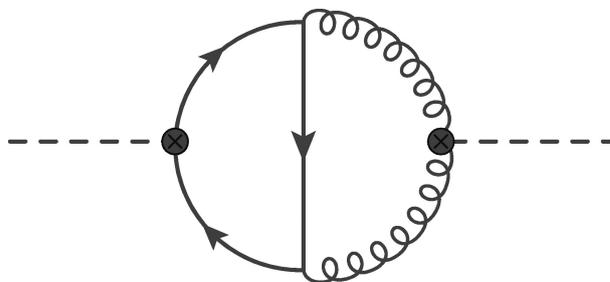


图5 两胶子胶球与正反夸克态间混合示意图。其中,划线代表介子,含箭头的实线代表夸克,螺旋线表示胶子

行能量交换时会出现。这便是上文提到的坡密子和奇异子。令人欣喜的是,近期D0和TOTEM合作组关于奇异子的发现从实验探测方面给出了胶球存在的确切证据。找到了奇异子,就意味着找到了胶球。这是一个里程碑式的实验结果,这就不难理解D0和TOTEM合作组的实验结果为何成为粒子物理中的热点话题。

在理论方面,胶球是由QCD理论预言存在的一类复合粒子。对于胶球,理论物理学家发现依据量子数可以把它分为两类,一类是具有常规量子数,另一类则携带奇特量子数。奇特量子数就是指 $q\bar{q}$ 介子态所不具备的量子数,例如 $J^{PC} = 0^{-}, 0^{+}, 1^{+}, 2^{+}, 3^{+}, \dots$ 就是奇特量子数。我们把携带奇特量子数的叫做奇特胶球(oddball)。

胶球 $\left\{ \begin{array}{l} \text{常规量子数胶球 (例如, } 0^{++}, 2^{++}) \\ \text{奇特量子数胶球 (例如, } 0^{-}, 0^{+}, 1^{+}, 2^{+}, 3^{+}) \end{array} \right.$

那么怎么确定胶球的量子数呢?如前文所述,胶球可以由2个胶子构成,也可以由3个或更多的胶子构成。在量子数方面,基于QCD的要求,2个胶子胶球的C宇称必定为正,对于轨道量子数 $L=0$ 的基态胶子球而言,自旋宇称量子数只能为 0^{++} 或 2^{++} (由于朗道-杨定理的限制,两胶子胶球不可能具有 $J=1$ 的态);三胶子胶球C宇称可正可负。由此我们不难理解,文献①中为何会宣称该奇异子至少是由3个胶子构成的了。

自QCD诞生以来,胶球问题就一直是一个令人十分感兴趣的课题。迄今为止,人们提出了多种理论方案研究胶球问题,例如:格点QCD理论、口袋模型、流管模型、库仑规范理论、AdS/QCD和QCD求和规则等方法。理论上预言最轻的标量两胶子胶球($J^{PC} = 0^{++}$)的质量介于1~2 GeV之间(1 GeV=1000 MeV=10亿电子伏特,1个电子伏特是把1个电子移动1个伏特的电位差所需要的能量),其他量子数胶球质量会高于2 GeV。

胶球的研究需要知道QCD真空的性质,而这涉及非微扰QCD,不可能通过标准的QCD微扰计算得到。格点QCD理论是从QCD第一原理出发,能

够处理QCD非微扰能区物理问题的数值计算方法,是目前相对最可靠的方法。不过,即便格点QCD理论计算也需要输入一些参数,比如格点的格距,此外该方法还依赖计算机的计算能力。应用格点QCD理论研究胶球已有比较长的历史,我们举例介绍一下该方法得到的一些结果,如表1和图6所示。

表1 格点QCD结果-淬火近似下两胶子基态胶球的质量(单位:MeV),其中括号内数字表示误差

J^{PC}	Bali <i>et al.</i> ^⑨	Morningstar <i>et al.</i> ^⑩	Chen <i>et al.</i> ^⑪
0^{++}	1550(50)	1730(50)	1709(49)
2^{++}	2270(100)	2400(25)	2388(23)
0^{-+}	2330(260)	2590(40)	2557(25)

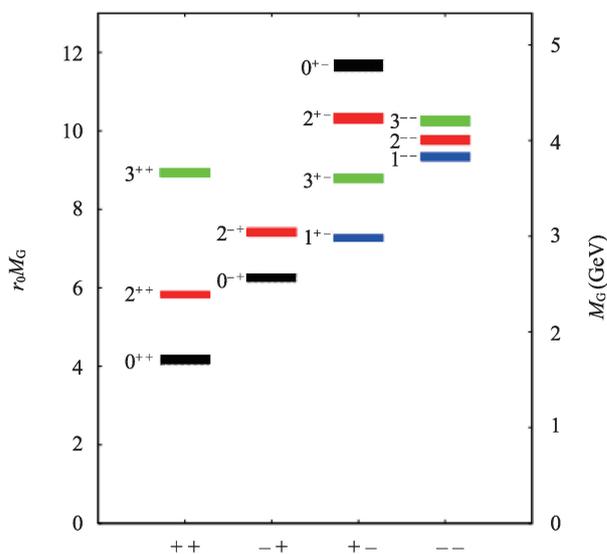


图6 格点理论中淬火近似下的胶球质量^⑩

从举例给出的格点QCD的计算结果可以看出,格点QCD理论对胶球态已经做了比较全面的研究,得到数目可观的胶球质量。不过,我们发现该方法对奇特胶球的研究还比较有限。我们期待随着计算机计算能力的提升格点QCD理论能够给出更多关于奇特胶球的计算结果。

弦理论是另一种可描述强相互作用的理论。该方法发展中的一个里程碑是Maldacena提出的共形场与弦理论在Anti-de Sitter时空下的等价性。AdS/QCD就是建立在该理论上可以计算胶球质量的方法,在这种方法下计算给出的胶球质量如图7所示^⑫。结果显示,2胶子胶球和3胶子胶球质量与

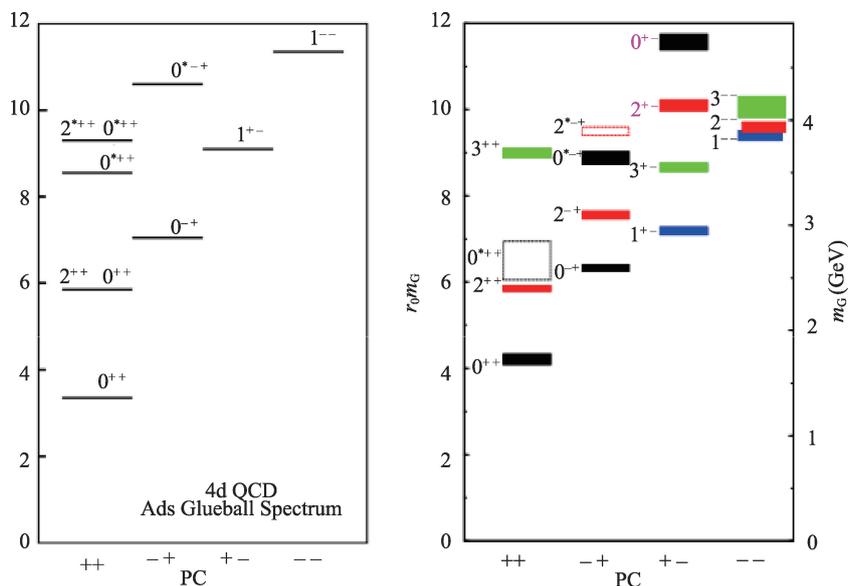


图7 AdS/QCD胶球质量谱与格点QCD结果比较图,左边是AdS/QCD结果,右边是格点QCD结果,每个图的右侧纵轴单位为 GeV^3

格点QCD理论计算结果大体一致。

QCD求和规则被广泛应用于强子唯象学领域,它在处理非微扰问题上取得了巨大的成功,这一方法最早是由M.A.Shifman、A.I.Vainshtein、V.I.Zakharov三人于1978年提出的。最初,人们应用该方法研究了较为简单的两胶子胶球^{⑬⑭},之后不久也出现了一些关于三胶子胶球的研究工作^{⑮-⑰}。

QCD求和规则的出发点是两点关联函数:

$$\Pi(q^2) = i \int d^4x e^{iqx} \langle 0 | T \{ j_G(x), j_G(0) \} | 0 \rangle, \quad (1)$$

其中 $j_G(x)$ 和 $j_G(0)$ 是胶球的内插流, q 是内插流的四动量。例如,对于标量胶球,内插流为:

$$j^{0^{++}}(x) = \alpha_s G_{\mu\nu}^a(x) G^{a,\mu\nu}(x), \quad (2)$$

其中 α_s 是强力的耦合参数, $G_{\mu\nu}^a(x)$ 是胶子场强张量, a 是颜色指标, μ, ν 是洛仑兹指标。

下面列举一些基于QCD求和规则得到的自旋为0或1的两胶子或三胶子胶球的质量,如表2所示。

表2 QCD求和规则下胶球的质量举例(单位:GeV), “---”表示不存在。

J^{PC}	两胶子胶球质量(GeV)	三胶子胶球质量(GeV)
0^{++}	1.66 ^⑬	3.1 ^⑮
0^+	2.2 ^⑭	1.9~2.7 ^⑯
1^-	---	2.4 ^⑰
1^+	---	1.87 ^⑱

在三胶子胶球研究的历史中,人们依据从简单到复杂的原则,最先选定的研究对象是标量三胶子胶球(0^{++})。然而,由于它既会与正反夸克标量介子混合,又会与前面提到的标量两胶子胶球混合,以至于实验上很难剖析出它存在的迹象。幸运的是,由于 0^- 三胶子胶球(既是奇特胶球又是奇异子)不会与正反夸克强子混合,且总自旋为0,所以它们在实验探测方面具有特殊的优势。如此一来, 0^- 三胶子胶球的理论研究在胶球的研究中具有特别重要的地位。

本文作者曾经首次应用QCD求和规则方法研究了 0^- 奇特胶球的能谱^⑲,结果显示存在两个 0^- 奇特胶球,质量分别为3.81 GeV和4.33 GeV。与早前其他常规量子数胶球质量的估计不同,这些 0^- 奇特胶球质量在4 GeV左右,比较重。随后,我们还研究了 $0^+, 1^+$ 和 2^+ 奇特胶球^⑲,得到了一个质量为4.57 GeV的 0^+ 态和一个6.06 GeV的 2^+ 态。不过,我们指出,虽然奇特胶球不与普通介子态混合,但是奇特胶球理论上可以和某些特定的态发生混合,譬如说四夸克态和混杂态(夸克-胶子态)。不过鉴于它们的组分数量的增加,耦合强度会有较大压低,所以通常可以忽略这类混合。

表3 我们基于QCD求和规则得到的奇特胶球质量^⑳

J^{PC}	0^-	0^-	2^-
质量(GeV)	3.81, 4.33	4.57	6.06

QCD求和规则是强子物理研究中重要的理论方法,在强子谱学研究中取得过很多重要的结果,但是该方法应用于胶球的研究有很大的不确定性,这从QCD求和规则与格点计算的较大差别可以看出。其原因除了该方法本身的误差而外,更重要的原因是我们对胶子场构造的流算符与真实的物理之间的差别很难估算,格点上的胶子场不是确定数量的组分胶子的行为,而求和规则仅仅计算的是组分胶子耦合流的行为。

由格点QCD理论、AdS/QCD和QCD求和规则方法得到的结果可以看出,各种角动量三胶子胶球的质量在3~5 GeV附近^{⑩⑪⑫⑬}。

如本文开始所说的那样,近日,D0和TOTEM合作组报告的实验结果显示在5倍的标准偏差(确认发现一个粒子的统计性要求)范围内,首次发现电荷共轭变换宇称为负($C=-1$)的三胶子胶球。这非常可能就是曾经计算并预言过的 0^- 奇特胶球,或许还有一些其他量子数三胶子胶球的贡献^{⑭⑮}。

奇异子的成功探测为理解粒子物理标准模型,特别是QCD提供了重要的信息,会加深我们对QCD本质的理解。这是QCD研究中的又一重大成就,令人兴奋。但毕竟这次是间接测量的实验结果;实验上能直接探测到胶球,并确定其物理性质将更加令人期待。目前有若干理论和实验组都在开展这方面的探索,希望不久的将来,能够取得突破,让胶球直接现身。

参考文献

① V. M. Abazov *et al.* [D0 and TOTEM], Comparison of pp and $\bar{p}\bar{p}$ differential elastic cross sections and observation of the exchange of a colorless C-odd gluonic compound, [arXiv:2012.03981 [hep-ex]].
 ② L. Lukaszuk and B. Nicolescu, A Possible interpretation of p p rising total cross-sections, *Lett. Nuovo Cim.* 8, 405-413 (1973).
 ③ S. Nussinov, Colored Quark Version of Some Hadronic Puzzles, *Phys. Rev. Lett.* 34, 1286-1289 (1975).

④ I. Y. Pomeranchuk, *Sov. Phys.* 7, 499(1958).
 ⑤ C. Ewerz, “The Odderon in quantum chromodynamics,” [arXiv: hep-ph/0306137 [hep-ph]].
 ⑥ <https://home.cern/news/news/physics/totem-and-do-collaborations-announce-odderon-discovery>.
 ⑦ A. Etkin, K. J. Foley, R. S. Longacre, W. A. Love, T. W. Morris, S. Ozaki, E. D. Platner, V. A. Polychronakos, A. C. Saulys and Y. Teramoto, *et al.* “Evidence for Two New 0^{++} Mesons and a Possible Scalar Decuplet,” *Phys. Rev. D* 25, 2446 (1982).
 ⑧ A. Etkin, K. J. Foley, R. S. Longacre, W. A. Love, T. W. Morris, E. D. Platner, V. A. Polychronakos, A. C. Saulys, C. D. Wheeler and S. J. Lindenbaum, *et al.* “The Reaction $\pi^- p \rightarrow \phi \phi n$ and Evidence for Glueballs,” *Phys. Rev. Lett.* 49, 1620 (1982).
 ⑨ G. S. Bali *et al.* [UKQCD], “A Comprehensive lattice study of SU(3) glueballs,” *Phys. Lett. B* 309, 378-384 (1993).
 ⑩ C. J. Morningstar and M. J. Peardon, “The Glueball spectrum from an anisotropic lattice study,” *Phys. Rev. D* 60, 034509 (1999).
 ⑪ Y. Chen, A. Alexandru, S. J. Dong, T. Draper, I. Horvath, F. X. Lee, K. F. Liu, N. Mathur, C. Morningstar and M. Peardon, *et al.* “Glueball spectrum and matrix elements on anisotropic lattices,” *Phys. Rev. D* 73, 014516 (2006).
 ⑫ R. C. Brower, S. D. Mathur and C. I. Tan, “Glueball spectrum for QCD from AdS supergravity duality,” *Nucl. Phys. B* 587, 249-276 (2000).
 ⑬ T. Huang, H. Y. Jin and A. L. Zhang, “Determination of the scalar glueball mass in QCD sum rules,” *Phys. Rev. D* 59, 034026 (1999).
 ⑭ H. Forkel, “Direct instantons, topological charge screening and QCD glueball sum rules,” *Phys. Rev. D* 71, 054008 (2005).
 ⑮ J. I. Latorre, S. Narison and S. Paban, “ 0^{++} TRIGLUONIUM SUM RULES,” *Phys. Lett. B* 191, 437-441 (1987).
 ⑯ G. Hao, C. F. Qiao and A. L. Zhang, “ 0^{++} trigluon glueball and its implication for a recent BES observation,” *Phys. Lett. B* 642, 53-61 (2006).
 ⑰ J. P. Liu and D. H. Liu, “Determination of the mass of the 1^{--} vector glueball from quantum chromodynamics sum rule,” *Chin. Phys. Lett.* 7, 252-255 (1990).
 ⑱ W. T. Lu and J. P. Liu, “Quantum chromodynamics sum rules for the 1^{+-} vector odd glueball,” *Chin. Phys. Lett.* 13, 340-342 (1996).
 ⑲ C. F. Qiao and L. Tang, “Finding the 0^{--} Glueball,” *Phys. Rev. Lett.* 113, 221601 (2014).
 ⑳ L. Tang and C. F. Qiao, “Mass spectra of 0^{++} , 1^{+-} , and 2^{+-} exotic glueballs,” *Nucl. Phys. B* 904, 282-296 (2016).
 ㉑ H. X. Chen, W. Chen and S. L. Zhu, “Toward the existence of odderon as a three-gluon bound state,” [arXiv:2103.17201 [hep-ph]].