

核乳胶与核层次粒子研究

艾 若

欧洲原子核研究中心的 SPS 加速器成功地加速氧核和硫核,达 200 AGeV/c,并且组织了 EMU-01 至 EMU-08 等 8 个合作实验组,集中了数百名物理工作者,主要使用核乳胶寻找夸克胶子物质.这古老的探测器怎么会得到当今高能实验物理界的青睐的呢?

我们先从核乳胶说起.众所周知发现天然放射性的故事:1896 年初,A. H. Becquerel 在铀盐下夹着钥匙的避光包装的照相底片中,获得意外的钥匙负像.当时推断,这是因铀盐放出来的未知辐射所致.核辐射效应的这一偶然发现,开拓了核研究的纪元.

随着 α 、 β 、 γ 射线性质之陆续被揭示,以及 Rutherford 的 α 散射实验证实原子核带正电之后,物理工作者开始设计观测单个核粒子的手段:1912 年第一种视觉探测器——云雾室建成.1911 年 Reinganum 首次在照相乳胶中辨认单个 α 粒子径迹.1914 年 Waitsley 和 Makower 首次成功地在英国 Ilford 公司商品乳胶片中拍摄单个 α 粒子径迹的微观影像.1927 年 Мысовский 等用特制的乳胶记录了 α 粒子径迹.1932 年 Blau 等用一种染料增感的乳胶记录了人

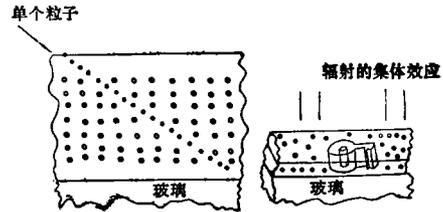


图 1 核乳胶记录单个粒子的径迹
普通照相乳胶记录由辐射集体效应产生的负像

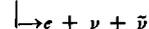
工加速的质子径迹.从此,记录单个核粒子径迹的核研究乳胶在普通照相乳胶的基础上逐步地发展完善了.

核乳胶与普通照相乳胶都是卤化银在明胶中的悬浮体;都是在接收能量量子(核辐射或光辐射)时,卤化银被还原成银原子集团“潜影”,经显影扩大银斑,又经定影溶去未被还原的卤化银,最后在明胶“微观蜂巢状载体”中嵌着由银颗粒组成负像的.但是核乳胶卤化银含量高;卤化银颗粒小;制成的感光胶膜,前者厚得多.如图 1 所示,核乳胶记录单个带电粒子是沿粒子路径留下由银颗粒构成的串串径迹;而普通照相乳胶只记录由能量量子集体效应产生的负像,不记录单个粒子的径迹.

一、核乳胶应用于核研究在历史上的成就

H. A. Перфилов 等在 1939 年用核乳胶观测大量 α 粒子本底下的铀裂片.我国科学家钱三强与何泽慧于 1946 年用核乳胶发现铀三分裂事例.

1946 年 Conversi 等用石蜡慢化体实验证明,Anderson 等在 1938 年宣称发现的“介子”(后来确认为 μ 子)不是汤川理论预言的核力场粒子.当时,英国 Bristol 大学的 C. F. Powell 改进了核乳胶技术:增大卤化银含量,提高其记录带电粒子的灵敏阈,并减小原乳胶膜由显影过程遗留的畸变效应.为寻找名副其实的核力场粒子,C. F. Powell 和 G. P. S. Occhialini 带领两位青年 C. M. G. Lattes 和 H. Muirhead 在法国比利牛斯山米迪峰上放置当时算是最灵敏的 Ilford C2 核乳胶,乳胶片面积不过邮票大小:1cm × 2cm,幸运地记录到宇宙线中的 $\pi \rightarrow \mu + \nu$



两个事例. π 介子与 μ 子的质量相差很少, μ 子的动

$$\left(\frac{v}{c}\right)^2 \sim 1 \quad \text{高速物理现象,或相对论性运动}$$

$$\left(\frac{v}{c}\right)^2 \ll 1 \quad \text{低速物理现象,或非相对论性运动}$$

蜗牛爬行及现有火箭飞行,属于低速现象;高能加速器中质子运动速度 $v \sim 0.99c$,它属于高速现象.

一个物理现象发生的线度范围 r 和它的动量 mv 的乘积,即 mvr ,约为普朗克常数 \hbar 的数量级时,称为微观现象,反之则为宏观现象,即

$$mvr \gg \hbar \quad \text{宏观物理现象}$$

$$mvr \sim \hbar \quad \text{微观物理现象}$$

这里普朗克常数 $\hbar = 1.054 \times 10^{-31}$ 千克·米²/秒.电子在氢原子中运动属于微观现象,一颗尘埃在空气中漂浮,电子在真空中运动属宏观现象.

人类对物理世界的认识,是首先从低速宏观现象开始的,后来逐渐进入高速现象和微观现象.如果把物理现象按空间尺度和速率大小划分为若干区域,则有如图 3 那样的示意图.

我们在图 3 中不同区域里,定性地标出了相应的物理学分支的名称.这不过是从一个角度反映物理这一科学之宫的轮廓而已.

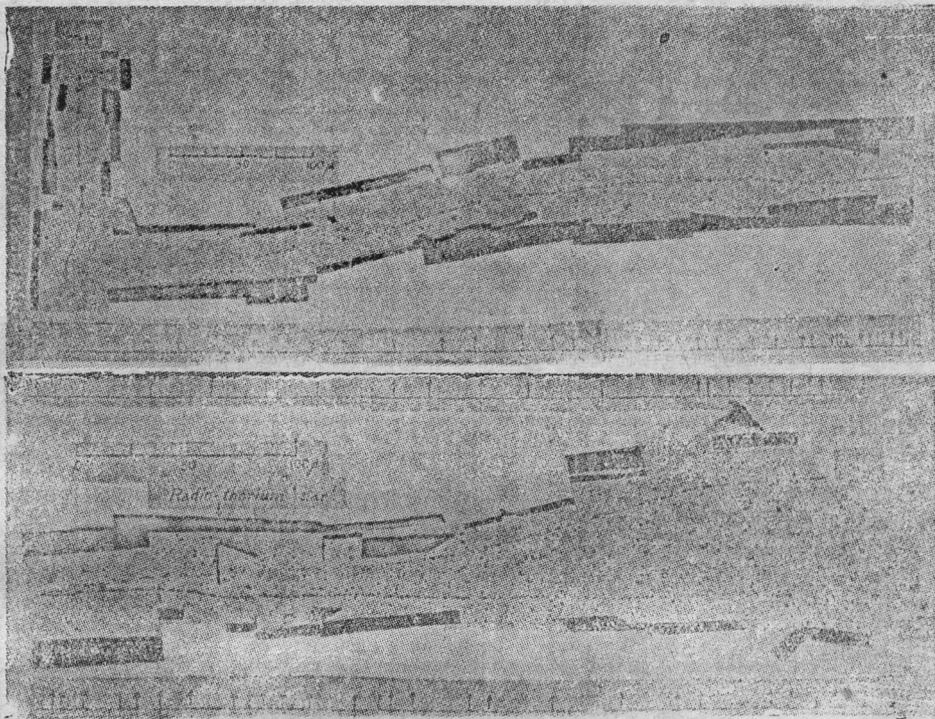


图2 首次记录到的 $\pi-\mu-e$ 衰变事例的照片

能 ~ 4.1 MeV, 射程 ~ 0.6 mm, 在上述小面积中容得下衰变的全过程. 这一划时代的功绩, 无懈可击地获得诺贝尔奖.

1948年柯达公司开始供应对电子灵敏的核乳胶 NT4. 还是 Bristol 大学的 P. H. Fowler; C. F. Powell; H. Muirhead... 等用 NT4 乳胶发现了 3π 衰变型的 κ 介子(当时称为 τ 介子). 其后, 在乳胶中探测到 2π 衰变型的 κ 介子(当时称为 θ 介子). 精确测定

这两种不同衰变类型的粒子质量没有差别, 寿命没有差别. 但是, 却有相反的宇称. 这实验上提出的 $\theta-\tau$ 之谜, 使物理学家困惑多年. 1956年杨振宁、李政道、吴健雄三位解决了弱作用宇称不守恒问题. 还使不相信宇称算符可以描述微观世界的狄拉克教授为之释然. 核乳胶

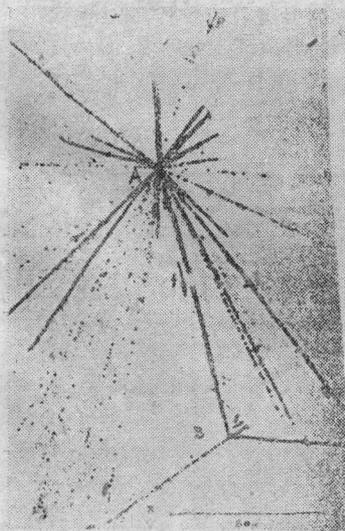


图3 超裂块首例照片

这一历史业绩, 不能不归功于核乳胶的空间分辨率在所有核粒子探测器中最高, 对核子作用事例记录最直观精细这两方面独特的优势.

1953年 A. Bonetti 等在 Ilford G5 乳胶中首次确认 Σ^+ 超子.

其后, 陆续地在云雾室、泡室、扩散云室等视觉探测器中发现了 $\Lambda^0, \Xi^-, \Sigma^0, \Sigma^-, \Sigma^+$ 等奇异粒子. 1958年由 M. Baldo-Ceolin 等在乳胶中首次观测确认 $\bar{\Lambda}^0$. 这第二位问世的反重子, 在乳胶中清晰地记录了它的衰变产物 π^+ 的衰变链和 \bar{p} 湮灭星.

1953年波兰 M. Danysz 等在核乳胶中首次观察到在电荷 $\approx 5e$ 的核块末端发射的 $\Lambda^0 \rightarrow \pi + p$ 衰变产物. Danysz 分析判断它是 Λ^0 代替一个中子存在于核中, 这种核称为超核或超裂块. 后来测定奇异粒子寿命远大于强作用特征时间之后, 这种超核的存在, 是可以预期的.

奇异粒子的奇异, 在于产生快(强作用), 衰变慢(弱作用)这一奇特的性质. 1951年南部、西岛、山口和大根田; 1952年 Pais 先后提出协同产生的假定二奇异粒子成对产生, 单个衰变. 显然应当有一种选择定则在起作用. 因此引进新量子数二奇数 s . 虽然在理论上没有很好的阐明, 但它解释了实验事实: 强作用遵从选择定则 $\Delta s = 0$, 弱作用遵从选择定则

$$\Delta s = \pm 1.$$

此后, 大力研究粒子对称性的结果, 更深层次的结构被

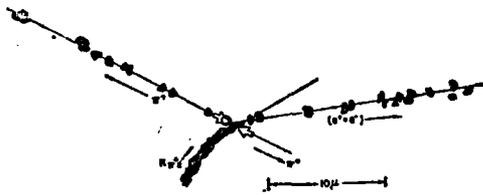


图4 测算 π^0 介子寿命的示意图

揭示了。

从弱作用选择定则导出的公正对称性 SU_3 ，构造了与实验发现的粒子符合得很好的超多重态。粒子物理的这一阶段性突破，是在核乳胶和其它探测器实验工作的推动下取得的。

此外，弱作用粒子： μ 子的核俘获作用的单个事例，电子三岔单个事例的观察，用核乳胶方法，明显优于其它探测器。因为弱作用粒子的强作用现象与电磁作用的小概率事例，没有精确的探测器，难以确认。

探测寿命在 10^{-16} 至 10^{-12} 秒的不稳定粒子，核乳胶是无以替代的唯一手段。例如， π^0 的寿命 $\approx 10^{-14}$ 秒，存活的路径 $\approx 0.05 \mu\text{m}$ ，需特制的小颗粒乳胶。如 Ilford I4，作精确的测定。粲粒子家族有不少粒子是在核乳胶实验中确认的。

二、核乳胶探测在现代实验中的作用

1964年泡室发现的 Ω^- 粒子与 SU_3 对称性预言完全一致。由此假定的夸克模型赢得了广泛的信赖。

物理工作者设计各种实验在宇宙线或高能加速器上寻找自由夸克，但迄今没有肯定的结果。

分析夸克渐近自由状态及 JACEE 实验超高能核碰撞中有直接产生高能 γ 的先期信息。从 QCD 理论解决强作用动力学的成功，以及超高能重离子加速器的发展，物理工作者期待在实验室里观测高温高密度环境产生的临界相变，探索夸克-胶子等离子体的讯息。

EMU-01 的实验设计有传统的平行照射乳胶迭和

新型的垂直照射乳胶室两种。

乳胶迭由 0.6 mm 厚的感光胶膜 (Pellicle) 迭成块状立体。每层胶膜都印有两维座标的网格，胶膜依顺序号构成第三维座标。因此乳胶记录单个粒子的三维空间信息。它适宜于精细地观测核作用产生的次级粒子及前向射弹核碎裂粒子的行为(图5)。但在这种设计中，因显影处理乳胶迭的过程难免引起胶膜畸变，测量 10^{-3} 至 10^{-2} 弧度的发射角难免带来系统误差。

标准乳胶室每套7片。第三片为靶：0.8 mm 厚的聚苯乙烯片基两面涂乳胶膜各 $350 \mu\text{m}$ 厚，用以记录作用顶点 $3^1, 4^1$ ，各片两面胶膜厚 $100 \mu\text{m}$ ，记录粒子径迹的三维座标。每层片基两面上乳胶与径迹交点固定，不受胶膜畸变影响，用以测定 10^{-3} 至 10^{-2} 弧度的发射角，可避免因乳胶畸变引进的系统误差。相应的自动装置对它作测量也可加快累积统计量的进度。

以下将介绍怎样由表观的现象去探知内部的信息。

高能射弹核与乳胶中的原子核碰撞，唯象地看，碎裂为高能 α 粒子与质子(或氦核)，向前以接近于入射核的速度发射，是没有参加反应的射弹旁观体。靶核受激微小扰动引发的“蒸发支”(按其电离本领称为“黑支”)是靶核中没参加反应的靶核旁观体。参加非弹性作用的反应体在高温高密度状态下产生夸克 π 介子化的簇射 π 介子，以及靶核中被撞散射出来的中能核子，它们在乳胶中留下“灰”径迹。核乳胶精细分辨各种径迹，测定每一核作用中各类粒子的数目分布，以及各种分布之间的关联，用以推断核反应的微观过程。例如，不含蒸发支的核作用被认为是边缘碰撞，它的镜象系的靶核是实验室系的射弹核，镜象系的射弹核可认为是核子。用核乳胶精选的边缘碰撞事例研究核子-射弹核的作用，已知因素充分，能获取较全面的讯息。又如含蒸发支较多产生簇射 π 介子特别多(200 AGeV/c 硫与核的作用中最高簇射数目达400以上)的作用认

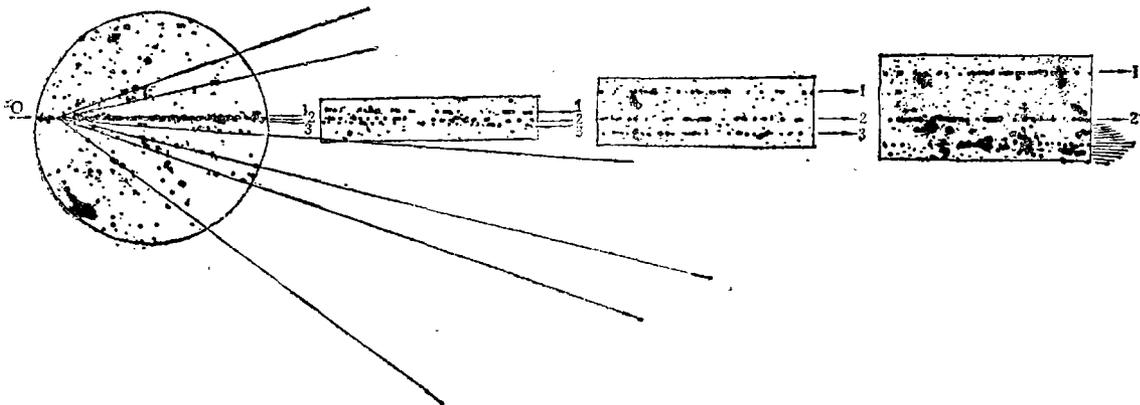
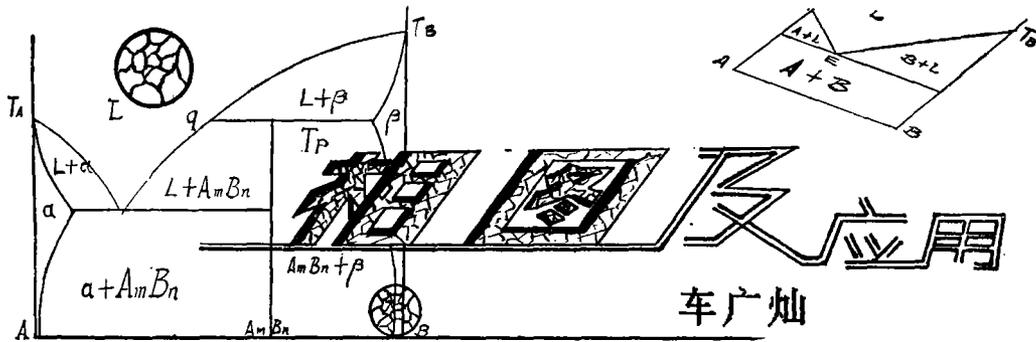


图5 200 AGeV/c 氧核与乳胶原子核边缘碰撞碎裂为 $\pi + 2p(D)$ 碎块，并产生 $20\pi^+$



材料科学是一门重要的研究课题，而相图对于从事材料科学研究者来说，正如地图对于军事家一样重要。

相图是一门古老而又年轻的科学。说它古老是因为从一百多年前就开始了相图的研究，说它年轻是指它与渗透到很多自然科学领域中的现代材料科学密切相关。举例说：要想知道怎样使廉价的石墨变成坚硬无比的金刚石？不祈求天神而使农业获得丰收的人工

造雨术的原理是什么？碳在与国计民生密切相关的铁和钢中扮演的角色是什么？等等，这些问题都可从有关相图中找到答案。如果你想从事于诸如：钕铁硼“永磁王”，氧化物高温超导体，激光、非线性光学、铁电材料的研究，那么有关相图的知识对你绝对是必须的。

一、有关相图的一些基本知识

1. 相图的定义及其相关问题

为是对心碰撞，由簇射粒子的角分布(膺块度分布)推算簇射粒子的能量密度，检验夸克相变的假设。

夸克胶子等离子体出现与否的预期判断尚有：产生奇异粒子的几率增大；除了垂直于入射核方向以外， $1/\psi$ 粒子的产生率明显抑制；高能 γ 量子从单个夸克胶

体事例中发射……，这些现象在核乳胶探测中占有优势。

当代核乳胶实验研究核粒子，从核内组份粒子，深入到核力场辐射粒子 π ，又深入到奇异粒子，再深入到亚核粒子层次中去。显然，核乳胶探测是高能物理实验研究的有力手段。

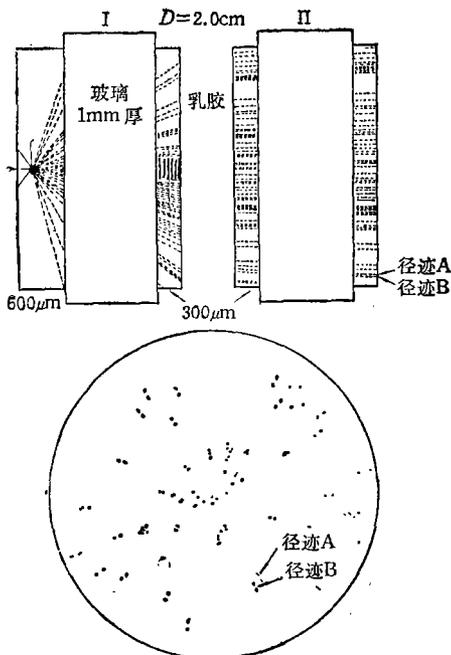


图6 乳胶室设计示意图

三、我国核乳胶研制与应用的现状与展望

我国科学家何泽慧、陆祖荫、孙汉城在五十年代独立自主研制国产核乳胶的系列成品。在中低能核物理领域，地学、医学、生物学等应用方面发挥了很好的作用。原子能科学院一所的核乳胶研制小组成绩卓著。载物乳胶的载量三十多年来始终在国际上领先。

核乳胶对于辐射的线性响应区域足够宽阔用以检测辐射通量。1967年我国第一颗氢弹爆炸，国产核乳胶承担快中子能谱测定的工作。1974年至1978年我国科学实验卫星回收成功，每次都有国产核乳胶参加舱内环境辐射监测的工作，同时利用高空超高能核射线，开展高能物理的研究。

小颗粒全灵敏的核4型乳胶的性能优于Ilford G5型和НИКФИР型的，在大规模国际合作课题中，我国科技工作者力争使我国优秀的探测材料发挥其特长。

随着科学的发展，世界上的高能加速器越建越多，各种探测手段也越来越高明，但不管如何，核乳胶探测将以她特有的直观、精确可靠而独树一帜。