

美籍中国物理学家
李政道学术报告之一
(高能电磁和微弱作用的标度性)

一九七二年十月

说 明

一九七二年九月二十九日上午，李政道教授在北京作了题为“高能电磁和微弱作用的标度性”的报告。报告会由张文裕同志主持。参加报告会的有原子能研究所、北京大学、物理研究所等单位一百五十余人。此记录稿系由北京大学整理。

高能电磁和微弱作用的标度性

张文裕：今天我们很高兴，有机会请到李政道教授来作报告。李教授这次回国参观、探亲访友，很忙。今天给我们作报告，我们很欢迎。

李教授在国外那么多年，对祖国很关心，这次回来看到祖国的面貌变化很大，非常欢欣鼓舞。他对国内事业很关心，经常看人民日报，了解情况，给我们寄他没有发表的工作的材料。这次回来，带来了一个先进的小型电子计算机，这说明了他们对国内科学发展非常关心。我们很感激他的关心。

李教授的工作的成就和贡献，大家很了解，我不再介绍了。

今天报告的题目是：高能电磁和微弱作用的标度性。

李政道：首先要抱歉，我的中文很不行，在国外二十六年，只在家里用上海话讲家常，北方话更不会讲。对中文科学名词不知道，前两天向王先生借几本书，临时赶起

来。讲的时候，有内容不清楚的，用词不正确的，请诸位随时纠正，使我能学习。

例如，今天讲题目中，有 Scaling property, 译成了量度性。Scaling 这个词，当时英文名词就用得不太正确，事实上指无量度性、无标量性。我现在先把它叫成无标量性，暂时就用无标量性吧！（注：拟译为“标度性”）

在最近几年来，高能电磁相互作用，弱相互作用，有种种反应，反映出有无标量性现象。我们先讨论一些实验现象，随后讨论理论的基础，再讨论对将来高能物理发展的影响。

首先是年青的布约肯 (Bjorken)，他在斯坦福 (Stanford) 工作，从理论上指出了无标量性的存在。我今天的讲法和布约肯的略有不同，是用一种更直接的讲法，使理论和实验能更好的联系起来；使重子和轻子有更好的对称形式联系。

现在我们看纯轻子和半轻子的反应：

比方我们讨论

$$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-,$$

$$e^+e^- \rightarrow \text{强子}。$$

同样可以讨论：

$$\nu_\mu + \mu \rightarrow \nu_\mu + \mu;$$

$$\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + \text{强子}。$$

在这情况下微分截面可写成：

$$d\sigma = f(s, q^2, m_l, m_N) \times \begin{cases} \alpha^2 \\ G^2 \end{cases}$$

其中 m_l 和 m_N 分别是轻子的质量和核子的质量；

$s = (\text{质心系总能量})^2$ ，是洛伦兹 (Lorentz) 变换下的不变量； $q^2 = (4 \text{ 度动量转移})^2$ ，也是洛伦兹变换下的不变量； α 是精细结构常数， $\alpha \approx \frac{1}{137}$ ； G 是费米 (Fermi) 常数， $G \approx 10^{-5}/m_N^2$ 。我们的讨论中取自然单位， $\hbar = c = 1$ 。 α 代表了电磁相互作用的耦合常数， G 代表了弱相互作用的耦合常数。在上面给出的微分截面公式中，对电磁相互作用反应， $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ ，乘 α^2 ，对弱相互作用反应， $\nu_\mu + \mu \rightarrow \nu_\mu + \mu$ ，乘 G^2 。

在讨论中我们是加起所有强子道，和所有红外光子道，在反应中总存在这些道，如不包括进去，那就有发散困难。这些反应叫做深度非弹性的。后面我们将讲到，为

什么要把所有强子道和红外光子道加起来。

无标量性假设有两条：

1. 假如讨论高能反应， s 和所有 $|q^2| \gg m_l^2$ ，那末 $m_l \cong 0$ ，可以忽略。

2. 假如 $s, |q^2| \gg m_N^2$ ，那末， $m_N \cong 0$ 可以忽略。

这两条假定是很简单的，是不是对，可以看一看用这两条假定推出的结论和实验比较是否符合。

在这两条假定下，我们可以把质量 m_N 和 m_l 都忘掉，所以 $d\sigma$ 成为

$$d\sigma = f(s, q^2) \times \begin{cases} \alpha^2 \\ G^2 \end{cases}$$

有量纲的量只可能从 s, q^2, α^2, G^2 而来。所有的结论可以从量纲分析找出来，从 s, q^2 在几个 GeV 时的实验测出截面形式，然后可以推广，预言几十个、几百个、几千个 GeV 时的截面，这样做或许是正确，也可能是不正确的。

首先用无标量性分析下面两个过程：

$$\begin{cases} e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^- \\ e^+e^- \rightarrow \text{强子}, \end{cases}$$

在这两个过程之间，轻子和重子很对称。这是电磁相互作用

用反应，用 α^2 来描写。讨论最简单的形式，不管微分截面，只讨论总截面 σ ，这时就把 q^2 积分掉，得到

$$\sigma = f(s) \cdot \alpha^2。$$

研究一下量纲，用 $[]$ 来表示量纲。在自然单位制下，只有长度量纲[长度]。

$$[\alpha^2] = (\text{长度})^0 = 1$$

$$[\sigma] = (\text{长度})^2$$

故 $f(s)$ 的量纲是长度的平方，而 $[s] = (\text{长度})^{-2}$ ，所以很容易定出：

$$\sigma = f(s) \cdot \alpha^2 \propto \alpha^2/s。$$

这是无标量性的基本结果。能从比较小的 s 定出比例常数，再推到高能、更高能。这是否对，要从实验来看。

当然，我们也可以用场论来进行计算，对于过程

$$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-，$$

从量子电动力学讨论，得到

$$\sigma = \frac{4\pi}{3} \frac{\alpha^2}{s}。$$

这说明量子电动力学不违反量纲分析，但也不排除量子电动力学有可能不对。

对 $e^+e^- \rightarrow$ 强子, 这不能用量子电动力学来进行计算。

在实验上, 给出了

$$\frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{强子})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = 1.6 \pm 0.5$$

这是五年前在意大利, 用对头碰加速器给出的, 在 $s = (3\text{GeV})^2$ 时的结果。如果这数值是常数, 那无标量性就对。最近在CEA (剑桥电子加速器) 用 3.5GeV 的对头碰加速器, 得到 $s = (7\text{GeV})^2$ 时的结果, 大约为

$$\frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{强子})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = 2.5 \pm 1$$

这个数值是前几个星期得到的, 还没有很好分析, 数值还很不准确。但目前至少可以讲, 没有推翻无标量性, 这个数值是在误差之内。

现在讲一下, 为什么要加起所有强子道。以 $e^+e^- \rightarrow \rho_0$ 这一固定单道为例, 这时, 当然不能把 ρ 介子质量忽略, 认为它为零。因为只有在总能量等于 ρ 介子的质量时, 才有这反应的截面, 而 s 太大时, 截面就没有了。所以不把所有的强子道加起来是一定不对的。象这个反应就只在 $s = (m_\rho \pm \Gamma)^2$ 时才有截面, Γ 是 ρ 介子的半宽度, s 大

时就不存在反应了。所以我们加起所有强子道。无标量性看起来很简单，但事实上内容并不简单，要加起所有的强子道。

现在讨论第二个实验：

$$\nu_{\mu} + \mu \rightarrow \nu_{\mu} + \mu$$

$$\nu_{\mu} + n \rightarrow \mu^{-} + \text{强子},$$

这也加了所有红外光子道和强子道。这是弱作用过程，所以用 G^2 来描写。

作量纲分析

$$\sigma = f(s) \cdot G^2,$$

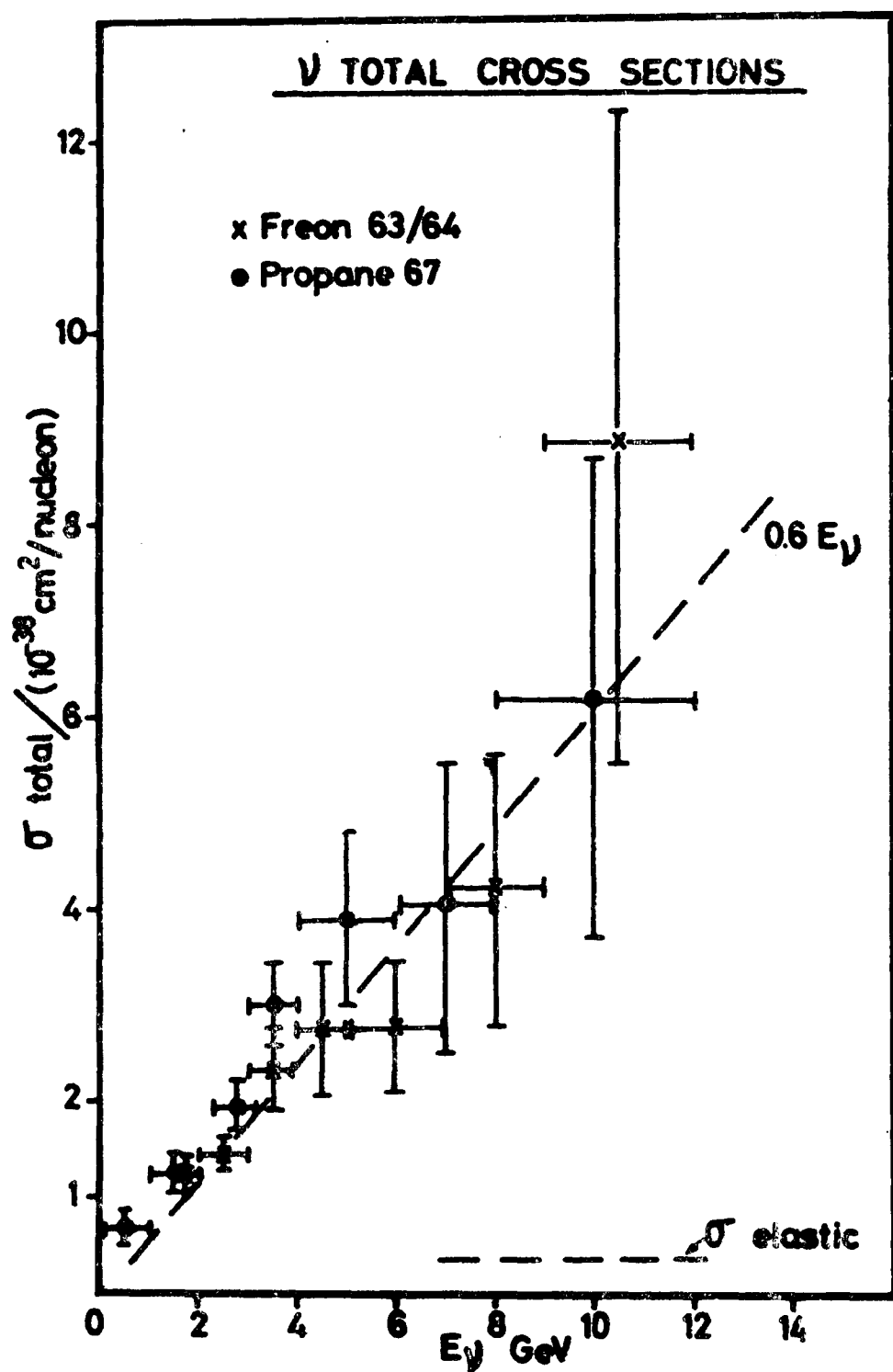
$$[G] = (\text{长度})^2, \quad [\sigma] = (\text{长度})^2,$$

所以能得到

$$\sigma = f(s) \cdot G^2 \propto G^2 \cdot s.$$

σ 和 s 成正比， s 和实验室能量 E 成正比。在五年前得到 $\nu_{\mu} + n \rightarrow \mu^{-} + \text{强子}$ 的实验结果，（见图一）

截面和 E 基本上是直线。最近在 CERN（西欧原子核研究中心）也得到了结果，大体上是相同，但斜率不是 0.6 而是 0.8。利用这实验结果，可以找出比例常数，推出更高的能量的截面。



对纯轻子反应，目前没有实验，但可以用流流耦合的弱作用理论推出来，这当然也不违反量纲分析。

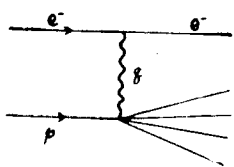
讨论第三个例子

$$e^- + \mu \rightarrow e^- + \mu$$

$$e^- + p \rightarrow e^- + \text{强子}$$

这是电磁作用，用 α^2 来描写。 $e^- + p \rightarrow e^- + \text{强子}$ 的研究是最近三年多来在 SLAC（斯坦福直线加速器中心）做了实验，能量高到二十多 GeV，测了很多量，我们将能够讨论微分截面。

用象费曼(Feynman)图那样的图来表示反应（图二），



（图二）

出来的可能是 p ，可能是 $p + \pi$ ，种种的强子道，把所有的强子道加起来。

p 不单代表质子也代表质子的四度动

量。

看有多少个洛伦兹不变量，首先是 s, q^2 还有 $p \cdot q$ ，这是洛伦兹的四度乘积， q 是虚光子的四度动量，这也是不变量，很简单有

$$-p \cdot q = m_N \cdot \nu,$$

ν = 在实验室坐标系中虚光子的能量，一般讲， ν 并不是洛

仑兹变换下的不变量。我们这里用的度规是(1,1,1,-1), 所以这等式有一个负号。

这时

$$d\sigma = f(s, q^2, \nu) \cdot \alpha^2$$

这里已经去掉了质量, 引入了三个变量。用无量纲性分析, 引入一个常用的变量:

$$\omega = \frac{-2p \cdot q}{q^2} = \frac{2m_N \nu}{q^2},$$

这是一个无量纲量, 在实验上经常用。

$$\frac{d^2\sigma}{dq^2 d\omega} = \frac{\alpha^2}{(q^2)^2} F\left(\frac{q^2}{s}, \omega\right),$$

后面我们要讨论为什么除 $(q^2)^2$ 。在除了 $(q^2)^2$ 后, 剩下的是一个无量纲量, 所以 F 是 $\frac{q^2}{s}$, ω 的函数。在用了量纲分析后只存在两个变量了, 得到了上式。这里除 $(q^2)^2$, 并不是用了量子电动力学的知识, 我们可以问, 为什么不用 $\frac{\alpha_2}{s^2} \times G\left(\frac{q^2}{s}, \omega\right)$, 这样做也可以, 只要作 $F = G \cdot \left(\frac{s}{q^2}\right)^2$ 的替代就可以, 这是任意的。所以我们讲这里并没有用量子电动力学。

下面我们将用量子电动力学知识, 我们对轻子那头用

量子电动力学，因为可以说实验已经证实了对轻子可以用量子电动力学。我们找出哪些变量是和强子有关，哪些和轻子有关。强子只是通过虚光子感知电子的作用，不和 s 发生直接关系，故强子和 $s, q^2/s$ 无关，只和 ω 有关。通过轻子部分得到和 q^2/s 的函数关系，对无梯度耦合，很容易得到这是一个两次项，可以写成

$$\frac{d^2\sigma}{dq^2 d\omega} = \frac{\alpha^2}{(q^2)^2} \left[\left(\frac{1}{\omega} - \frac{q^2}{s} \right) (\nu W_2) + \left(\frac{q^2}{s} \right)^2 W_1 \right],$$

$$W_1 = f_1(\omega) \quad \nu W_2 = f_2(\omega)。$$

W_1 和 νW_2 只是和 ω 有关的两个函数，而微分截面和 q^2/s 的关系从量子电动力学推出来了。

这里第一步是用了无标量性，把质量 m 去掉，得到了三个变数；第二步是再用无标量性量纲分析，便成为只有两个变数；而 $s, q^2/s$ 和强子无关，故从量子电动力学中的无梯度耦合，得到了一个二次项，这时剩下的 W_1 和 νW_2 只和一个变量 ω 有关。

有了这个结果后，可以从实验上来检验，这理论推理给出了一个很大变化。

SLAC 给出了实验的结果（图三）

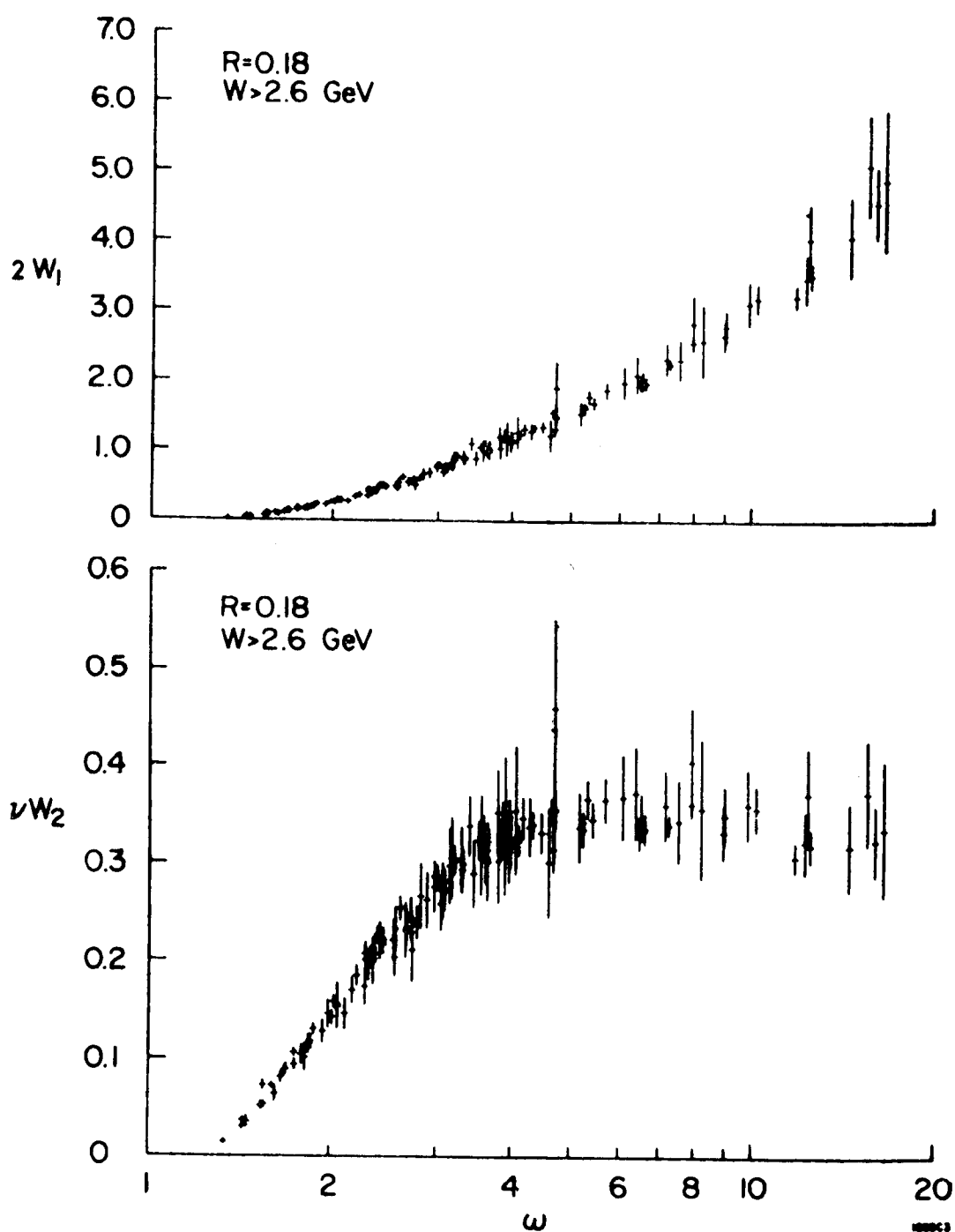


FIGURE 2

(图三)

这里的 $W^2 = -(p+q)^2$, 是出去的强子的不变质量。 q^2 从 1.5—十几个 GeV^2 , ν 从 1.5—5 GeV , 在这个范围内同一 ω 的都在一起。

上面 ep 的实验是最近三年才做的, 而中微子的实验是早就做了。

以上是简单讲了一些实验情况和初步的理论。有什么问题大家可以提出来。

何祚庥: 无标量性是要把所有强子道相加。但对一些强子过程, 当 m 是可以忽略时, 是不是不一定要相加, 也可以有无标量性?

李政道: 是的。

我们先讨论这一范围内的, 第二步再讲理论有什么困难。第一步讨论了无标量性现象是什么, 初步的理论和实验。这一步对下面越来越复杂的讨论是很重要的。

我再补充一句 $e + \mu \rightarrow e + \mu$ 这用量子电动力学算的结果是和量纲分析一致的。

下面我们要看看这一解释为什么有问题。以上是在波恩 (Born) 近似下讨论的, 在考虑高级的辐射修正时, 这就不对了, 我们就讲一下理论的困难。

在定域场论中，有一个困难，叫做质量奇点。什么是质量奇点？最简单的例子，可以从量子电动力学来看，凡是有电荷的粒子，必有质量。光子、中微子、引力子都是无质量的，他们也都不带电，是中性的。当然不能反过来讲，有一些中性粒子，他们是有质量的，但没有质量的一定是中性粒子，凡是有电荷的粒子就一定有质量。在理论上，如把带电粒子质量看作零， $m_e = 0$ ，就出来很多发散困难。我们随便看一个反应

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) = \frac{4\pi}{3} \frac{\alpha^2}{s},$$

这好象没有出现质量，但是在量子电动力学中经过更精密一些的考虑，得到

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-) = \frac{4\pi}{3} \frac{\alpha^2}{s} \left[1 + O\left(\alpha \ln \left(\frac{s}{m_e^2} \right) \right) \right],$$

如果 $m_e = 0$ 的话，那 $O\left(\alpha \ln \left(\frac{s}{m_e^2} \right) \right)$ 就成为无穷大，这是辐射修正带来的结果。实验上也证明辐射修正是存在的。在理论上这一项也存在，但由于 α 很小，故无量纲性存在只要在这一项可以忽略时，就成立了，即在

$$1 < \nu/m_e < e^{1/\alpha}$$

范围内,可以忽略这一项,由于 $1/\alpha$ 约为 137, 从 1 到 e^{137} 是一个很大范围, 在这范围内, 无标量性就正确。

但是, 这用到强子上问题就大了, 用定域场论, 对标量场, 赝标量场和中性矢量场这一些可以被重整化的场, 计算所得结果也出现这样的项

$$1 + C_1 g^2 \ln \frac{\nu}{m_N} + C_2 \left(g^2 \ln \frac{\nu}{m_N} \right)^2 + \dots, \quad (1)$$

这样一类的修正也存在, 同样可以得到可忽略的范围:

$$1 < \frac{\nu}{m_N} < e^{1/g}, \quad (2)$$

但 g 的量级是 1, 这不等式两边都差不多是 “1”, 无标量性就成为没有正确的范围了。

当然也可以问, 强子为什么要用定域场, 可能强子和定域场没有关系。但我个人认为, 定域场对强子也是初步正确的, 在无标量性中, 强子和轻子性质上是很对称的, 而且从所得的截面来看有 $\sigma_{ep} \sim \sigma_{e\mu}$, 对弱作用也相同, 有 $\sigma_{\nu p} \sim \sigma_{\nu\mu}$, 这在数量上也差不多, 好象有一个定域场在作用。所以我们希望对强子也能用定域场。但是一用就发生质量奇点的困难, 出现了矛盾, 这矛盾酝酿已经有几年了,