

ISR 的一个发现： 质子-质子截面升高

谢一冈

(中国科学院高能物理研究所 100049)

在欧洲核子研究中心 CERN 于 20 世纪 60~70 年代建成并运行的交叉储存环 ISR 为当时世界第一台最高质心系能量(60 GeV)的质子-质子对撞机,在其上利用当时最先进的实验设备开展了质子-质子相互作用几率及其作用后的空间分布——即包括总截面和前向散射微分截面——测量。特别是得到总截面随能量增高而增加的结果,打破了当时认为随能量增高总截面不再增加的结论。这同理论和 21 世纪最新的世界最高能量的 LHC 强子对撞机上的结果都是一致的。另外在强子对撞机与探测器技术以及实验方法方面都起到了先导作用,为后来的质子-反质子对撞以及目前已经运行的 LHC 都提供了宝贵经验。

一、引言

20 世纪 60~70 年代建造的 ISR(Interactive Storage Ring) 是世界上第一台强子对撞机,提供质子-质子对撞,几乎比当时的任何一台固定靶加速器的有效能量都高 5 倍以上。

如图 1 所示,CERN 的 ISR 周长约 1.8 千米,双环中有 8 个交叉点。由 26 GeV 质子同步加速器 PS 注入质子,对撞的质心系能量最高可达 60 GeV。图 1 中的 PS 的质子注入周长约 6.5 千米的超级质子同步加速器 SPS,可加速到 500 GeV 能量,增加的反质子累积环 AA 经反向注入,组成 540 GeV 的质子-反质子对撞机 $S\bar{P}\bar{P}S$ 。21 世纪初组建成功的 27 千米周长的 14 TeV 的质子-质子对撞机 LHC 的质子束流即是由 SPS 注入的。

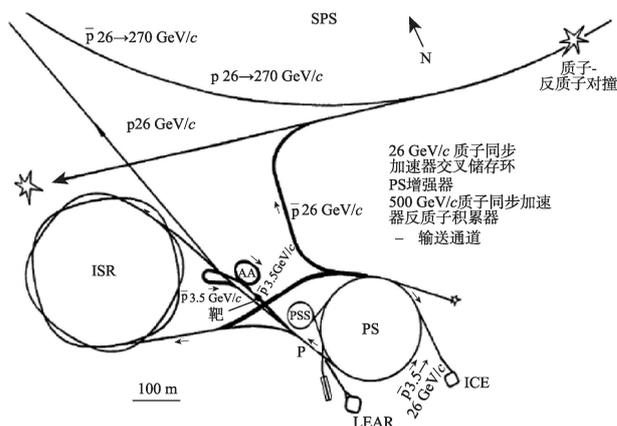


图1 CERN的ISR,PS,SPS示意图

毫无疑问,ISR对以后接续运行的CERN和美国费米实验室的反质子-质子对撞机,(分别为 $S\bar{P}\bar{P}S$ 和 Tevatron),以及对 21 世纪最新的世界最高能量的 LHC 强子对撞机的发展都起到了先导作用,为它们提供了宝贵经验。

在物理方面,今天,“小角度物理”已经不是很时兴,粒子对撞总截面和前向散射实验只是一般性课题。但是在 20 世纪 60~70 年代,高能强子对撞下精确测量是最前沿的课题,这一点在实验和理论方面可以看到。当 1971 年 ISR 开始运行时,关于雷吉(Regge)极点的议论成为主导话题,而此时质子-质子对撞总截面已经达到对撞所期望的最终渐近值。然而,ISR 实验发现,在 22~60 GeV 范围内,当相互作用半径增加 5% 时,总截面升高 10%。这个继续升高的趋势在对撞能量高于其百倍的 LHC 上同样适用。从随能量的变化趋势看,由 ISR 相对低能的数据继续延续到宇宙射线高能区和 LHC 上的

ATLAS、CMS 以及 TOTEM 合作组近期已经发表的数据结果都是精确一致的,另外同雷吉理论符合得也相当好。为了精确地测量总截面和弹性截面,在 20 世纪 70 年代,一种新的测量方法——只适用于强子对撞机的环境——被研发出来,并在本文中描述,本文最后要介绍近期的 LHC 的数据,以便从扩大视野方面回顾老的 ISR 的结果。

二、1970 年初期的强子-强子截面和理论框架

设入射 n 个粒子撞击薄层厚 dx 靶的单位体积内物质原子 N 全部反应的数目 dn , 可写 $dn = \sigma_{tot} N dx$ 。式中 σ_{tot} 就称为总截面。即每个靶核被挡住的面积。它描述粒子碰撞产生的全部末态事例的几率。读者可以从该式得到 σ_{tot} 量纲为面积,因此称为截面,是一个基本和重要的物理量。在对撞束流的情况下原初粒子强度用亮度(平方厘米每秒的粒子束)表示。

在 20 世纪 60 年代,图 2 所示为质子 p 与其他介子 π, K 以及同质子作用的总截面,这是当时苏联的塞普霍夫(Serpkhov)最高能量的固定靶加速器上和其他低能加速器上的结果,表明在该能量范围内总截面随能量增高而稍微降低并且将趋于一个常数约为 $40 \times 10^{-27} \text{ cm}^2$ (相当于 40 毫巴恩 mb, 1 巴恩 = 10^{-24} cm^2)。这个总截面随能量逐渐变化的命题被称为“渐进性”,并且在 20 世纪 60 年代,理论家和实验家都愿意相信 ISR 将得到所有的强子现象也会是这种流行的结果并且符合雷基模型的解释。

在交叉储存环(ISR)上第一个没有预料到的结果是 1973 年发现在所开辟的能量领域质子-质子总截面随能量升高而增加。当时“总截面升高”新闻被物理学家们知悉后表现出特殊的惊讶与怀疑。

前向弹性微分截面也是一个重要的物理量,实际上描述质子-质子对撞后散射在向前的小的质心系角度内质子的角度分布,并有随能量增加而向前收缩的特点。

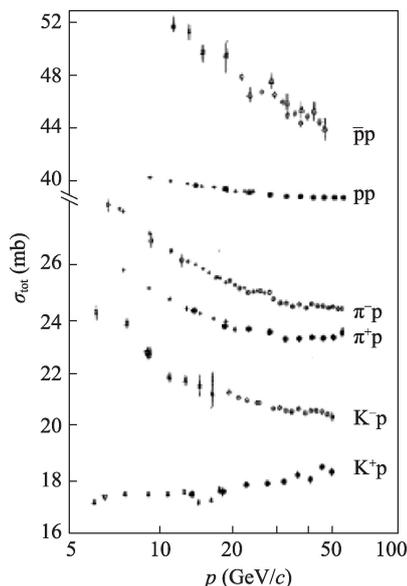


图 2 总截面 σ_{tot} 与质子实验室系动量 p 的关系 (早在 20 世纪 70 年代 Serpkhov 的 70 GeV 同步加速器与其他低能加速器上的测量结果)

由意大利理论家雷吉在 20 世纪 50~60 年代发展的该理论在强子相互作用中起到过很重要的作用,并且在前苏联玻米兰丘克(Pomeronchuk)发展的理论内提出了坡密子(pomeron)或雷吉子(Reggeon)。有趣味的是由此建立起来的有名的雷吉图,即全部粒子(包括 ρ 介子等)的质量平方 M^2 与其角动量 J 都落在有直线关系的雷基轨迹线图 3 上。

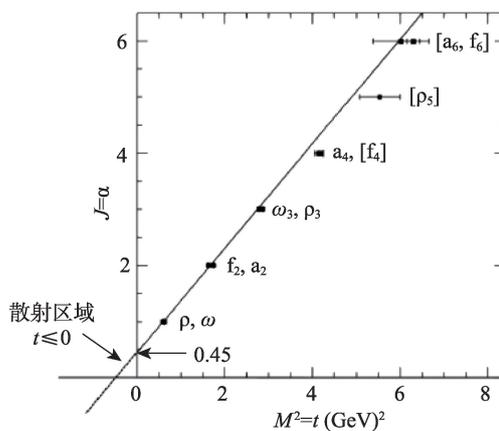


图 3 雷吉轨迹图,雷吉投影包括 ρ 介子(质量为 770 MeV)在内一直延伸至很大的质量

1960 年前后,全截面和前向微分截面都可以用坡密子的投影交换的集体效应来解释,据此在质量-自旋平面中全部粒子都落在雷吉轨迹线上。散

射的结果强有力地支持了雷吉的理论描述。这种描述至今还在应用,因为这些现象不可能用量子色动力学计算出来。

总截面 σ_{tot} ,这相当于弹性 σ_{el} 与非弹性 σ_{in} 过程的截面之和,即 $\sigma_{tot}=\sigma_{el}+\sigma_{in}$ 。根据“光学理论”,总截面相当于一个“黑盘”,得到的总截面的虚部表征前向散射振幅。非弹性过程相当于实部,即吸收部分。由“光学理论”导出的前向弹性截面的值只有百分之几。当碰撞能量很大时,就会有許多非弹性开放道出现,这时入射波被吸收的比例增加。吸收完全时有 $\sigma_{el}/\sigma_{tot}=0.50$,此即“黑盘”模型。

这里先介绍一下本文中常用的变量 s, t, u 。粒子相互作用常用的初态如 $A+B$ 到末态 $C+D(A+B \rightarrow C+D)$ 有关的物理量 s, t, u ,其中 s 为全部系统质心系的总能量的平方, $(s)^{1/2}=2E, E$ 在ISR中即质子束流的能量,则质子-质子对撞的总能量为 $2E$; t 为入射粒子 A 与出射粒子 C (或 B 与 D)四动量交换(即前后动量转移)平方的负值,与 $(1-\cos \theta)$ 成正比,其中 θ 为 A 与 C (或 B 与 D)在质心系中的夹角,即散射角,可见,散射角越大则动量转移越大,强子-强子作用的前向小角散射($t \sim 0$); u 为 A 与出射粒子 D 四动量交换平方的负值,在本文中未用到, s, t, u 称为曼德尔斯坦(Mandelstam)变量,其计算要用相对论运动学的四动量运算,这里不再赘述。

坡密兰丘克理论叙述当 $s \rightarrow \infty$ 时,强子-强子截面和反强子-强子截面变为相等。按照Froisart Martin理论,总截面必须满足以下约束条件

$$\sigma_{tot} \leq C \ln^2 \left(\frac{s}{s_0} \right) \approx 60 \text{mb} \ln^2 \left(\frac{s}{s_0} \right)$$

其中 $C=\pi(\hbar/m_\pi)^2$,其值由 π 的质量确定, π 是两个强子对撞中最轻的粒子,并且 s_0 常取等于 1 GeV^2 ,这表明总截面随总能量的增加按对数平方关系增加。

三、三个ISR的建议书和实验装置

1969年3月ISR委员会收到与本文讨论的主题相关的三个建议书,并陆续批准。

第一个是意大利Pisa组提出的题为“测量P-P的总截面”。在对撞机实验中,为了测量任何截面,必须确定它的“亮度”度和任何末态粒子。总截面即作用后的全末态粒子与亮度的比值。图4是该建议的两个示意图。图4(a)中所示的 M^0 火花室和另外两套火花室 M^a, M^b 分别测量计数 P_1, P_2 (弹性振幅的实部与虚部的比值)等物理量从而计算得出束流的亮度。分别在对撞后的两束流 a 和 b 的下游分别用两套巨大的闪烁描述仪系统($H_1^a, H_2^a, H_3^a, H_4^a$ 和 $H_1^b, H_2^b, H_3^b, H_4^b$)、探测散射出来的粒子以及事例的总数。另外,由于小角度散射的质子会丢失在ISR的真空室外,因而再采用小角度的粒子望远镜探测前向事例(如图4中的前向瞄迹仪 S^a 和 S^b 所示),以便估算这些未被记录的弹性事例数。

1968年,测量ISR亮度采用了Simon Van der Meer的建议,利用在ISR上已经安装的两条束流上的磁铁能够精细移动两条束流距离中心的径迹位置测量到不同位置监测计数器的事例率就可以计算出质子-质子的亮度。图4(b)是相应于图4(a)左

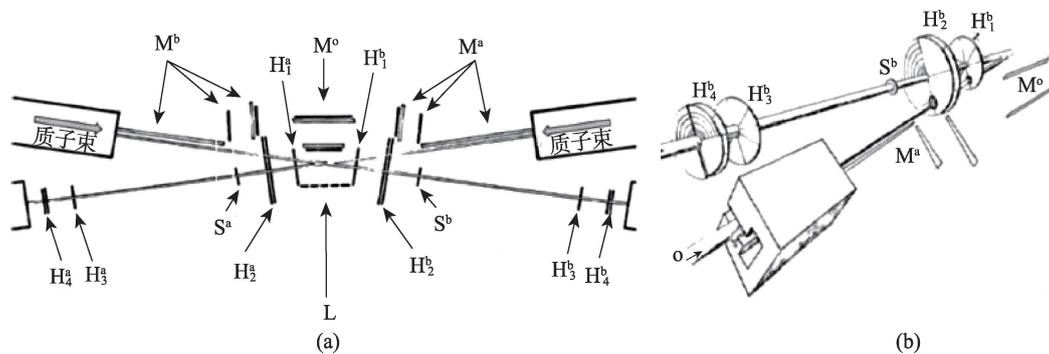


图4 Pisa组测量P-P总截面的原始建议

侧的具体示意图,其中可以看到M⁰火花室由箭头所指的3部分组成,其内皆有磁场,调节磁场就可以测量火花室内质子径迹的位置了。右侧M⁰的配置也与左侧是一样的。

第二个建议是Pisa组联合了美国Stony Brook组后提出的,是与第一个建议类似的建议,如图5所示,其中的下游望远镜系统即图3中的闪烁描述仪

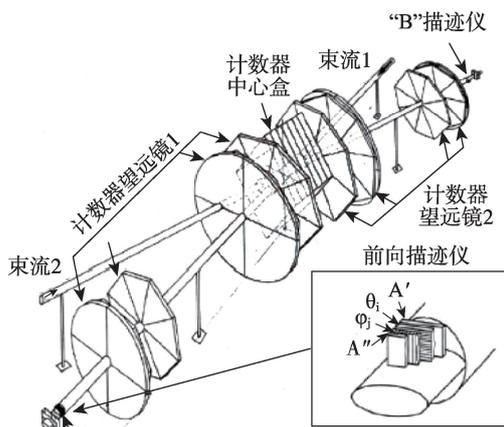


图5 Pisa—Stony Brook 合作组建造的最终的探测器,前向望远镜用于测量小角度弹性散射事例

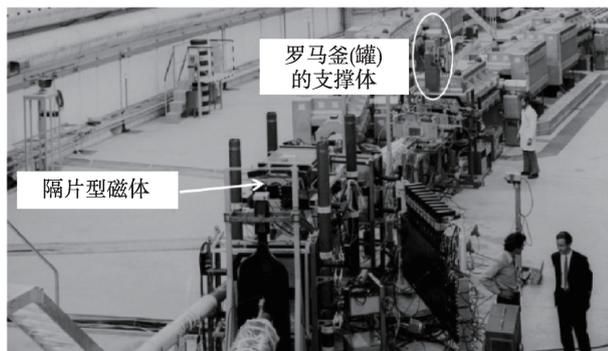
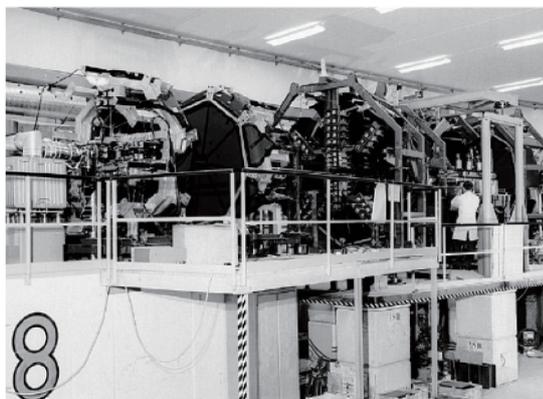


图6 ACHGT实验

该建议提出进行小角度弹性散射实验。合作组决定探测器安装在ISR第一个磁铁前面的四个可

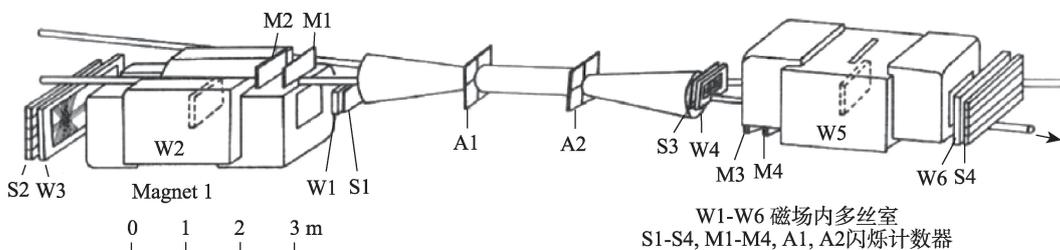


图7 ACHGT合作组由两部分磁铁组成的探测系统测量前向弹性截面

系统。前向望远镜用于测量小角度弹性散射事例。

第三个建议于1970年提出(图6),实验联合组包括Aachen-CERN-Harvard-GENOA-Roma-Torino (ACHGT)。可移动的真空室以罗马釜(罐)“Roman Pots”闻名,它的含义是“les pots de Rome”,这个名字是法国起草人发明的。一些探测器系统安装在罗马釜内。

移动区域,这一决定简化了实验以及它与加速器的相互影响或干扰的问题。

其装置由两部分组成,如图7所示,测量角度覆盖从1毫弧度(mrad)到约100 mrad的全部范围。非常小角度事例(即仅有电磁作用的库仑散射区)由双臂谱仪探测,该谱仪与储存环系统第一组共四个磁铁共用。另外,对较大角度的事例进行动量分析采用一对磁场,这样与储存环束流并不相互干扰。

在多次讨论后,ISR委员会决定只批准由两组磁铁组成的探测器系统安装在对撞(相互作用)区内,而将对前向弹性散射测量装置转移安装到离对

撞点9米远处罗马釜(罐)中,并用闪烁体进行探测(分别参见图9左侧与右侧图)。

四、弹性散射与总截面的测量结果

实验分为1970~1973年和1974~1978年两个阶段。在第一阶段中,前向弹性散射与截面的斜率是最容易进行测量的。图8为1971年的结果,确认了在PS加速器和Serpukhov(俄罗斯高能物理研究所所在)的第一次发现的特性:即在 $30 \leq s \leq 3000 \text{ GeV}^2$ 能区,弹性斜率 B 与 $\ln s$ 有线性关系,这与坡密子交换理论描述是一致的。在ISR的能量范围为 $23 \leq \sqrt{s} \leq 62 \text{ GeV}$, 即 $550 \leq s \leq 3800 \text{ GeV}^2$, B 增加10%,这和质子-质子相互作用半径增加5%是一致的。在雷吉描述中,

$$B = B_0 + 2\alpha'_p(0) \ln\left(\frac{s}{s_0}\right)$$

公式中 $\alpha'_p(0) = 0.28 \text{ GeV}^{-2}$, 这一关系已经被低能数据所肯定:即坡密斜率在 $t=0$ 时,近似有 $\alpha'_p(0) \approx 1 \text{ GeV}^{-2}$ (参见图3)。

在1972年,ACHGT合作组报道了实验结果,根据前述, $-t$ 表示散射出粒子的张角。图8给出

(i) 前向弹性散射截面按斜率 $|B| \approx 0.16 \text{ GeV}^2$ 变化。

(ii) 深度衍射的最小值位于 $|t| \approx 1.4 \text{ GeV}^2$, 并依赖于能量,可以在较低能量的条件下被观察到。

ACHGT合作组与CERN-罗马合作组利用“光学理论”做的测量前向弹性截面测量。由比萨-石溪组用图5中的设备做了总截面的测量,并且比萨-石溪与CERN-罗马两个合作组在1972年秋的结果指出了总截面上升。测量点用到的ISR亮度是由CERN-罗马合作组用Van der Meer方法和库仑散射振幅方法得到的。

在1972年2月,CERN-罗马合作组第一次发表了前向散射振幅测量的实部与虚部的比值 ρ 和用库仑散射归一化的总截面。这个测量利用了图9的设备,由图9左侧的上部仰视图(top view)和下部侧视图(side view)可见,相距较远的两组探测器安排在离束流很靠近的位置。如图9右侧所示,每组中的

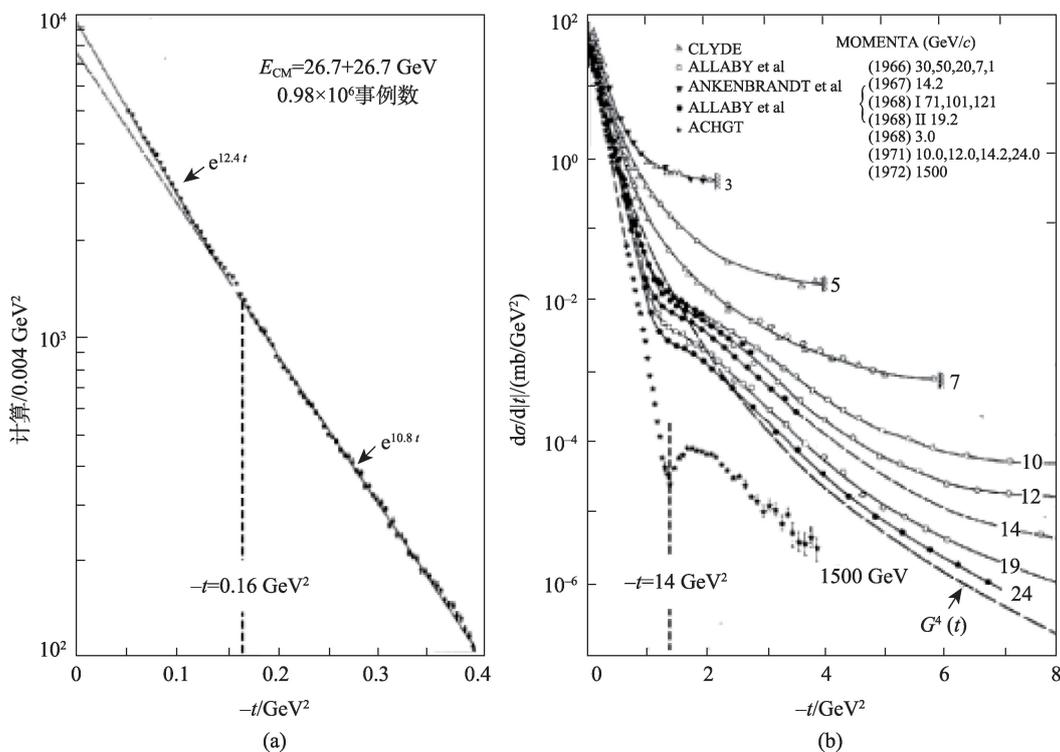


图8 第一次由ACHGT合作组做的质子-质子弹性散射的测量结果。(a)在前向区域,(b)处于大动量转移

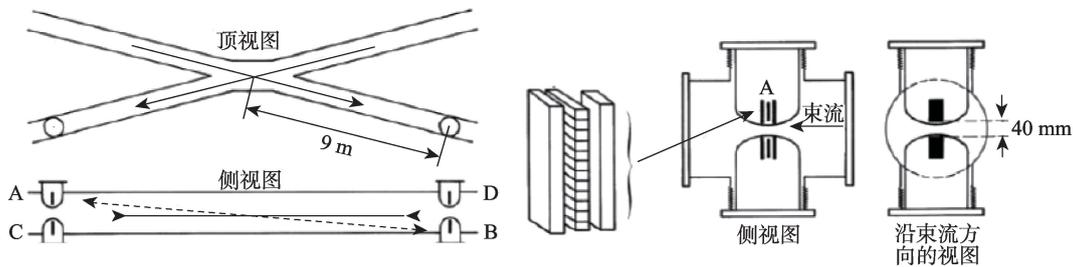


图9 1972年,CERN-罗马合作组望远镜系统用库仑散射法

两个探测器仅仅相距40毫米。这样可测到最小散射角度,大约可以小到2.5毫弧度。在这个范围相当于库仑散射振幅就有可能达到与核振幅一样大,这是因为核力场作用比库仑场作用导致的散射角要大得多。

1973年在CERN的讨论会上报告了CERN-罗马与比萨-石溪的数据,此后发表了文章,确切地表述了以下几点

(i) 质子-质子总截面在ISR能量范围随能量上升约10%。

(ii) 弹性截面(用测量的微分截面积分得到)随能量增加。这样,在全部ISR能量范围,就得到了总截面 σ_{tot} (图10(a))和弹性截面 σ_{el} 与非弹性截面 σ_{in} (图10(b))。由图可见,比值 $\sigma_{el}/\sigma_{tot} \approx 0.17$,且这个比值在较低能区单调下降。

由图10(b)可见,在ISR能量范围内,非弹性截

面比弹性截面大约4倍,并且在50 MeV/c到ISR能量范围按 $s^{0.04}$ 关系随能量而增加。从该图中的3条曲线可以看到质子-质子总截面 $\sigma_{tot} = \sigma_{in} + \sigma_{el}$ 在ISR能量范围内的 $s = 100 \text{ GeV}^2$ 处 σ_{tot} 的最浅的区域(即出现一个最低值区域)开始是同非弹性截面随能量连续上升。

以上是ISR能区的一批重要的结果。其中某些结果在那时以前,绝大多数专家都相信总质子-质子截面在高能区的截面是不随能量改变的。这些结果都是以多个合作组许多作者联名发表的,但是在那个时期,像分子生物学方面的文章只有2~3位签名者,合作组有20多个成员已经被有关国际杂志认为署名太多了。

关于接续下来的1974年至1978年间的第二代实验,几个实验都获得了更精确的数据。

首先,Annecy-CERN-Hamburg-Vienna合作组

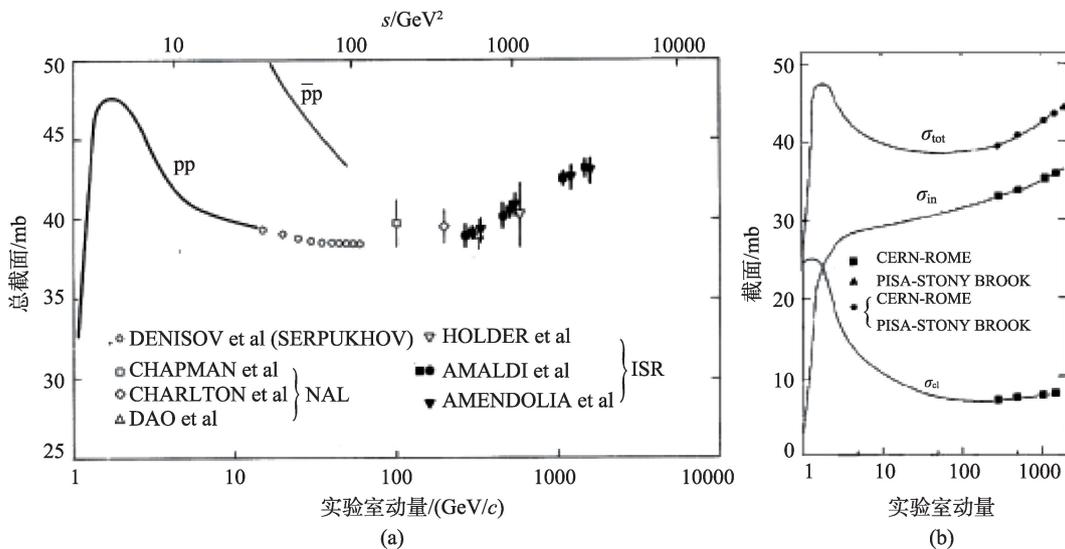


图10 (a)ISR能区质子-质子总截面在实验室动量大于300 GeV/c($s > 500 \text{ GeV}^2$); (b)非弹性截面由二截面相减得到 $\sigma_{in} = \sigma_{tot} - \sigma_{el}$

用分裂磁体(Split Field Magnet)(实际上是一台以分裂磁体为基础的大型磁谱仪)精确地测量了弹性截面到 $-t=12(\text{GeV}/c)^2$ 。在 $E_{\text{CM}}=30 \text{ GeV}$ 附近,观测到极小值为 $-t=1.4(\text{GeV}/c)^2$,人们感兴趣地注意到:在极小值能量的地方,前向实数部分几乎为零(类似于图 8(b))。

1973年,CERN-Rome和Pisa-Stony Brook合作组向ISR委员会建议一个联合实验,用安装在相互交叉区I8的新罗马釜(罐)中的精密描述来完成。全部装置如图11所示。

如图11插入的附图所示,一旦束流部件组装进程完成,四个罗马釜(罐)就可以安装了,每边两个,都有非常薄而平坦的窗,它使得这些釜内新装入的“手指”闪烁体描述仪(图11右侧的两个黑色块)边缘能够比先前的实验更加接近环型质子束流。通过精确的位置测量就可以对动量转移 q 精确地了解。

这个探测器系统开启了应用新方法测量总截面的途径。这是基于下列测量(i)在给定的轮运行中,用比萨-石溪(Pisa-Stony Brook)探测器(参考图5)测量非弹性事例总数 N_{in} , (ii)由CERN-罗马描述仪测量外推出前向事例率 $(dN/dt)_0$,而 $N_{\text{tot}}=N_{\text{in}}+N_{\text{el}}$ 为非弹性和弹性事例总数。其中,弹性事例数由微分率 dN_{el}/dt 积分得到。

三种方法联合的结果为:总截面描绘于图12(a),散射前向振幅的实部 ρ 值(图12(b))。值得注意

的是低能区 ρ 很小。在 高能区, ρ 粗略地与总截面的对数的导数 $d\sigma_{\text{tot}}/d(\ln s)$ 成比例。读者可注意到,理论预期与实验拟合符合得很好,但高能区实验不确定度增大(灰色区),总截面按 $\ln(s/s_0)^\gamma$ 递增,其中 $\gamma=2.1 \pm 0.1$, $s_0=1 \text{ GeV}$ 。另外,其中结果表述为质子半径正比于 $\ln(s/s_0)^2$ 并有一个恒定宽度的灰色边缘的“黑盘”。值得一提的是理论计算是根据陈和吴*的“有质量”量子电动力学模型所预期的。

综合起来,ISR对弹性散射和总截面的测量,正如“经典的”坡密子交换模型所预期的,随着对撞能量增加,质子-质子碰撞暗度(opacity即不透明度)并不减小而粗略地仍然等于常数。

五、从ISR到更高能量看“小角度物理”

在40多年中,强子-强子对撞机的能量已经从ISR的最小值 $\sqrt{s}=30 \text{ GeV}$ 发展到2012年LHC可达到 $\sqrt{s}=8000 \text{ GeV}$ 。这里讲本文前面介绍的随能量增加而变化的主要现象和LHC的最新结果联系起来是很有益处的。为探测非常小角度的质子散射。21世纪初,TOTEM合作组已经将它的罗马釜(罐)安置在距离相互作用点几百米远处,前向弹性散射截面的斜率直到2000 GeV连续地增加,然而,TOTEM的数据出人意料地大于拟合低能数据所预期的值。

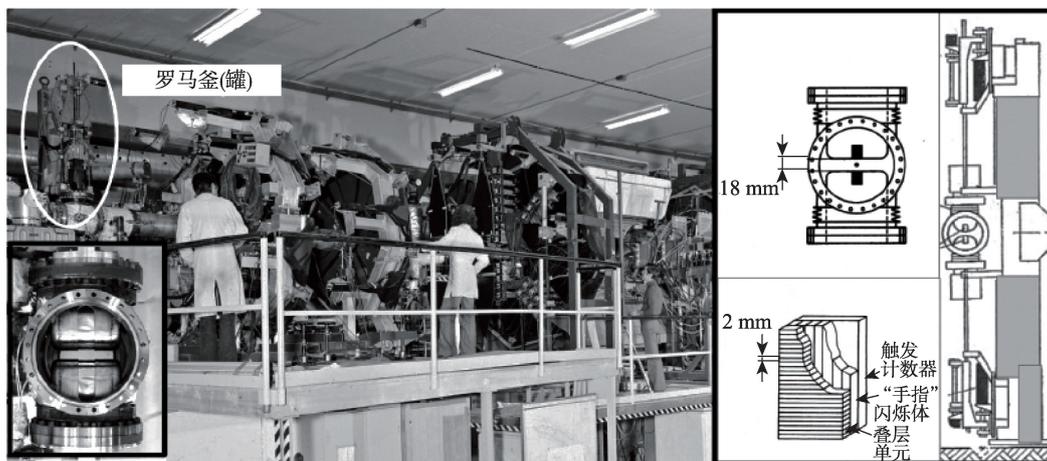


图11 CERN-Rome-Pisa-Stony-Brook 装置及其罗马釜(罐)

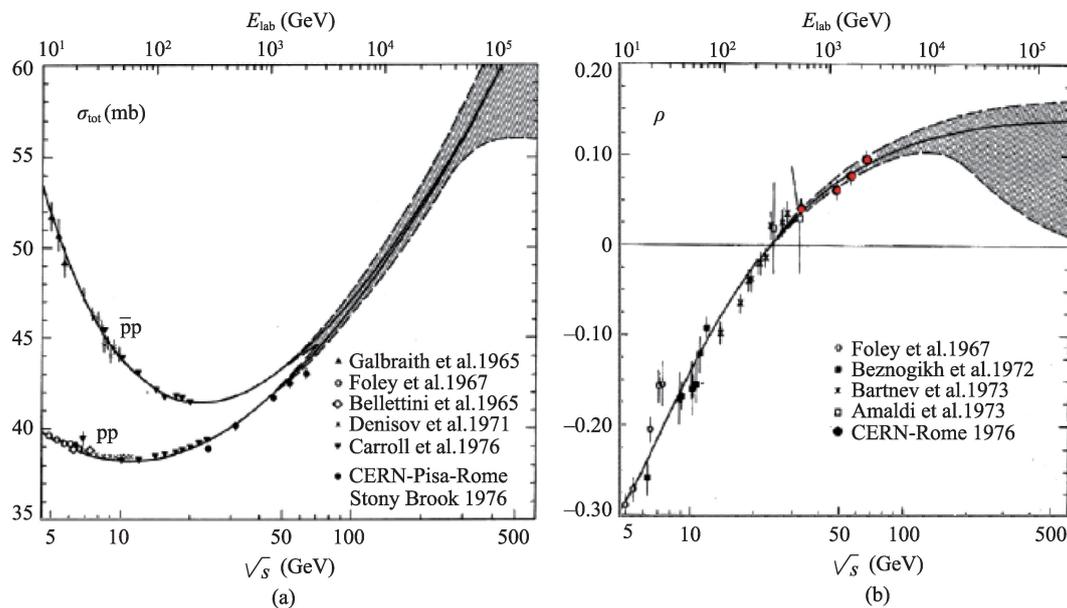


图 12 基于散射矩阵的解析特性拟合得到, (a)总截面,与(b)前向实部

图 13 上是重新产生的数据,绿色的曲线为弹性散射,蓝色为非弹性截面,红色为总截面。结果给出了 ISR、CERN 与美国的 Tevatron 反质子-质子对撞机以及最近在 LHC 上各个能区,由 TOTEM、ATLAS、CMS 和 ALICE 等合作组获取的结果。可以看到,从低能实验数据继续延续到 LHC 上获得的结果得到明确地三种截面上升趋势并与理论预期是可比的,并进一步推动理论的发展。

从图 14 给出几个能区弹性散射与总截面比值,如图 14 所示,在 ISR 能区 $\sigma_{el}/\sigma_{tot} \approx 0.175$,而与此同时有效的质子-质子相互作用半径增加,结果使得

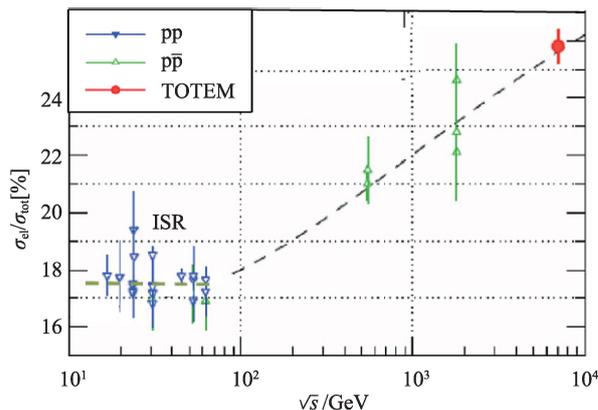


图 14 从 ISR 能量区到 LHC 能量区, σ_{el}/σ_{tot} 与质心系能量成线性关系

总截面增加。由于从 ISR 到 CERN 质子-反质子对撞机的能量区,比值 σ_{el}/σ_{tot} 在 100 GeV 以上继续增长,可见,随能量增高到 LHC, TOTEM 实验误差棒已经很大,当能量更高时,则至少要使测量精确度再提高 3 倍才能准确地限定全截面的值。

综上所述,1970 年大量讨论的“几何标度”从更广泛的观点看,是在有限能量区域的一种描述方式,在此区域总的质子-质子截面开始上升。2015 年, Martin Block 等人总结了对所有有效数据的全部拟合,并提出一个对质子对撞形象描述的说法:“即将到来的更黑、轮廓更明显和更大的质子”,叙

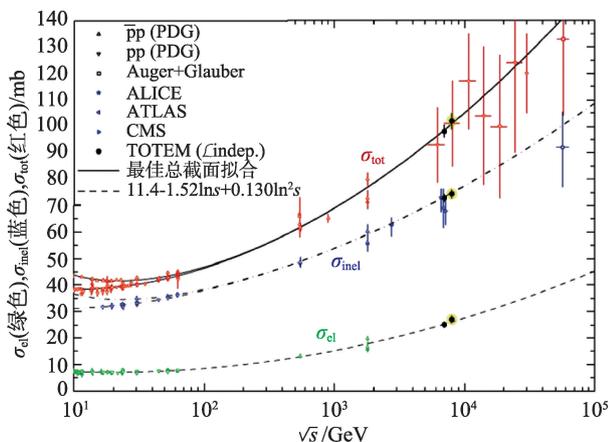


图 13 总的、非弹性和弹性截面可用数据总结, TOTEM 的为黑色点

述到“截面近似一个无特殊限制的圆盘。然而,趋近极限非常慢:一个半径按对数增长的‘黑盘’,它增添软的‘边缘’它的特性不随能量变化。”这个推断是很形象的。

另外的解释则是:1992年 Donnachie 和 Lndshoff 将强子-强子全截面写成 $\sigma_{\text{tot}} = Xs^{\epsilon} + Ys^{-\eta}$ 二指数项之和。第一项属于坡密子交换,第二项属于图2中轨迹的交换。他们叙述成以下的结论:“事实上全截面随能量按相同比率 s^{ϵ} 增长,使得它对有关的强子的一些固有的特性使截面异常地增长。相反,上升是一些坡密子交换的特性,而这就是为什么上升是普适的。因此这对于采纳几何性说法以及当能量增加时,强子变大、变黑的说法应该是异曲同工的。近期的结论与近期 CERN 对撞机的 UA8 的结果一致,它指出坡密子确实是存在的:它能强烈撞击强子、击碎它们,并敲击大部分碎片促使碎片急剧地向前冲。由 LHC 上 TOTEM 合作组的数据,得出上述的图像仍然正确的结论,但是需要再加上“硬坡密子”一项。

回到本文的雷吉模型,在1973年有些理论家不可能接受1以上的坡密子截距,即强子世界是复杂的。那时缺少理解和计算它特性的动力学理论。40年以后,分析全部强子-强子截面导出了“软坡密子”,其截距是 1.0926 ± 0.0016 ,这一非常精确的数值。虽然量子色动力学是根据强相互作用基本理论令人满意地建立的,但是至今我们还不能从量子色动力学计算它。

六、结束语

可以说在20世纪60~70年代,还没有适用于高能范围的大型综合谱仪,因此那时 ISR 也就不能用到这类谱仪。在20世纪60年代末已经成为高能物理研究焦点的“高动量转移物理”课题,即弹性和总截面测量当然也是需要大型谱仪的。但是当时没有可能被应用到。事实上,回顾本文中测量总截面和小角散射以及粒子产生的实验,所用到的一些探测器都很好地适应了这些任务,并且运行得远比预期的还要好。

至于谈到强子物理这个特定分支已经获得了非常精细的测量结果,新的现象被发现,首次详细研究了一直被排除的称为“坡密子”的概念又被运用起来了。

此外,一些精密的技术和方法已有持续的影响,例如,所有对撞机都有它们的罗马釜,而且在 ISR 上测量亮度的不同方法还在被采用。

今天,“小角物理”已经不是很时兴,但是物理学家和实验工作者之间非常紧密地合作,特别是第一台强子-强子对撞的交叉储存环对撞机 ISR 的运行,为后来更高能量的 540 GeV 质子-反质子对撞机和 W、Z 中间玻色子的发现,以及21世纪的 14 TeV 质子-质子对撞机 LHC 的发展与希格斯粒子的发现,应该说都起到了先导性的不可忽视的历史作用。

* H. Cheng and T. T. Wu, Limit of cross-sections at infinite energy, *Phys. Rev. Lett.* **24**, 1456-1460 (1970).

科苑快讯

用手性氨基酸制备手性纳米金粒子

手性纳米粒子的几个潜在应用,包括光学晶体和传感器。但是,纳米金属晶体粒子制备起来却非常的困难。

最近出现一个通过手性氨基酸制备手性等离子体纳米金粒子的新奇方法。韩国首尔大学(Seoul National University)的 Hye-Eun Lee 和同事在“种子”纳米

粒子上使用手性(L或D)氨基酸,当种子生长时会倾向于另一种手性。这样生成的纳米粒子,即使在溶液中随机分散,其扭曲的形态使其具有强烈的手性等离子体光学活性,即不对称系数为0.2。

(高凌云编译自2018年6月1日《欧洲核子中心快报》)