

王 祝 翔

气 泡 室

科 学 出 版 社

气 泡 室

王 祝 翔 著

科 学 出 版 社

1 9 6 5

内 容 简 介

本书是作者总结自己近年来的工作及综合国内外有关资料写成的。全书共分七章。首先介绍各种粒子径迹探测器(云室、乳胶室及气泡室),比较它们的优缺点,概述气泡室的作用及发展过程;然后详细深入地讨论气泡室的基本原理和分类(第一章)、各种气泡室的具体构造(第三章)、工作特性和工作条件(第四章)及气泡室在物理研究中的应用(第五章),并介绍测量径迹的方法和仪器(第六章);最后还简单地介绍世界各国现有的一些气泡室及气泡室的可能发展。本书虽然篇幅不大,但对于各个问题的讨论却极为详尽。

本书可供有关原子核物理研究工作者及有关大学师生参考。

气 泡 室

王 祝 翔 著

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 117 号

北京市书刊出版业营业许可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1962 年 8 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1965 年 12 月第二次印刷 印张: 5 1/16 插页: 6

印数: 2,451—2,850 字数: 139,900

统一书号: 13031·1644

本社书号: 2565·13—3

定价: [科六] 1.00 元

序 言

气泡室是近代的一项新型技术，也是尖端科学技术之一，它是研究高能基本粒子相互作用的一种十分理想的探测器，在高原子核物理学中占有比较重要的地位。目前，国外在这方面的技术发展得非常迅速，并且应用得很多。在高原子加速器上，它是必不可少的研究工具。

近年来，在国外关于气泡室问题发表了不少总结性文章，但是迄今还没有一本系统地、全面地介绍有关气泡室的书籍，特别是关于一些技术问题，在文献上刊登得很少。在国内，关于气泡室问题介绍得更少了，只有一、二篇翻译文章。鉴于以上的情况，作者写了这本书。

这本书主要是根据过去的一些工作经验，并参考了多方面的文献写成的，可算是一个总结。主要目的是想通过全面系统地介绍气泡室，把自己在工作中遇到过的一些问题和得到的结果介绍出来，供有关的原子核物理实验工作者及有关各高等学校参考。

本书着重于介绍气泡室的构造和应用(包括测量方法)二部分，书名原考虑称为“气泡室的构造和应用”。但根据各方面的意见，认为是完整地介绍了气泡室，因此就定名为“气泡室”。

本书共分七章，第一章从一般地介绍三种径迹探测器开始，比较了它们之间的优缺点，从而指出气泡室之所以发展得如此快的原因。接着谈了气泡室的发展简史。第二章前一部分讲述气泡室的原理，但由于目前还没有十分完整而准确的理论，所以只是提到一些不太成熟的看法；而后一部分则是实验的经验，所以比较肯定。第三章“气泡室的构造”是本书重点的一章，介绍了二种最常用的气泡室的结构，其中所谈的技术问题，大都是在工作中碰到过的；同时，在这一章中，还把一些典型的气泡室，作了较细致的解剖，并

分別敘述了气泡室的各个部件。第四章所介紹的气泡室的工作条件,都是在实验上得到的,其中最后一部分結果以前沒有发表过,它們对气泡室工作很有参考价值。第五章是“气泡室的应用”,例举了一些可用气泡室进行研究的基本粒子相互作用,介紹了几个利用气泡室所得到的重要的新成就。对于气泡室径迹照片的測量,也专门写成了一章,实际上,这問題的重要性并不次于气泡室技术,因此写得比較詳細一些,其中的主要部分都是实际工作的結果。最后,在第七章中敘述了气泡室发展的近况、发展方向以及应用于宇宙綫的可能性的問題,作表列出了国外現有的及計劃中的一些气泡室,还对自动化測量的重要性作了敘述。关于气泡室应用于对宇宙綫的研究,不少物理学家認為是不可能的,其根据就是目前並沒有这种类型的气泡室,他們認為应用于宇宙綫在技术上的困难是不能克服的。但筆者認為以上問題仍然值得研究,解决的可能性是存在的。

由于筆者的工作經驗及水平有限,书中一定会有很多缺点,也可能有錯誤,希望专家和讀者随时提出批評指正。

在本书的編写过程中得到王淦昌先生、张文裕先生、肖健先生、丁大釗和周佩珍等同志的指导、鼓励和帮助,特別是在审稿、校閱、繪图和編排等方面,得到了科学出版社編輯部的大力协助。作者一并在此表示衷心的感謝。

王 祝 翔

1962 年 4 月

目 录

序言	(iii)
第一章 緒論	(1)
§ 1. 径迹探测器的一般介紹	(2)
1. 云室	(3)
2. 乳胶片和乳胶室	(5)
3. 气泡室	(6)
4. 三种径迹室的比較	(9)
§ 2. 气泡室的发展	(11)
1. 早期的情况	(11)
2. 近年来的发展	(14)
第二章 气泡室的原理和种类	(17)
§ 1. 形成气泡径迹的物理基础	(17)
1. 过热液体及其在记录带电粒子方面的应用	(17)
2. 气泡形成的初步理論	(19)
§ 2. 气泡室工作情况	(23)
1. 工作原理和工作过程	(23)
2. 充工作液体的过程	(25)
§ 3. 工作液体	(27)
1. 有机液体	(30)
2. 无机液体	(31)
3. 混合液体	(34)
§ 4. 气泡室的种类	(36)
1. 玻璃室与金属室	(36)
2. 通常温度室与低温室	(37)
3. 过饱和和气体气泡室	(38)
第三章 气泡室的构造	(39)
§ 1. 引言	(39)
§ 2. 丙烷气泡室的构造	(40)

1. 二个典型气泡室的总的构造	(40)
2. 室本体	(46)
3. 照相照明系統	(51)
4. 膨胀与充气系統	(57)
5. 热調节系統	(61)
6. 控制系統	(62)
7. 其他类型的通常温度室的构造	(62)
§ 3. 氦气泡室的构造	(71)
1. 一个典型的氦气泡室	(72)
2. 室本体	(75)
3. 照明照相系統	(77)
4. 膨胀与压缩系統	(79)
5. 控制系統及加热装置	(81)
6. 安全設備	(81)
7. 其他类型的低温室的构造	(82)
第四章 气泡室工作条件的选择	(86)
§ 1. 工作特性	(86)
1. 灵敏程度	(86)
2. 灵敏时间 τ 和气泡增长速度	(88)
3. 工作循环時間 T	(91)
4. 气泡室的工作效率	(91)
§ 2. 工作条件选择	(92)
第五章 气泡室的应用	(107)
§ 1. 气泡室的选择	(107)
§ 2. 与加速器配合工作	(108)
1. 引出粒子束照射气泡室	(108)
2. 時間上的符合	(111)
§ 3. 基本粒子物理問題的研究	(113)
1. $\pi + p$ 相互作用	(113)
2. $p + p$ 相互作用	(114)
3. $K + p$ 相互作用及 K 的衰变	(114)
4. $\bar{p} + p$ 相互作用	(116)
5. $\pi \rightarrow \mu + e$ 衰变	(116)
6. μ 在鉛核上的散射及 $\pi + e$ 的散射	(117)

第六章 气泡室径迹的测量	(120)
§ 1. 测量及计算方法	(120)
1. 利用立体投影器	(120)
2. 利用测量显微镜	(121)
3. 一些计算公式	(124)
4. 误差的考虑	(129)
§ 2. 电离及多次散射的测量	(132)
1. 电离的测量	(132)
2. 多次散射的测量	(137)
§ 3. 扫描与测量仪器	(139)
1. 扫描仪器	(139)
2. 常用的测量仪器	(141)
3. 自动化与半自动化测量仪器	(143)
第七章 气泡室展望	(145)
§ 1. 气泡室及测量仪器发展的近况	(145)
1. 一些现有的和计划中的气泡室	(145)
2. 底片处理过程的全部自动化	(147)
§ 2. 气泡室应用于宇宙线的问题	(148)
§ 3. 结束语	(151)
附錄 I. 误差问题	(153)
附錄 II. 用立体投影测量器的近似改正公式	(154)
附錄 III. 以抛物线公式用最小二乘法计算粒子径迹的轨道 半径	(156)
附錄 IV. 基本粒子特性表	(158)
参考文献	(159)
内容索引	(163)

第一章 緒 論

近几年来,随着現代科学技术和加速器的飞速发展,現代物理学的研究得到了广泛的开展。同时,研究基本粒子物理的仪器,首先是探测器,也越来越趋于完善了。

物理学家在研究微观世界的現象和規律性方面,例如,在原子核的結構、基本粒子及其相互之間作用的性質、基本粒子的結構、一些守恒性質以及发现新的基本粒子等等重要問題上,取得了很大的成就。物理学的这个領域的內容越加丰富和充实了,同时,实验数据也更为精确。这些成就提供了在理論上繼續深入探討的可能性,使人們对微观世界的規律性可以有更进一步的認識。

以上这些方面的成就,在实验上都是依靠探测仪器取得的。这些探测仪器包括各种类型的計数器(正比計数管、盖革計数管、閃爍計数管、契伦柯夫計数管等),电离室,云室,乳胶室及气泡室。这些探测仪器在不同的时期內起着一定的作用,大部分应用得比較早。其中气泡室的历史要算是最短的,到現在总共只不过十年,但是它已經充分显示出它的作用了。

气泡室不但对基本粒子及高能物理的研究起着重要作用,而且从目前的情况来看,它还将更进一步发展。它已經成为研究高能物理所不可缺少的仪器。現在差不多每一个有高能加速器的实验室都装备了气泡室。并且随着人工加速粒子能量的增加(目前質子最高可加速到 32 千兆电子伏),气泡室也做得越来越大(最大的已长达 2 米),其技术要求也更加复杂了。

为了对气泡室本身进行研究和培养这方面的技术力量,世界各国有很多大学和研究机构已經設計制造了各种类型的气泡室。气泡室之所以发展得如此之快,是由于在研究人工加速粒子方面,它比云室与乳胶室更理想。从 1952 年发明气泡室以来,現在最大

的气泡室的容积要比第一个气泡室大十万倍以上（第一个气泡室只有几毫升，而現在最大的达到 500 升），而且有些实验室还在計劃制造更大的气泡室。

气泡室是现代新型的探测仪器，它对我国来讲，还是比较生疏的。因此，本书想比較系統地、詳細地介紹气泡室及与其有关的一些問題，特别是着重討論它在构造上的具体技術問題和它的应用，以供有关同志进一步了解和研究气泡室时参考。

§ 1. 径迹探测器的一般介紹

探测仪器基本上可以分为两大类，一类叫径迹探测器，另一类叫非径迹探测器。所謂径迹探测器就是能看到个别带电粒子經過的路上所留下的径迹，从而知道每个粒子所飞經的具体途径的。这类仪器可以具体研究每个基本粒子相互作用的单独过程，而通过測量可以知道每个粒子的空間飞行方向、夹角、动量、速度等物理量。属于这类仪器的有云室、乳胶室及气泡室。非径迹探测器只能探测有没有粒子存在或者有没有粒子飞过，至于粒子在空間中所飞过的精确的具体軌迹，則并不能知道（大致的方向是可以知道的），因此这类仪器不能用来进行每个单独过程的研究，而只能研究数目比較大的統計过程，譬如研究作用截面等等。这类仪器非常适用于粒子流很強的射束，它可以比較快地得到高度統計性的数据。属于这类探测器的有各种类型的計数器及电离室等等。

要进一步研究基本粒子的物理性質，必須深入到具体的单个作用的过程，这要求在实验上能够給出比較精确的单个的过程及其总合起来的統計数据，例如，要求 Λ^0 的自旋就必须知道 Λ^0 的产生及衰变产物分布情况，并且事例数要多。所以，目前径迹探测器就显得更为重要了。

值得指出，径迹室对于新粒子的发现尤其重要，例如，在发现 μ^- , $\pi^\pm$, π^0 , K^+ , K^0 , $\bar{p}$, Λ^0 , $\Sigma^\pm$, Σ^0 , Ξ^- , $\tilde{\Lambda}^0$, $\tilde{\Sigma}^-$, $\tilde{\Sigma}^+$, Ξ^0 等粒子时，有 11 次是利用乳胶，8 次利用了云室，5 次利用气泡室，而只有 2 次利用計数器（以上所列各基本粒子的性質可參閱附录 IV）。

对于某一具体的工作,究竟选用哪一种径迹探测器,主要是根据入射粒子的能量、产生作用的几率、粒子是否可控制、以及所要完成的物理任务等几个方面来考虑的,因为以上三种径迹室各有优缺点及不同的用处。例如,要研究宇宙綫,必須应用云室或乳胶,而不能应用气泡室,但对于人工加速粒子的研究,則用气泡室最为理想。

为了把各径迹室作一比較,下面先简单地介紹一下这三种径迹室。

1. 云 室

1) 威尔逊云室 大家知道,在过饱和蒸汽里面,如果存在很小的顆粒,那么,这些顆粒就能成为“冷凝中心”,过饱和蒸汽围绕这些中心凝結,从而形成小水珠。云室的原理就是从离子或离子集团能作为冷凝中心这一点出发的。当带电粒子射入过饱和蒸汽的时候,由于电荷的作用,在粒子经过的地方,气体原子发生了电离,因此粒子沿途产生許多离子。这些离子或者由相互接近的离子所組成的离子集团成为冷凝中心,过饱和蒸汽围绕这些中心形成了水珠。此时可以用照相方法把它們記錄下来。在底片上能看到由許多小水珠所組成的径迹,这径迹就是带电粒子所走过的軌迹。

为了得到过饱和蒸汽,云室的一般有类似于图 1 的形式的构造,图中 9 是膨胀膜,它的上部是室本体,下面接膨胀装置。在室内充了某种在普通温度下不凝結的气体以及某种蒸汽(一般用酒精加水混合)。当膨胀装置

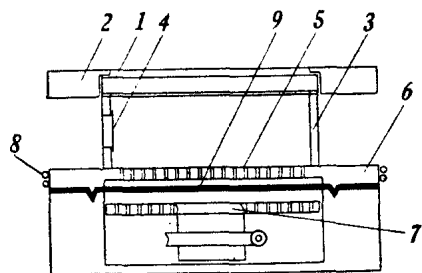


图 1. 威尔逊云室

- 1——窗玻璃; 2——压紧环; 3——室本体;
- 4——照明窗; 5——黑絨布; 6——压紧环;
- 7——膨胀比限制器; 8——銅管; 9——弹性膜。

膨胀时,室内的体积突然增大(絕热膨胀),气体温度突然降低,在

这一段时间內,形成了过饱和状态。此时使带电粒子通过,則經過一定時間(几十分之一秒),就能用照相方法記錄下它的径迹。图 2 就是云室所得到的带电粒子径迹。这种径迹比較細。

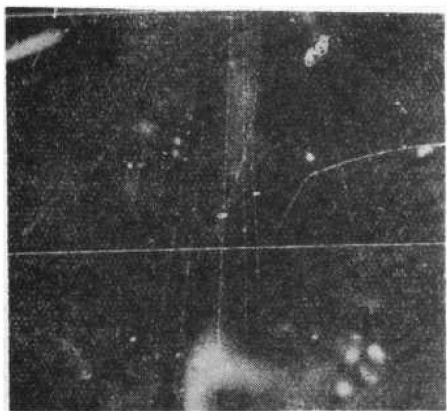


图 2. 云室的径迹照片

对云室来讲,带电粒子所引起的离子存在得比較久,因此,可以用入射粒子本身来控制室的膨胀。云室在用于宇宙綫的研究时就是利用这个性质的。控制膨胀的簡單原理如下:在室的上面和下面放二个符合的計数管,当带电粒子(宇宙綫)同时穿过这二个計数管时(也穿过云室),符合綫路就給出訊

号,使膨胀器打开。接着自动地閃光,照相記錄下粒子的径迹。这种径迹比較粗。

为了求得径迹的空間位置及方向,照相必須同时用二个鏡頭或用一个鏡頭和一个反射鏡。此外,在云室中根据粒子的射程(放金属板的室)、曲率半径(帶磁場的室)及电离度(用緩慢膨胀机构),可以得出带电粒子的动量、質量、电荷等性质。

云室可以制造得很大,但是它有一个主要的缺点,即室内充的是气体,密度太小,因此入射粒子与原子核作用的机会不大,其效率比較低。此外,它的工作循环時間較长,一般大于 1 分,故不大适用于加速器。

2) 扩散云室 形成水珠的原理与威尔逊云室完全一样,只是具体构造有所不同。威尔逊云室是利用膨胀装置使室内温度突然降低来得到过饱和和蒸汽的;扩散云室則不用膨胀装置,它通过保持室上、下部的温度差来得到过饱和蒸汽层,此层对記錄带电粒子是連續灵敏的。

图 3 是扩散云室的构造。室内充以一定压力的、在普通温度下不凝结的某种气体及某种饱和蒸汽。在室的上部与底部保持不同的温度：上面温度高，下面温度低，使得在室的竖直方向有一个

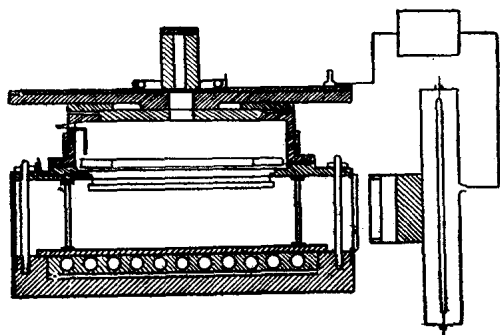


图 3. 扩散云室

温度的梯度。如果选择适当的条件，使在某段温度范围内的蒸汽变成过饱和，这一段（灵敏层）就可以连续记录带电粒子。

扩散云室不需要膨胀，因此可以做得较大，但是它的有效工作范围（即灵敏层）太小，而且本底太大，故并不适用于高能物理的研究。

2. 乳胶片和乳胶室

乳胶是一种能够感光的物质。普通的照相底片上都有一层这样的乳胶用来感光。但是乳胶不仅对于光是灵敏的，而且对于带电粒子也是灵敏的，同样能“感光”。例如，原子核的放射性就是用乳胶发现的。

目前用来研究基本粒子的乳胶并不是一般的乳胶，而是一种特制的乳胶——原子核乳胶。这种乳胶含有很多极细的银颗粒，它对带电粒子是“灵敏”的，能够探测单个粒子。当带电粒子穿入原子核乳胶时，在经过的地方留下了潜影，经过显影处理以后，用显微镜就能观察到这些带电粒子的径迹。图 4 就是用原子核乳胶记录的一个作用事例。

原子核乳胶比一般照相底片上的乳胶层要来得厚，約从 5×10^{-3} 厘米到 1×10^{-1} 厘米，这主要是为了增大探测效率。現在

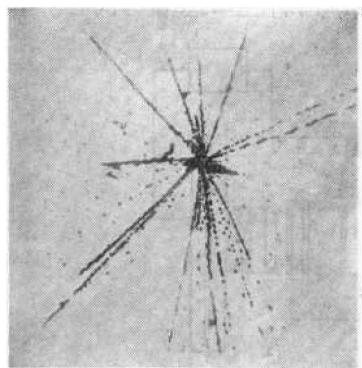


图 4. 乳胶中的一个核作用

在高能粒子的研究中都利用乳胶室(或叫乳胶迭)，它是由很多乳胶层迭在一起組成的。当用入射粒子照射的时候，乳胶层合在一起，而在显影处理的时候，則一层一层分开，并使每一层貼在一片玻璃上。測量分析是一片一片地进行的，如果径迹从某一个片上穿出，那么就可以在紧挨着它的片上接下去，由于片与片之間的相对位置都用精确的坐标格子标

志出来，因此找相应的径迹并不困难。用乳胶迭来记录带电粒子的效率是非常高的，因为它的密度很大(一般接近于 4 克/厘米^3)。

核乳胶中的径迹必須用高倍显微鏡观察和測量。根据射程、电离、多次散射等測量值，可以得出关于粒子及其相互作用的性質。

乳胶迭按照不同的需要可以做成不同的大小，通常用的是 1 升的(有 200 层，每层厚約 500 微米，面积为 $10 \times 10 \text{ 厘米}^2$)及 2 升的(面积为 $10 \times 20 \text{ 厘米}^2$)。

乳胶的最大的优点是具有比較大的密度，入射粒子在乳胶中的平均自由路程大約只有在空气中的自由路程的二千分之一，因此作用几率很大。但是它也有一些重要的缺点，象含氫原子很少，不能分辨阴、阳粒子，等等。此外，由于要用显微鏡观察，視域范围不可能太大，往往看不到整个作用的图形，因此，就很难研究在作用中产生的中性粒子的性質。

3. 气 泡 室

与过饱和蒸汽形成水珠的过程相反，在过热液体里，如果存在

微小的顆粒,則液体能圍繞这些顆粒蒸发,从而形成气泡,并且在一定的条件下,气泡能长大到看得見的大小。我們把这种顆粒称为汽化中心。

气泡室的原理就是在于离子集团能够作为汽化中心。当带电粒子穿过过热液体的时候,在液体中粒子經過的地方发生了原子的电离,邻近的离子結合在一起(离子集团)成为汽化中心,圍繞这些中心逐渐形成极小的气泡。在适当的条件下,这些小气泡能增大到看得見的大小。和云室一样,这些气泡所組成的径迹就是带电粒子飞行的軌迹^[1]。图5和6就是利用气泡室得到的径迹照片,从图看到带电粒子的径迹是十分清楚的。

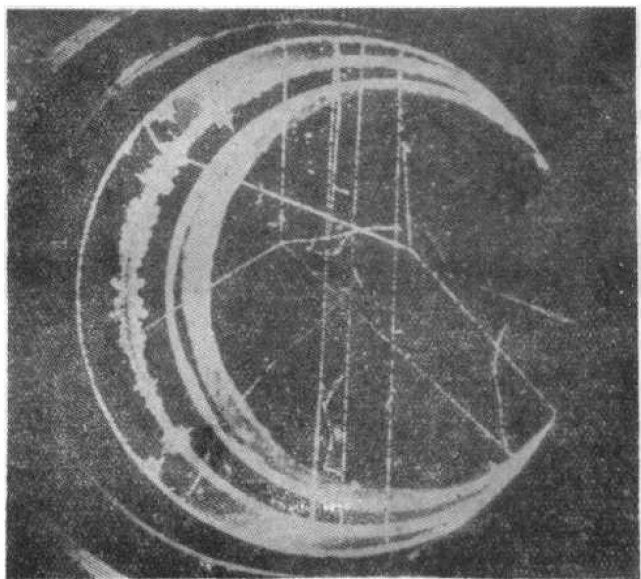


图5. 气泡室的径迹照片

带电粒子在气泡室中形成径迹的首要条件是液体必須处于过热状态。因此,設計气泡室时,首先必須使工作液能达到过热状态。

气泡室是一个密封的容器,它的內部分成二层或三层,在里层

(即室本体部分)充工作液体,在中間层充其他液体(通常都是用水),最外层则充气体(空气, CO_2 等)。层与层之間以弹性的薄膜隔开,这些弹性膜用来传递由最外层开始的压力改变。

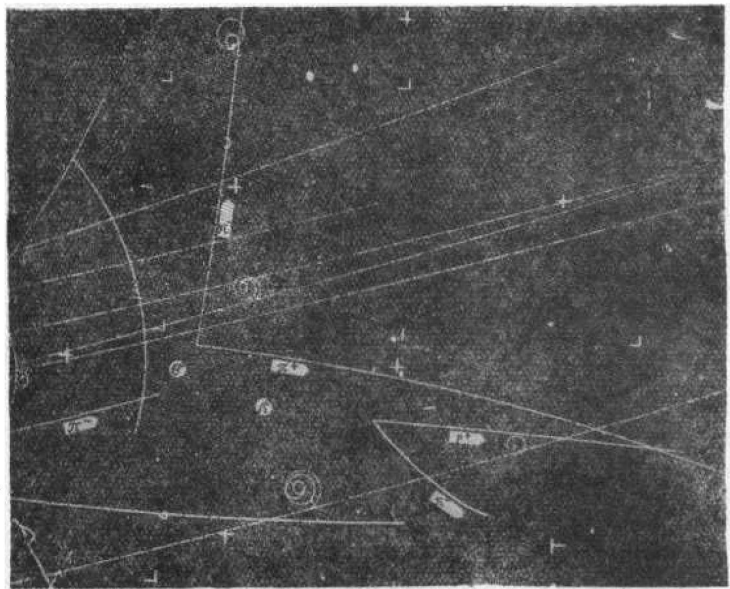


图 6. 气泡室的径迹照片

先把气泡室加热到工作液体的沸点以上,并且在最外层施加大于饱和蒸汽压的压力,此时室内并不沸腾。之后,利用机械膨胀装置,突然把外层压力去掉,此时,由于压力的传递,室内压力也突然下降,于是液体便过渡到亚稳的过热状态,在这段时间内,室对于带电粒子就成为灵敏的了。

对于不同的研究任务,气泡室可以充不同的工作液体,因为工作液体本身就是粒子作用的靶子。例如,要研究 $\pi + p$ 作用,可利用氙气泡室(氙的原子核就是质子)。研究 $\pi + C$ 作用,就可用丙烷(C_3H_8)气泡室。从目前的情况来看,最常用的工作液体是 C_3H_8 , H_2 , $\text{CClF}_3 + \text{CCl}_2\text{F}_2$ 等几种。

气泡室工作液体的密度比云室大得多(約几百倍),而扫描的

視域范围也比乳胶室大許多倍。由于气泡室具备了以上的两个优点,对加速器來說,利用气泡室是十分有利的。

4. 三种径迹室的比較

以上三种径迹室各有各的优缺点,对于不同的研究任务,它們各有用处。气泡室对人工加速的高能量粒子来講,兼有云室及乳胶室二者的优点,因此特別有效。但对于宇宙綫,則只能用云室和乳胶室等探测器。

为了比較这三种探测器,在表 1 分別列出了它們的优缺点。

表 1. 三种径迹室的优缺点

	优 点	缺 点
云 室	1. 可用于宇宙綫的研究 2. 尺寸可以做得很大 3. 多次散射影响较小 4. 可用一般的磁場(几千高斯) 5. 能看到全部图画,可研究中性粒子的产生和衰变 6. 对粒子流強度的要求不大	1. 气体密度小,不能作为有效的靶子 2. 工作循环時間长(約大于 1 分)
乳 胶 室	1. 密度很大,作靶子十分有效 2. 因連續灵敏,可用于极高能的宇宙綫的研究 3. 设备比較簡單,可直接放在加速器內照射 4. 空間分辨率高 5. 測量电离的效率高	1. 由于成分复杂,分析比較困难 2. 視域小,不能研究中性粒子的产生 3. 对能量較高的粒子带电的符号分辨不出来 4. 所含的自由質子太少
气 泡 室	1. 密度較大,是有效的靶子 2. 氫气泡室是純的質子靶 3. 尺寸可以做得很大 4. 径迹清晰,加工底片比較容易,并且精确 5. 能看到作用的全部图画,可以研究中性粒子的产生和衰变 6. 可以利用磁場(一万多高斯)	1. 不能用于宇宙綫的研究 2. 多次散射影响比較大 3. 不能記錄低能量的粒子 4. 由于温度不均匀,可能引起光学畸变 5. 空間分辨本領較差 6. 測量电离的效率低