

来沪学术报告之十一

质 子 之 几 何 构 造

报 告 人：美籍中国物理学家 杨振宁博士

记录整理：复 旦 大 学

(内部资料·注意保存)

上海科学技术情报研究所

一九七三年九月

说 明

美籍中国物理学家杨振宁博士，于一九七三年八月四日在上海复旦大学作了关于“质于之几何构造”的学术报告。

学术报告会由复旦大学卢鹤绂教授主持，有复旦大学、上海原子核研究所、上海师范大学等单位参加会议。

此份记录由复旦大学负责整理，未经报告人审阅，仅供参考。

上海科学技术情报研究所

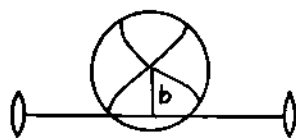
质 子 之 几 何 构 造

最近的许多发展使我和其它物理学者觉得, 用几何观点去看强子的构造是有富成果的; 相反, 过去六十年代很流行的 Regge 看法渐渐冷落起来, 讨论的人数大大减少了。

一、“极限裂片”之准确证明

极限裂片(limiting fragmentation)假设是 1969 年提出的, 前年我在上海讲到过, 当时准确的实验正在进行中。

在 π - p 散射中, 在对质子 p 静止的坐标系中看一个 π 介子走过, 则弹性散射的 S 矩阵元只与碰撞参数 b 有关, 而与能量无关, 即 $S_{el}(b)$ 。现在问非弹性散射的 S 矩阵元是否也只是 b 的函数, 即 $S_{inel}(b)$? 如果是这样, 就意味着质子产生一种只与 b 有关而固定能量的振动, 如图所示; 振动使质子不稳定而分解, 结果在高能极限时, 裂片的动量分布也就只与 b 有关, 而与能散无关。这就叫做极限裂片($l-f$)假设。



1969 年时已有初步实验证明这假设是对的, 后来 Kirz 提出了一个很聪明的办法: 在对头碰的实验中, 一个 26 Gev 的质子束流与不同能量(26 或 15 Gev)的质子束流相碰, 则在对前一束流为静止的坐标系中看, 它碎裂后裂片的动量分布将是固定的, 与对方束流的能量无关, 再用 Lorentz 变换变回去, 就可证明 $l-f$ 假设。

日内瓦的 ISR (交叉存贮环) 对撞机可以改变一方的束流能量, 实验上探测器不必移动, 基本上不需校正。最近一年的实验结果证明确实与 $l-f$ 假设一致。

图 1 表示出射荷电粒子的角分布, 可以看到束流能量为 26 Gev 与 15 Gev 时, 实验点一方落在 26 Gev-26 Gev 的实验曲线上, 另一方则与 15 Gev-15 Gev 的实验曲线重合(文章将在 Phys. Lett. 发表, Finnochiarro)。

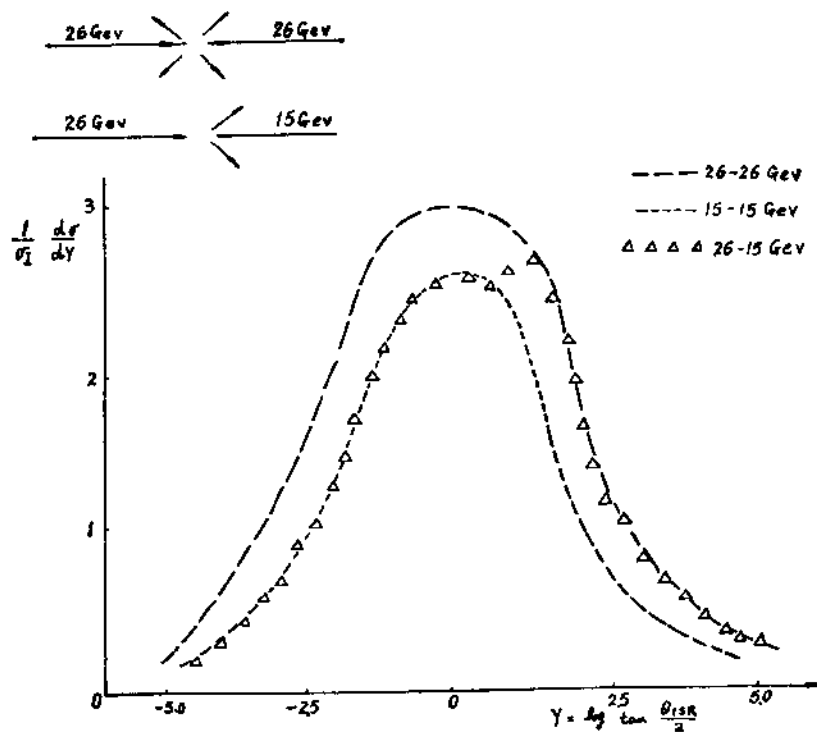


图 1

另一张图(略)表示多重性(multiplicity)的分布,都证明了 $l-f$ 的存在。实验点还存在一些差异,可以进一步探索极限到底是多少,实验还可以继续准确地做一做。总之, $l-f$ 的最初发源完全是一种几何上的设想。

二、质子质子弹性碰撞之零点

这个实验也是在 CERN 的 ISR 上做的。这个加速器原设计为 27 GeV-27 GeV 对撞,相当于实验室系能量 1500 GeV,经过“延伸”(stretching),这到 31 GeV-31 GeV,相当于 2000 GeV。去年九月在 NAL (美国国家加速器实验室,在芝加哥附近的 Batavia)开会,有一组人,以 Rubbia (意大利人,哈佛大学教授,常在日内瓦做实验)为首,报告了如图 2 的一组 $p-p$ 弹性散射角分布。我认为这张图是十五年来高能弹性碰撞的基本结果。在图上可以看到, $|t|=1.3$ 处出现了一个微分截面的凹陷点(dip), $|t|=2k^2(1-\cos\theta)$, 这个凹陷点过去只是隐隐约约地看到,现在则清楚无疑地出现了。

二年前,我提到过这件事,凹陷点的出现表明在这角度是做射振幅的零

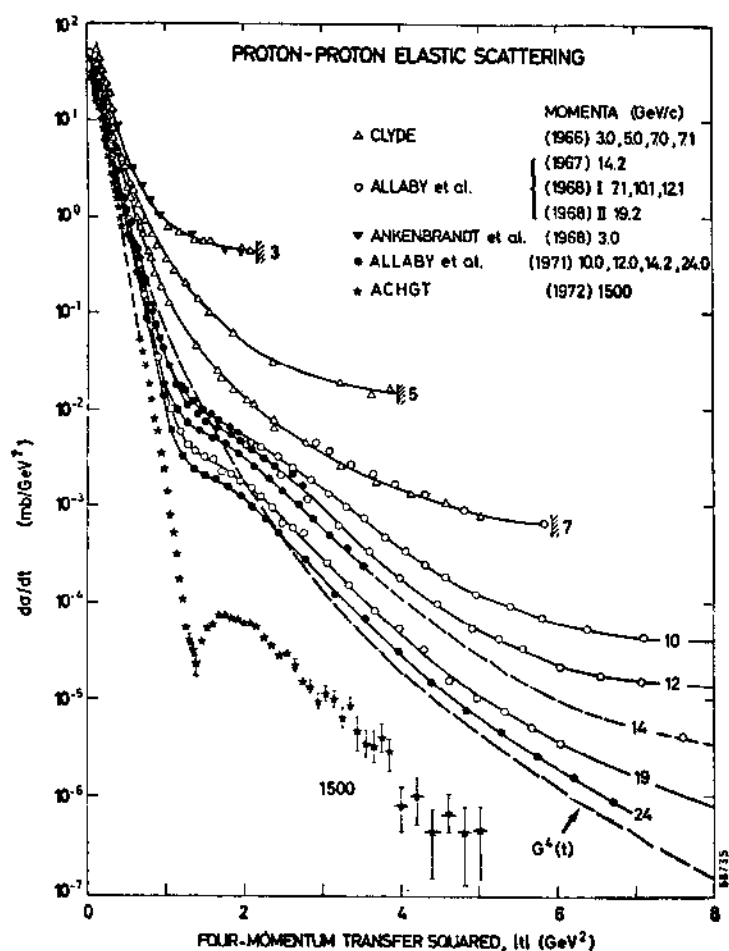
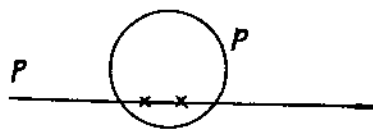


图 2

点。这个零点存在的几何意义很明显。1968 年有二组工作者，一组是邹祖德和我，另一组是 Durand Lipes，方法和我们一样，都算得在 $|t| = 1.3$ 处有一个 dip，主要的物理解释是这样的：一个质子进入另一个质子，假如发生了一次碰撞，则发生第二次碰撞的机会就减小了。先算第一次碰撞，它对第二次碰撞而言相当于有一个挡住的效果，在第二次碰撞的计算中减去，所以二个振幅的符号相反，就可能出现一个零点。理论预言在 $|t| \sim 6 \sim 7$ 之间还有第二个零点，至今尚未发现。这并不奇怪，因为截面很小，而且有理由相信，它要在很高能量才出现，短期内未必能够看到。



三、与能渐增之总截面及其与质子不透明度 (Opacity) 分布的关系

这个现象是今年 1~3 月间在 CERN 发现的, 在 Phys. Lett. 5 月份发表。我深深地认为这是最近几年来最重要的实验结果。

(1) 见图 3。

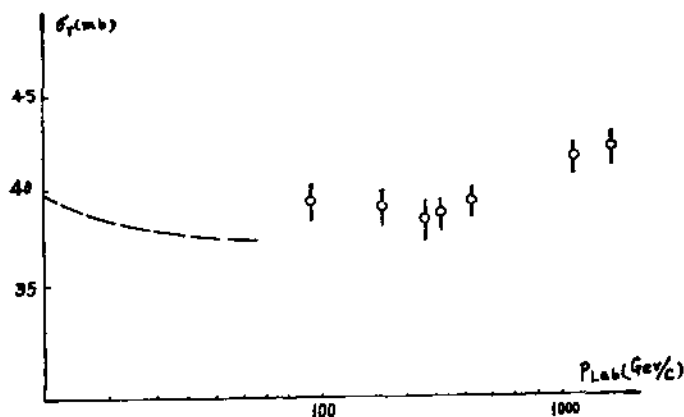


图 3 p - p 总截面随能量增加的趋势

在 70 GeV 时, σ_T 趋于水平值 38 mb, 但 300 GeV 后逐渐上升, 至 1500 GeV 时增大到 43 mb, 即增加了 10% 左右。

数据有二组人做。一组是 CERN-罗马, 他们测弹性散射角分布推到 0° , 然后用光学定理求出总截面; 另一组比萨-石溪, 利用各个角度的计数器测量一切方向的粒子(他们还继续在做, 希望把能量提高到 31 GeV-31 GeV, 即 2000 GeV, 上星期在日本非正式报告说有迹象 σ_T 又增至 45 mb)。这二组人的结果在今年 3 月公布时, 无论实验上或理论上, 大家都没有准备接受, 因为截面越来越大, 对质子构造的看法好象要改变了。

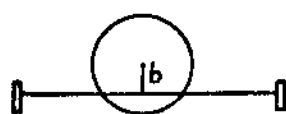
(2) 然而, 也有讨论过这件事的人。最早是海森堡, 在 1957 年, 用韧致辐射观念, 设想 p - p 碰撞时产生许多 π 介子, 使质子变得越来越黑。但这理论在数学上没有严谨性。

重要的工作(我过去提到过)是郑洪、吴大峻(H. Cheng, T. T. Wu)做的, 他们两人的文章非常多, 差不多每二期物理评论就有一篇。与这问题直接有关的一篇是 1970 年 Phys. Rev. Lett, **24**, 1456。他们根据复杂的数学计算, 得到深入的物理想法, 大胆提出 $\sigma \sim (\ln E)^2$ 。因为尽管开始时数学很严谨, 后来引造物理想法时, 数学也就不严谨了。直至今年 2~3 月以前, 很少有人相信, 我也不相信。

但是现在实验证实了。最近他们又在做新的文章，截面增加一定有基本的道理。他们做的是量子电动力学，使光子有质量，研究高能时 σ_T 与能量的关系，但他们自己也不相信最后可以得到严谨的结果。

(3) 我的研究生赵午和我一起，在接受实验事实 $\sigma_T \sim (\ln E)^2$ 的基础上，分析一下那些物理、数学假设能为大家所接受（郑、吴二人的设想并非所有人都愿意接受的），看来有如下两个大家都能接受的假设：

(a) 程函(Eikonal)设想。这其实是个光学观念：当光的波长很短时，物理光学趋于几何光学，这中间就有个程函的图家。现在高能的 $p-p$ 散射，就是波长极短的物质波碰撞。所以很少有人不接受程函的设想。而且它与郑、吴用严格方法推得的结果一致。做 Regge 的人开始与程函没有关系，现在也逐渐吸收这种设想，但不大成功。



这个设想可简单地写为 $S(b) = e^{-\Omega(b)}$, Ω 叫做不透明度。吸收同 Ω 的关系是指数式的，好比一块玻璃片吸收了 $1/2$ ，十块玻璃片就会吸收 $1 - (1/2)^{10}$ 。当 $b=0$ 时， $S(b) \sim 25\%$ 。即透过质子的波有 75% 被吸收了。

(b) $S = \text{实数}$ ，即振幅是纯粹的虚数。

实验表明这在高能时是正确的。理论上可这样考虑：高能时开放的反应道多了，质子有很大的可能性被吸收，所以振幅变为虚数。

我们用这二个假设分析实验结果，用计算机作简单计算，公式与发现零点时的情况完全类似。就是说，我们用了：

假设 (a) + (b) + 实验所给的 $\begin{cases} (\alpha) \text{ 总截面} \\ (\beta) \left(\frac{d\sigma}{dt} \right) \text{ 来重整的结果 (即角分布)} \end{cases}$

就可以算出 $\Omega(b)$ 。（ (β) 数据是 Rubbia 等人在去年做的）。结论如下：

	30Gev	300 Gev	1500 Gev
$\iint \Omega(b) d^2b$	10.3 ± 0.15	10.15 ± 0.15	11.4 ± 0.2
		不变	增加
半径		增加	不变

几何半径的增加,反映为 t 的分布更集中。因为 t 和 b 是共轭的福里哀变换关系。这个分析表明,质子象个碟子,中间最不透明,两边趋于透明;它随着能量从 $30 \rightarrow 300$ Gev,先是变大了,但不变黑;当能量从 $300 \rightarrow 1500$ Gev,它却不再变大,而变黑了。

这是什么道理呢?我们正在加紧研究。是否可以取消假设 (b),在 S 中加道一点虚数,希望避免刚才结论,而得出平滑的变化。初步计算表明很困难,除非虚数增加很多,而这样又将同别的实验结果矛盾。

郑、吴的结论是半径和黑度都随能量增加,但他们理论的严格性要求能量很高,远超出目前的实验范围。

(4) 用 (a) 与 (b) 二假设后所有可能的模型。

实验中最基本的量是二个无量纲数:

$$X = \frac{\sigma_{el}}{\sigma_T}, \quad Y = \frac{\sigma_T}{16\pi B}$$

其中 $B = -\frac{d}{dt} \ln \frac{d\sigma}{dt} \bigg|_{t=0}$ 用来表示半径

我们发现所有可能的模型算得的 X 、 Y 值都落在图 4 的 $OABCO$ 区域内。

X 不能大于 $1/2$, 这是因为假设 S 不能为虚数 ($p-p$ 散射在 π 分子临界产生之前,只有弹性散射, $X=1$, 现在高能产生许多 π 介子才使 S 变为实数)。箭头表示模型理论趋势。所谓紧的模型例如黑碟;松的模型好比半透明的碟子,中间有一个黑心。实验点大体沿 45° 线往左下方走,在 300 Gev 附近到达 Y 的极小值 $\sim 17\%$, 在更高能量似乎有往回走的趋势。按照郑、吴模型,最后要回到全黑球值 (B 点),不过这对应的能量高得惊人,以后几年的实验点将留在图上的记号 $\square$ 附近,问题是会不会回头走,也许从宇宙线实验能得到高能量结果。

当然,除了 X 、 Y 外,还可以研究微分截面的二级变化率 Z 和三级变化率 W ,用高维图去看几何意义如何,但这工作尚未完成。

下面谈谈我们正在做而尚未完成的工作。大方向是研究在质子几何图象和 σ_T 随能量增加这二个基本想法下,有没有别的实验结果可和它们联系在一起;就是说,有哪些新实验可做。

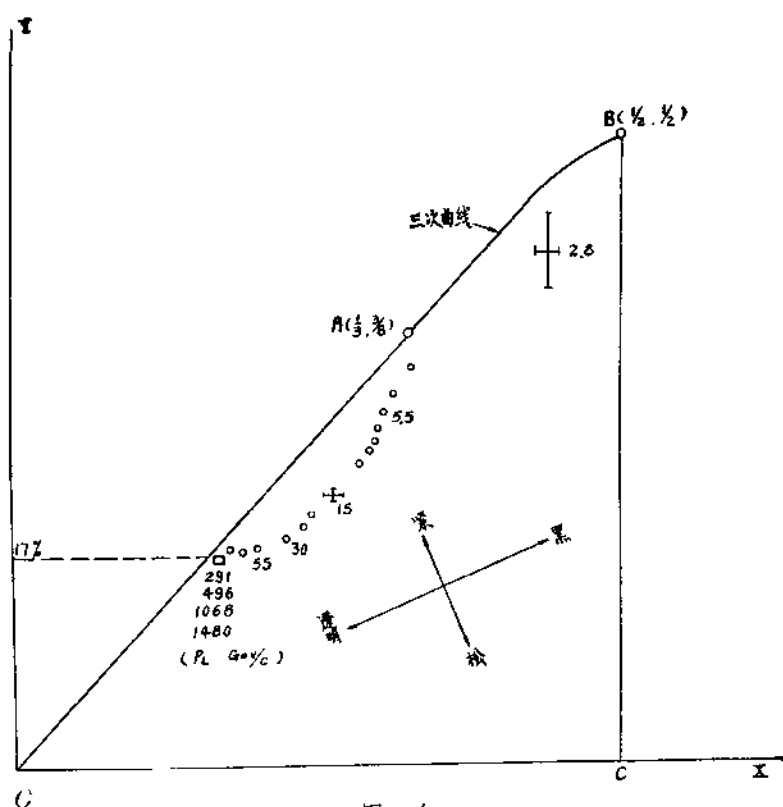
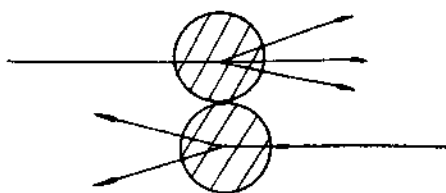


图 4

四、大角动量到什么地方去了？

(a) 随着能量增高，总截面增加很慢，但动量越来越大，这就产生了很大的角动量，可达到 $100\hbar$ 以上。而直到现在为止，并没有任何实验结果显示大角动量的存在，因此问题是：大角动量跑到哪儿去了？

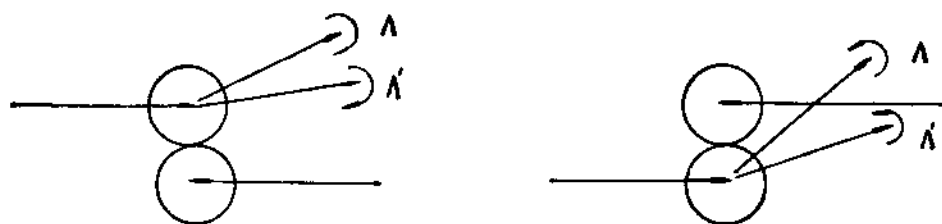
l-f 假设只讨论裂片的动量分布，没有讨论它们的位置分布。如果进一步假定如图相碰时，前半球裂片碎裂发生在上部，而后半球裂片碎裂发生在下部，即都在原来质子中心附近，则大角动量基本上变成了相对运动的轨道角动量。反过来，希望从实验上精确地证明这个假定。我们相信，大部分角动量这样解释以后，还有些剩余部分表现为动量分布的关联，可以从实验中看出来。所以，大角动量到哪里去了？裂片的几何位置、动量关联与角动量的关系，这是三个互相关联的问题。



(b) 自旋关联问题。

大部分角动量被轨道角动量带走,如果裂出一个 Λ , 它的自旋 ($S=1/2$) 由于同轨道角动量的耦合,就会产生一定的取向,如下左图所示。但是直接量一个 Λ 是不行的,因为有右面第二张图那上面的 Λ 自旋取向相反。为此应该测量第二个粒子 Λ' 的自旋,二者的关联才会显出:

$$\langle \sigma_{\Lambda}^{\perp} \cdot \sigma_{\Lambda'}^{\perp} \rangle > 0 \quad (\perp \text{ 表示自旋垂直于散射平面})$$

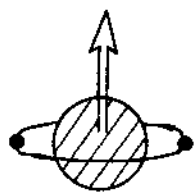


我们估计这个关联值相当大,具体实验如何散,还在和实验物理学家商量。可能散 $p-\bar{p}$ 碰撞,这样会出现 Λ 、 $\bar{\Lambda}$ 等。

五、极化与渐增总截面之关系

P. Kantor 和我在五、六年前曾讨论过这个问题,但当时截面尚未上升,这个效应微乎其微,就没散下去;现在既然实验发现 σ_T 随 E 增加了,最近邹祖德便和我又重新研究了这个问题。

为简单起见,先讨论 π 介子和原子核的碰撞。选择一种原子核,中间是闭合



壳层,外面有一个非 S 态的质子,核的极化矢量在纸面内。当一个 π 介子垂直纸面打上去,则在核左方与质子相碰的等效能量要比右方相碰时为高,因为 σ_T 随能量增大,可以说左半部的核比右半部更黑一些。这种散射振幅的左右不对称性会引起极化的 Wolfenstein 系数中一个 $R \neq 0$,表现为在散射平面内靶核自旋有一个转动取向。我们估计一下 R 相当大,这种实验可以散。



现在来看 $\pi-p$ 散射。这就碰到一个基本问题:自旋是什么?如果我们想象自旋是一个什么东西在转,那么如图的质子对 π 分子也是左

黑右白的。实验中测量质子自旋在 π 介子散射平面内的转动取向。如果转过去了,就意味着 $R \neq 0$ 。这种 π - p 散射实验现在已做到40 Gev,还不够高,要做到 σ_T 上升的区域才与我们讨论的问题有关。今后几年在NAL可散到200 Gev,有三种可能的结果:

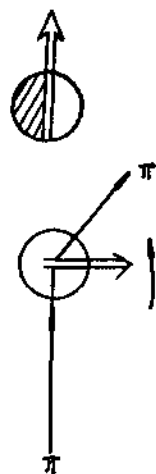
- (1) 有此现象,且与计算类似;
- (2) 无此现象,即 $R=0$;
- (3) 有此现象,但 R 的符号与计算相反。

如果是(1)(在 σ_T 增加的区域才有此现象, σ_T 不增加时没有),这表明几何图象是对的,质子自旋是物质转动的结果,由此可了解质子内部更小质点的自旋与轨道运动的关系。

如果是(3),必然认为更小的基本质点的自旋 $S > 1/2$,因此它的轨道角动量与总角动量(即质子自旋)反过来了。

如果是(2),意味着质子自旋不是由于物质的转动,应当有更基本的自旋。

我相信最后结果将是第一种可能性。但不管怎样,都会给我们关于自旋基本结构的指示。如果测量了 R 与角度的关系 $R(\theta)$ 以后,就直接告诉我们转动速度对中心距离的依赖关系 $v(b)$,这就给出质子几何图象更多的知识。起初我们也以为 $\sigma_T \sim (\ln E)^2$,变化很弱,后来发现虽然 σ_T 变一点点, R 的变化却很灵敏,例如 $v \sim c/2$, R 就可达到 45° 。我们在八、九月份写出文章后再寄来。



座 谈

卢: 感谢杨博士带回来最近高能物理的实验和理论情况, 请大家先对杨先生讲的五点提出问题, 然后再讨论其它的。

问: 刚才谈的质子自旋结构有点象液滴模型, 这同质子是否可分的问题有什么关系?

答: 我想在没有一个完善的理论之前, 你的问题要给一个完满的回答是不可能的。大概说来, 质子有自旋使左右黑度不一样, 与质子能否切开为二半的问

题可以分开讨论。因为切开需要很大的激发,而弹性散射不会使质子切开,不需要很高激发,所以分开讨论是没有危险的。

问: 在 π 介子与原子核散射中,把质子结构也考虑进去,对极化修正大不大?

答: 当然有修正,但我想影响不大。现在首先要看初步结果,质子在核内的轨道运动是否会引起左右黑度的不均匀。这是一种经典的想象,而质子的自旋则是量子现象。刚才讲的实验设想中,先是用经典的图象,再过渡到量子的图象,我们觉得这是唯一正确的方法。我承认经典与非经典的方法结合在一起,又不很清楚,可以有讨论的余地。

问: 本来自旋在量子力学中是最基本的,这说明量子力学不完全,需要修补了。

答: 不一定。我觉得基本粒子不那么基本,质子是有构造的。这次在日本开会时,有个法国人作了一个关于极化的实验总结报告,能量到 40 GeV,他听了我的报告后很感兴趣,但现在还没有 40 GeV 以上的极化测量结果。

问: 在原子核情况下的实验有否散过?

答: 没有。原子核中只有一个质子对 R 有贡献,估计效应没有基本粒子大。

问: 新的实验事实对夸克或层子模型有什么影响?

答: 没有什么影响。既没有增进信仰,也没有减退信仰。最近陈国维 (K. W. Chen) (密西根大学教授) 和 L. Hand (康耐尔大学教授) 在 NAL 做一个实验,可能对夸克模型有影响:

$$\mu + \text{原子核 } A \longrightarrow \mu + p + \dots\dots$$

在这个统舍 (inclusive) 反应中,测量大动量转移 q^2 的结果,希望试一试 Bjorken 标度不变性是否成立。陈国维到日本报告了初步结果,二个月内可有数据。过去的实验结果不完整,尤其缺乏 q^2 大的数据。NAL 加速器出束已有二年,但束流强度最近才有增加。

问: 杨先生上次讲过黑度与电荷分布的关系,按现在自旋的想法,黑度是否也与磁矩有关?

答: 这是很容易有的想法。刚才说从 30→300 GeV,质子半径增大,还没有考虑自旋。五年前邹祖德和我算过, $\tilde{Q}(b) \sim F_E^2(t)$, 即黑度的 Fourier 变换正比

于电荷分布的形状因子。而最近赵午和我计算的 500 Gev 时之 $\tilde{\Omega}(b)$ 都变尖了, $\tilde{\Omega}(b) \sim G_E^2(t)$, 这可从图上看出来。为什么会这样, 我们不知道原因。还要补充一点, 我们只计算到 $|t|=1.2$, 因为在 $|t|=1.2$ 以后的实验很不准确, 在 $|t|=1.3$ 有一个零点, 以后还要做下去。

问: 能量再大还会黑下去吗?

答: 我们没有这种见解。我们的办法是针对实验结果来算, 至于为什么会变黑变大, 理论上没有什么启示。郑、吴给出过一点想法 (他们的理论到 $\tilde{\Omega}(b)$ 为止与我们的只有细节上的差别), 最主要的是认为 $\Omega(b) \sim (E_{Lab}^2) f(b)$, 即黑度的分布图象不变, 但随能量增高而变黑, 这与我们在 30—300 Gev 的范围内结果不同, 可以认为这个能量对他们的理论还不够高。他们把交叉对称性放进去, 并且与 Regge 极点理论作了比较, 理论就复杂了。

我还要告诉大家, 今年 8 月在纽约石溪 (Stony-Brook) 开第五次国际高能碰撞会议, 中国派去三人, 并准备访问法国后再回国。

问: 杨先生的规范场引力方程是三阶的, 这是否意味着要加速度的加速度, 才会引起引力辐射?

答: 这问题我没有很多设想。我写出的方程在形式上非三次不可, 但是否正确, 是否与引力波符合, 我没有去研究。最近在北京有一组人做广义相对论的, 对我的文章发生兴趣, 对引力场的积分规范表述做了工作, 写了几篇文章, 已达到了可以讨论的有新结果的地步, 写出了另外的方程式, 同时得到爱因斯坦的三个结论。不过这两天我没功夫看。

半年前, Physics Today 上有篇文章报道了引力波的实验情况, 可以说, 至今还没有证实 Weber 的工作。所有人得出的多少是不同意的看法, 但大家很谨慎, 没有公开讲。R. Garwin 正在做引力波实验, 在今年年初已得出数据。他再过一个月要到中国来, 可请他介绍一下。

Garwin 这个人知识非常丰富, 尤其在技术上很全面, 他在世界上最大的计算机公司 (IBM) 中工作, 地位很重要。他的基本工作, 一个是在 $\pi-\mu-e$ 衰变中发现宇称不守恒, 是继吴健雄之后的第二个实验; 接着他想出一个穿

门把 μ 介子引入强磁场, 作 $(g-2)$ 的精密测量。以后在低温方面做了很多 He^3 、 He^4 的技术研究工作; 关于超音速飞机为什么对污染有影响, 他到参议院去作证, 打倒了 SST 计划。

讲句笑话, 如果美国派人来探听中国技术情报, 没有人比 Garwin 更合适了。他对技术管理也很有经验。

问: 郑、吴的计算用微扰法比较繁复, 请问用场论方法处理强相互作用有什么途径?

答: 想做的人很多。如 Bjorken 等人做光锥对易流代数, 作了很多尝试, 我个人感觉, 一时很难产生与实验有关的结果。

我想中国做高能物理有困难, 因为没有高能加速器。撇开这个问题, 理论上可以注意些什么问题呢? 我想应该先熟悉一些理论上实验上有根据的工作。郑、吴的工作值得看, 当然完全严格是不可能的。另外, 用规范场把电磁相互作用和弱相互作用结合起来的文章很多, 这方面可看 B. W. Lee (朝鲜人) 所写的很薄的一本书, 这次他在日本作了一个报告, 把规范场观念和对称性破坏 (Broken Symmetry) 很好地结合起来了, 不过还有些关键概念没有找到, 所以理论非常复杂, 而能解释的实验却很少。