泡箱

堀 越 源 一*

(昭和41年6月20日受理)

Bubble Chamber

Genichi HORIKOSHI

(Institute for Nuclear Study, Univ. of Tokyo)

(Received June 20, 1966)

1. 序

最近大型の粒子加速器による実験が世界各所で行われ、素粒子物理学の分野で多くの業績があがっている。これはもちろん加速器の性能が飛躍的に向上したためもあるが、見逃すことができないのは、粒子の検出器、測定器の目覚しい進歩によることである。なかでも泡箱 (bubble chamber) は、極低温技術の進歩と共に急速に大型化しており、その建設費も、加速器の建設費と同程度にまで膨脹してきている。

泡箱は 1952年 Glaser D. A. によって初めて開発されたもので、過熱された液体 (沸点以上に熱せられた不安定な液体) の中を、高速の粒子が通過してイオンが生じたとき、それらのイオンが原因となって泡が発生し易い性質を利用したものである。したがって、中性子は何等電離作用をもたないので、中性子を検出することはできない。この原理は、過飽和の気体を用いて高速粒子を検出する Wilson の霧箱 (cloud chamber) の原理と似ているが、つぎに述べるように霧箱には見られない多くの優れた点を持っており、この長所が、泡箱の急速な進歩をもたらした大きな理由でもある。

電離作用を有する高速粒子の検出装置としては、多くの器種がある。GMカウンター、シンチレーションカウンター、スパークチェンバー、原子粒乾板、霧箱、泡箱等、いずれも高速粒子の検出器である。この中でシンチレーションカウンター、GMカウンター等は、応答の速さ、分解能**では他の装置より優れているが、単に高速粒子の検出器としての情報しか与えない。すなわち、

〔写真説明〕泡箱が捉えた素粒子の反応：下方からやって来た反陽子が陽子と衝突し、消滅してラムダ-粒子対 (Λ_0 及び $\bar{\Lambda}_0$: これは中性のため写真では見えない) を発生し、更に Λ_0 粒子は陽子と π^- 中間子に、 $\bar{\Lambda}_0$ は、反陽子と π^+ 中間子とに崩壊する。

高速粒子が通過したことは知ることができるが、その通過位置を知ることは全くできない。これに反し、スパークチェンバー、原子核乾板、霧箱、泡箱等では高速粒子を検出すると同時に、その通過した跡 (飛跡) をかなりの精度で知ることができる。

素粒子の実験では、高エネルギーの粒子と物質内の原子核との衝突によって起こる種々の反応を研究することが多い。この場合、物質に含まれる原子核を標的 (tar-

* 東大原子核研究所 (東京都北多摩郡田無町)

** 二個の粒子が僅かの時間差で通過した場合これを二個の粒子として区別する能力 シンチレーションカウンターが特に優れている

get)と呼んでいる。原子核乾板内の銀粒子とか、霧箱内の気体の原子核、泡箱内の液体の原子核等は、そのまま標的として、入射した高速粒子と反応を起こすことがある。この場合、これらの検出器は同時に標的の役も果しており、非常に都合がよい。標的として考えれば霧箱は内部が気体であるから密度が低く、期待できる入射粒子との反応の頻度も少い。一方原子核乾板では、乳剤の密度は高いが、その層は薄く、起った反応の観測には顕微鏡を用いなければならない。これに対して、泡箱では動作しているものは液体であり、標的としての密度は高く、しかも大型化も可能である。すなわち、原子核乾板と霧箱の双方の長所を兼ね備えたものが泡箱であるといえよう。

素粒子物理学の進歩に伴って、極く稀にしか起らないような反応の研究が行われるようになると、大型の標的を用い、しかも大強度のビームを標的に当て、研究しようとしている反応がなるべく多く観測できるような努力が払われる。そのため泡箱は大型程よいことになる。泡箱を大型化することによる利点は、この他に、続いて起こるいくつかの一連の反応を総体的に観測できることであり(写真参照)、あるいは後述のように、磁界と併用して粒子の運動量を測定する場合、泡箱が大型な程測定精度が上げられることでもある。このような理由から泡箱は最近ますます大型化している(表1参照)。

2. 原理

Glaser が最初に行った泡箱の実験では、図1に示すようなガラスの容器にエーテルを入れ、ある程度加圧した状態で加熱しておき、一定の状態に達した後、急に圧力を減じて過熱状態のエーテル(液体)を得た。この状態では、エーテルは準安定の状態をずっと保っているが、これに放射線源を近づけると、エーテルは直ちに沸騰を始めた。このときの様子を詳しく調べるため、映画フィルムに撮って調べた結果、放射線の飛跡と思われる泡の列が多数観測されたのである。しかしこの段階での泡箱は甚だ不満足なものであった。第一に、容器の内面はきれいで滑らかでなければならず、多少でも鋭い尖った部分があれば、エーテルは直ちに沸騰してしまう。ガラス容器は高圧に耐えなければならず、容器を大型化することは殆どできない。また外部から粒子の飛躍を観測するのに、湾曲したガラスを通しての写真では、充分鮮鋭な写真も得られなかった。

その後 Wood²⁾は、別の考え方で泡箱を作った。用いた液体は液体水素である。この考え方によれば、液体を

図1 Glaser の泡箱

入れる容器としては、上に述べたような表面の滑らかなものではなく金属でもよく、これに観測用ガラス窓その他を取付ける。液体を過熱の状態にしてやれば、液体水素はガラス窓の取付け部その他の部分から直ちに沸騰を始めるが、液体全体が同時に沸騰を始めることなく、液体の一部は過熱の状態を保っており放射線に対して敏感でもある筈だ、というのである。こうして金属製の容器にガラス窓を取付けた泡箱が試作され、テストの結果、減圧直後沸騰を起こすのは、窓ガラスを取付けてある部分その他の極く限られた部分だけであり殆どの体積はしばらくの間過熱状態を保っていて、放射線の検出器として充分その能力のあることが確かめられた。このような新しい考え方に基ずく泡箱を汚い泡箱(dirty chamber)、これに対し、最初 Glaser が開発した内面がきれいで滑らかになっている泡箱を、きれいな泡箱(clean chamber)と呼んでいる。現在開発が進み大型化しているのは、すべて汚い泡箱であり、汚い泡箱の出現がなかったら、泡箱の現在のような進歩を見ることはできなかったであろう。

動作させる液体としては、動作状態(圧力、温度)が容易に実現可能であるものが望ましいが、一方素粒子実験の標的としての性格から、必ずしも実現容易な液体で動作するものばかりではない。中でも液体水素は、極低温技術が必要で、かなりの技術的困難が伴うが、素粒子実験用としての標的としては、水素は最も重要なものであり、この意味で泡箱の多くは液体水素を用いている。

泡箱で液体を瞬間的に過熱の状態にするには、予め液体を一定の温度圧力の下におき、瞬間的にピストンの移動その他の方法で圧力を減じてやる。この断熱膨脹過程によって、液体は過熱状態となる。減圧と同時に、泡箱の一部(窓のガスケット部等)では自然沸騰が起こり、そのため泡箱内の圧力は多少上ることになるが、これはむしろ自然沸騰を押える役目を果すので、かえって都合がよい。液体が丁度過熱の状態となったとき、加速器からのビームが泡箱を通過するようにタイミングが調整され、さらにビームによって生じた泡粒が適当な大きさに成長した頃、照明用フラッシュが光り、写真が撮られる。

図2 泡箱内の圧力変化

図3 泡の発生領域

泡箱内の圧力の変化と、ビーム、照明用フラッシュ等の時間的な関係を図2に示す。

3. 泡の発生

泡の発生について少し詳しく考えて見る。図3に物質の飽和蒸気圧曲線を示す。すなわち、この曲線より上では物質は液体であり、曲線の下部分では気化して蒸気となる。今物質がA点の状態にあったとすると、気相と液相とが共存して平衡を保っている。ピストンを移動させることによって、泡箱内の体積を増し圧力を減じてやると、温度は不変*であるからそのときの状態は、Aを通るP軸に平行な線上(点線上)で、A点よりも下のB点に移る。Bの状態では物質は本来は気体で、当然液体は沸騰を起こすのであるが、圧力の減少 ΔP があまり大きくない範囲では、何かきっかけがない限り液体は沸騰を起こさず、液体のまま、準安定の状態を保っている。これが過熱状態である。圧力の減少がさらに大きくなると、液体は完全に不安定となり、直ちに沸騰を起こしてしまう。この状態を発泡状態という。準安定な過熱

* 厳密には断然膨脹のため、僅かに温度は下る。

図4 holeの体積と圧力の関係(Fürth)

状態でも、減圧の度合いがとくに小さい範囲では、外部から放射線が入射する程度のきっかけでは発泡しない。したがって、放射線に敏感で泡箱として使用できる範囲は、発泡状態に近接した極く一部の過熱状態である(図3参照)。

Fürth³⁾の理論によれば、液体内では分子の熱運動に起因する熱的なゆらぎ現象のため、局部的に液体が気化し、たえず小さい泡粒が発生したり消滅したりしている。液体内でのこのような泡粒(hole)の平均的な体積は、液体の温度によって決り、holeの体積が無限大(実際には液相がなくなりholeが全体を占める)になった状態が沸騰である。holeの平均の体積を $\bar{v}$ とすれば、 $\bar{v}$ は圧力 P と温度 T で次のように表わすことができる。

$$\frac{3(P - P_{\infty})}{7kT} = \frac{1}{v} = \left[1 - \left(\frac{\bar{v}}{v_0} \right)^{2/3} \right] \dots (1)$$

ただし P_{∞} は温度 T における液体と気体の平衡圧、すなわち液体の圧力 P_{∞} における沸点が T である。 v_0 は定数、 k はボルツマン定数である。(1)式をグラフで表わすと図4のようなになる。ここで $P > P_{\infty}$ では、圧力 P に対応して $\bar{v}$ が一義的に決り、しかも $\left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial P} \right)_T < 0$ であるから安定な領域である。一方 $P_f < P < P_{\infty}$ では、同一圧力 P に対し $\bar{v}$ は一義的に決らず、二つの $\bar{v}$ が対応する。一つは $\bar{v} > v_f$ で、この場合は $\left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial P} \right)_T > 0$ で不安定な状態であり、もう一つは $\bar{v} < v_f$ で、この状態では $\left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial P} \right)_T < 0$ で安定な領域であるが、何か外部からきっかけがあると、沸騰を起こしてしまう可能性を持っている。前述の発泡状態の限界点は圧力 P_f に対応する状態

図 5 泡発生の臨界半径と圧力の関係

である。

つぎに放射線による泡の発生機構について考える。一般に液体内に半径 r の泡が発生したとき、泡の内部の圧力を P_v 、液体の圧力を P_H とすると、

$$\left[P_v - \left(P_H + \frac{2\sigma}{r} \right) \right] \geq 0 \dots\dots\dots(2)$$

にしたがって、泡は押しつぶされて消滅したり、あるいは次第に大きくなる。ただし σ は液体の表面張力である。泡の内部の圧力は液体の飽和蒸気圧と考えられるから

$$P_v = P_\infty$$

すなわち図 5 に示した如く、

$$P_\infty - P_H = \frac{2\sigma}{r}$$

で表わされる曲線の上部の領域で泡は成長し、下部の領域では消滅してしまう。表現を変えれば、泡は何等かの原因で発生成長し、その半径が

$$r_c = \frac{2\sigma}{P_\infty - P_H} \dots\dots\dots(3)$$

に到達すれば、あとは自然に成長することになる。この r_c を泡発生の臨界の半径という。

放射線が液体中を通過すると、液体分子を電離してイオンが発生する。これらのイオンが、泡の成長のきっかけになることは充分に考えられる。すなわち、泡の表面にイオンが付着すれば、イオン同志のクーロン反撥力によって、泡の成長を助長する方向に力が働く。しかしイオンは再結合によって間もなく消滅してしまうが、理論的な考察によって、イオンの再結合による寿命と泡の半径が r_c に達するまでの時間とを比べて見ると、イオンの寿命の方が遙かに短く、この過程による泡の発生は殆ど不可能であることが示されている。また実験的にも、

イオンの付着によって泡が発生するのではないことが、ほぼ確められている⁴⁾。

高速の荷電粒子が液体中を通過する際、液体分子を電離すると同時に局部的に熱を発生する。電離によって生じたイオンも、まわりの分子と衝突を繰り返し再結合するまでの間に、始め持っていたエネルギーは熱エネルギーとして、周囲の分子に分散してしまうから、結局入射した荷電粒子によって液体は局部的に温度が上昇する。このため液体は、局部的に準安定の状態から発泡状態となり、泡が発生する。一方熱は周囲へと伝わり次第にもとの温度まで冷えてしまうが、その前に泡の半径が臨界値 r_c に達しておれば、液体がもとの温度まで冷えてしまっても、泡は成長を続け観測できるようになる。このような機構による発泡は、実際の値を用いて検討して見ても、充分可能性のあることが示されており、実験的にも裏付けがなされている⁵⁾。

以上述べたことから明らかなように、泡が臨界値 r_c に達するためには、外部からエネルギーを与えなければならないが、このための必要最小限のエネルギー E_b は、液体の種類や動作条件によって決る（大体 100 eV 内外）。このことから泡の密度は放射線が単位距離当りに失うエネルギーに比例すると考えられ、泡の密度から高速粒子の速度等*を知ることができる。

液体が過熱状態でなくても、放射線が通過したあとは局部的に温度が上り、その直後に液体を過熱状態にすれば、泡が発生する素地を持っている筈である。この泡発生の「素地」（泡の核）は、時間が経てば消滅するが、その寿命の長さは放射線の測定器として重大な意味をもつ。核の寿命が適当な長さであれば、放射線が通過した直後に泡箱の弁を動作させて、液体を過熱状態にしてやれば、その放射線を観測できる筈である。放射線が通過したかどうかは、たとえばシンチレーションカウンターを用いたカウンターテレスコープで知ることができる。実際このような方法で、スパークチェンバー等は放射線が通過したときだけ動作させて、観測に成功している。泡箱では、「泡の核」に相当するものは、すでに述べた考え方によれば「局部的に熱せられた部分」であるが、この寿命は実験的な事実から 10^{-7} 秒以下であることが示されており、理論的にも、熱伝導によって半径 r_c^{**} の微小球から熱が放散する時定数を算出すると、 10^{-10} 秒程度であることが示されている。これに対して弁その他

* 高エネルギーの粒子（高速 v ）が液体中を通過するときの単位長さ当りのエネルギー損失は $1/\beta^2$ に比例する。

$$\left(\beta = \frac{v}{c}, c = \text{光速} \right)$$

** 液体水素、プロパン等では約 10^{-6} cm

の機械部分を動かして液を過熱状態とするには、 10^{-8} 秒程度はかかるので、放射線の通過を信号で受けて、それによって泡箱を動作させて放射線を観測することはできない。しかし加速器の場合には、予め放射線の発生する時間が分っているから、加速器の繰返しに同期させて泡箱を運転すればよい。この意味で泡箱は加速器を用いた素粒子の実験に適している。

4. 泡箱の実際

泡箱は用いる液体によって温度、圧力がきまる。したがって、液体の選択によっては比較的温度圧力が常温常圧に近く実現の楽なものもあれば、逆に常温常圧から大きくかけ離れて実現が非常に困難なものもある。しかしすでに述べたように、泡箱は放射線の観測装置であると同時に、標的としての役割もある。動作条件として非常に技術的困難を伴う液体水素泡箱は、Hilderbrand および Nagle⁹⁾等によって初めて製作されたものであるがそれ以来泡箱の主流を占めているのはこのためである。水素原子は、最も代表的な素粒子の一つである陽子を原子核とし、しかも液体水素は密度が高く*、異種の原子を全く含まないから、標的として多く用いられている。以下は液体水素泡箱についてだけ述べることにする。

4.1 膨脹サイクルと熱の発生

前に述べたように、泡箱では液体水素が膨脹することにより過熱状態となり、泡が発生するのであるが、放射線の飛跡が写真に記録されてしまえば用はないから、直ちにもとの状態に圧縮されて、再び次の膨脹の準備態勢となる。この一連の、膨脹——放射線による泡の発生——再圧縮の過程を、膨脹サイクルという。これは霧箱の膨脹——圧縮過程と対応するものであるが、再圧縮の際の泡の消滅が霧箱における霧の消滅する時間に比べて、はるかに短く(約20m sec)、測定器として優れた点の一つとなっている。また、膨脹サイクルを速に行うことは熱の発生からいっても、非常に有利なのである。

膨脹サイクルの過程における熱の発生を、 $P-V$ 図によって考察する(図6)。初めAの状態にあった液体水素は、断熱的な膨脹によってBの状態にまで膨脹、減圧したものとする。このB状態は過熱状態であるが、放射線のない状態ではすぐには発泡しない。放射線が入射したり、あるいはフランジの接合部等の泡の発生しやすい場所での発泡によって、この状態は状態Cとなる。さらに時間が経過すれば、泡箱各所で沸騰が起こり、泡

図6 膨脹サイクルの $P-V$ 図

箱内の圧力はその温度**における平衡蒸圧まで上昇する。この状態がC'である。再圧縮の場合には、はじめ気相が圧縮されて液化してしまうから、圧力は P_{00} のままD状態まで圧縮されて後、元の状態Aにもどる。その結果、泡箱内の水素は外部からBCC'Dの囲む面積だけの仕事をされたことになり、これに相当するだけの熱量が発生する。

以上は、ゆっくりした膨脹サイクルの場合である。膨脹サイクルが速い場合には事情は大分異なる。放射線が通過し飛跡の写真を撮った直後速かに再圧縮を行うことにすれば、水素は殆ど発泡しておらず、この時の状態はB'点で表わされ、再圧縮によってC'状態へと移り、Dを経て元の状態Aへともどる。このとき泡箱内で発生する熱量は、前に比較して大巾に少く、BB'C'Dの囲む面積に対応するものとなる。

このように膨脹サイクルに伴う熱の発生は、速いサイクルでは大巾に減少させることができるが、本来泡箱の体積に比例するものであり、大型の泡箱では、冷凍装置の熱負荷としての主な部分を占めることになり、重要な問題である。

4.2 熱的負荷と冷凍機

(4.1)項で述べたような機構による熱の発生の外に、もちろん外部からの侵入熱量も考えられる。侵入熱量は大体表面積に比例すると見てよいから、とくに小型の泡箱では問題になる。この対策としては泡箱全体を真空槽の中に設置し、液体窒素で冷却した遮蔽板によって、外部からの熱放射による侵入熱量を抑える。真空に関しては、泡箱全体が大きなクライオポンプとして働くから、原理的

* 水素原子の密度からいえば、プロパンの方が大きいから、この場合には炭素原子も含まれていて、純粋ではない。

** 大体 $23^{\circ}\text{K} \sim 28^{\circ}\text{K}$ 位が普通である。

にはあまり大きな真空ポンプは必要としないが、実際には泡箱からの水素のリークが皆無ではないので、このような水素を排気するために、かなり大きな真空ポンプ（普通は油拡散ポンプ）が用いられる。

このように、泡箱内で発生する熱量や外部からの侵入熱量*と見合うだけ、泡箱を冷却しなければならないが小型のものを除いては殆ど冷凍機を内蔵している。内蔵している冷凍機的能力は、泡箱の特性によっても異なるがたとえば、Berkeley の 72吋泡箱では、温度レベル 27.5°K で、 1800kW 、CERN の 2m 泡箱では、温度レベル 23°K で 4000kW の能力を持っている。

4.3 膨脹機構

泡箱内の液体水素を膨脹させるには、次のようないろいろな方法がある。すなわち、

1. 弁による気体膨脹法
2. ピストンによる方法
3. ベローズまたはダイヤフラムによる方法
4. 窓その他泡箱本体の一部を動かす方法

等である。時には上に述べた方法のいくつかを組み合わせることもある。この中で、1 の弁による気体膨脹法が最も多く採用されているようである。この方法では二個の弁（三方弁または四方弁一個で行うことも可能）を割合に高い温度レベルで動作させるだけで、泡箱は確実に動作する。他方、ピストン、ベローズ、ダイヤフラムまたは窓等を動かす方法は、そのストロークによって泡箱の体積を変化させる方式であるが、ストロークが充分とれないので気体膨脹方式ではなく、液体のまま膨脹させ減圧する。この場合の体積膨脹率は高々 2 % 程度である。いずれの方式でも極低温領域で確実に動作しなければならないから技術上困難な部分の一つになっている。

図 7 Berkeley 72吋泡箱の膨脹機構

* 膨脹サイクルによる熱発生を動的な熱量といい、外部からの侵入熱量を静的な熱量ということがある。

図 8 温度の不均一を少なくする方法

図 7 に示すのは、Berkeley の 72吋泡箱の膨脹機構の略図である。図から明かなように、気体膨脹方式を用いている。膨脹前には泡箱本体内部は高圧水素ガスによって、 $5.2\text{kg}/\text{cm}^2$ の圧力に保たれているが、膨脹弁を開くことによって、高圧ガスは膨脹タンクに流れ込み、泡箱内は瞬間的に $3.2\text{kg}/\text{cm}^2$ の圧力にまで減圧される。この間の時間は約 $10\text{m}/\text{sec}$ である。その直後粒子線が入射し、核反応が観測され写真に記録される。再圧縮の過程では、先ず膨脹弁が閉じ、次に再圧縮弁が開き、圧縮タンク内の高圧水素ガス（圧力約 $8.5\text{kg}/\text{cm}^2$ ）が流れ込み、泡箱内の液体水素を元の $5.2\text{kg}/\text{cm}^2$ にまで圧縮する。膨脹——再圧縮に要する時間は全部で約 $20\text{m}/\text{sec}$ である。この方式だと弁が動作する温度は割合に室温に近いが、比較的に楽であるが、逆に再圧縮過程で室温に近い水素ガスが泡箱内に流れ込むので侵入熱量が大きく、そのため泡箱内の温度分布が一様でなくなり、一つの欠点となっている。この欠点を改善するため、図 8 に示すような手段がとられている。再圧縮の際、高圧タンクから水素ガスが泡箱内に流れ込むのと同時に、その途中で液体水素を混入してやる。この方法により、温度の高い水素ガスは、冷却された後泡箱に流れ込むから、上に述べたような泡箱内の温度の不均一性は大幅に改善される。

図 9 に示すのは、ピストン方式の膨脹機構の原理図である。すでに述べたように、ピストンのストロークはあまり大きくとれないので、泡箱本体内部には気体は介在しない。ピストンは極低温で運動するため、シリンダーとの間の液体のリークは避けられないが、ピストンリングとの間の隙間を流れる液体水素の量は、ピストンの動きに比べて十分小さいようになっている。ピストン棒の長いのは、ピストンの動作機構を磁界（粒子運動量弁利用の）の弱いところで行うためである。ピストンを駆動するには、三方弁を動作させて高圧ヘリウムタンク（圧力約 $70\text{kg}/\text{cm}^2$ ） T_1 と A 部を連結すると、ピストン

図9 ピストンによる膨脹機構

は押し上げられて泡箱は膨脹する。このときB部のガスも同時に圧縮される。再圧縮の場合は、三方弁によって、A部と低圧ヘリウムタンク T_2 とを連結すれば、ピストンはB部内の圧縮されたガスの圧力によって、押下げて泡箱は圧縮される。

以上二つの例を挙げたが、それぞれ一長一短がある。気体膨脹方式は、弁の動作以外に可動部分がないため、機械的には最も簡単であり、膨脹弁の交換等に際しては、泡箱に液体水素を入れたままでも作業が可能である。一方運転時は、大量の水素ガスの移動があるので、温度の不均一その他の乱れが生じ易い。一方ピストン、ダイヤフラムその他の機構によるものは、液体水素の温度に可動部分があり、部品の交換等に際しては、泡箱全体を空にしなければならない*。しかし運転に際しての温度の不均一その他の乱れは気体膨脹方式よりも少く、性能も優れている。

4.4 ガラス窓

泡箱で起った核現象は、写真に記録される。したがって窓は、光学的にも十分平行で、内部に気泡等が混入していないものでなければならない。また同時に泡箱内部の高圧に耐えなければならないから、強度も十分のものが要求され、厚いガラス板が用いられる。厚みに関する大よその目安としては、強化ガラスに対して次のような式を用いると便利である。

$$5500 t^2 = P A f \quad \dots\dots\dots (4)$$

* 泡箱を空にしたり、再び液体水素をつめるには、非常に長い時間がかかる(約70時間位)。

図10 膨脹型ガスケット

ただし、 t (cm) = 窓ガラスの厚さ
 P (kg/cm²) = 圧力(最大)
 A (cm²) = 窓ガラスの面積
 f = 安全係数

である。たとえば、直径 30cmの泡箱で、最大圧力=30 kg/cm² とすれば、 $f=5$ として $t=4.5$ cm が得られる

ガラスは、内部の温度勾配によって内部応力が増し破壊してしまうので、泡箱の運転開始の際は、ゆっくり冷却して液体水素の温度まで下げることが肝要である。運転を停止する場合も同様である。冷却の場合は、冷却速度は 4°K/hr越えないようにゆっくり冷却する。したがって、室温から開始すると、65時間程の時間がかかることになる。

4.5 膨脹型ガスケット

すでに述べた如く、断熱のため泡箱は真空槽の中に設置されるが、真空シールのためのガスケットは、極低温に耐えなければならないので、当然金属ガスケットとなる。泡箱本体の組立てに関しても金属ガスケットが用いられ、とくに観測用ガラス窓の取付けについてはガラスを損傷することなくシールを完全にするために、いろいろな工夫がなされている。ガラスを保護するためには、軟い金属ガスケットを選ばなければならないが、鉛は液体水素の温度では硬くなって不適當である。これに反し、インジウムは液体水素の温度でも、常温での鉛と同程度の軟かさを持っているのでガスケットとしては適当といえる。しかし、常温から 25°K 程度までの大きい温度変化による金属とガラスの熱収縮の差は大きく、普通の方式でシールを行うことは到底できない**。そこでこ

** たとえば、72吋泡箱では、窓ガラスと金属との熱収縮の差が、約 1.5mmにおよぶ箇所がある。

の困難を解決するために、図10のような“膨脹型ガスケット”が考案された。図はこの方式によるガスケットの断面図であるが、ステンレスの薄肉パイプ状のものA、Bに支えられた金属ブロックC、Dにそれぞれインジウムガスケット用の溝が二本切っており、それぞれガラス面および泡箱本体のフランジに密着している。インジウムガスケットを押えつける圧力は、二つのステンレスパイプに高圧のヘリウムガスをつめて、ふくらますことによって行われる。したがって、熱収縮によって多少寸法の差が生じて、十分その寸法差に対応できる。二本のガスケットの中間部は、さらに補助ポンプで排気して、シールの完全を期している。

4.6 全体的な構成

泡箱は以上述べた各部分の外に、真空排気系、事故の際の安全装置、泡箱全体を極低温レベルに保つための冷凍機、更に実験に必要な付属装置として、電磁石、照明装置、カメラ等から構成されている（図11、図12）。安全装置は、事故等によって泡箱内の圧力が異常に上った際、安全弁を開いてあらかじめ排気してある真空タンクに高圧ガスを流し込むようになっている。液化機は、泡箱本体および熱遮蔽板に冷媒を流して、泡箱を低温レベルに保つためのものである。液化機については、ここではこれ以上言及しないことにする。

5. 付属装置

5.1 電磁石

泡箱を使用する実験では、比較的運動量の大きい粒子を対象とするので、強力な磁界の中でも粒子飛跡の曲率半径は比較的大きい。飛跡の曲率半径から粒子の運動量を精密に測定するには、曲率を精密に測定しなければな

図 12 泡箱の全体的な構造

らないから、泡箱を大きくするか磁界の強さを増すかして、粒子飛跡の曲率を泡箱の大きさに見合うようにすることが肝要である*。また観測は磁界の方向と同じ方向から行われるので、鉄芯の構造は観測に便するように設計されている。電磁石は泡箱中で最も大型な部分となり、たとえば Berkeley の72吋泡箱の電磁石は、鉄芯の重さが115トン、コイル重量が20トン、磁界の強さは18K Gaussとなっている。消費電力も他の部分に比して桁違いに大きく、約2.5MWの電源を必要としている。最近では、超電導コイルを用いた電磁石の開発も行われている。

5.2 照明装置、写真撮影

入射粒子の飛跡に沿って生ずる泡の列は、三次元的な図形を描き、これを正確に写真に記録するには、三つの異った方向からの写真が必要である。泡の成長は速く忽ち大粒の泡になってしまうから、撮影の際の露出時間は短く、しかもレンズの焦点深度を深くするため、あまり明るいレンズは使えず普通強力なフラッシュによって撮影する。

照明には暗視野照明と明視野照明とがある。前者はバックが暗く、泡だけが輝く点となるような

図11 泡箱の全体的構成

* 実際には、粒子は液体水素中でエネルギーを失うから、飛跡は円弧ではなく、補正が必要。

図 13 明視野照明法

図 14 簡単な暗視野照明の一例

図 15 Berkeley 72吋泡箱の暗視野照明法

照明法で、コントラストは良好で、殆どの泡箱にはこの方式が用いられている。後者は逆に、明るいバックの中に暗い点として泡が現れる方法で、照明法は簡単であるがコントラストはあまりよくない。図13に明視野照明法の一例を示す。

暗視野法の最も簡単なものを、図14に示す。点光源 S を発した光は、コンデンサーレンズによって S' に像を結ぶが、S' を避けて取付けられているカメラには入らず暗視野となる。一方泡箱内に生じた泡は光を散乱するから、泡は明るい点として写真に現れる。レンズ面あるいは窓の面によって反射された光の一部は、カメラに入る可能性はあるが、ガラス面をコーティングすることで、十分低い値にすることができる。

この方法は、窓ガラスやレンズ面の反射によって、ゴーストが現れることが欠点であり、また電磁石の関係で

図 16 コートハンガー

光源を反対側に取付けることが不可能の場合が多いのでやや複雑な方法が Berkely の72吋泡箱では採用されている。この方法によれば、光源 S とカメラとは共に本体の上部に取付けられており、泡箱本体の下側には、特殊な反射板が取付けられている。普通の反射板だと、反射による泡の像も共に写真に映ってしまうので、この反射板は図15に示すような構造となっている。すなわち図に示すように、いわゆるコートハンガー (coat hanger) と呼ばれる弓なり状に曲ったルーサイトの棒の一部に、アルミニウムの鏡面メッキを施したものを単体とし、これを多数平行に並べて反射板を形成している。各コートハンガー単体の向きは、光源の方向とし、その曲率の中心に光源がくるように組込まれている。コートハンガーの断面は、一種の円筒レンズとなっておりその焦点が丁度底部になるようになっている (図16)。したがって、光源から出た光が、途中散乱されずにコートハンガーに入射すれば、底部のアルミニウム面で反射されて、入射方向と平行に反射され、カメラには入らない。若し途中で泡その他によって散乱された後入射した光は、底部のアルミ面から外れてしまい、反射されずに吸収されてしまう。したがってカメラに入る光は、泡によって散乱され、直接カメラに入射したものだけであるから、泡は光った点として写真に映る。反射板による泡のゴーストが避けられることも、一つの利点である。また泡箱本体のガラス窓は、反射光がカメラに入らないように、やや傾けた状態に取付けられている。

5.3 写真解折装置

原子核や素粒子の反応を捉えたステレオ写真は、二枚あるいは三枚で一組であり、これらの写真から元の三次元的な飛跡を再現しなければ、反応についての正確な情報は得られない。最も簡単には、投影器等を用いて写真を投影し、手動によって目盛板を合わせて飛跡の座標を読取する方法であるが、次第に自動化され、フィルムをサーボモーターで動かして飛跡を自動的に追尾し、一定の間隔でその座標をテープにパンチし、更にこれを電子計

表 1 代表的な泡箱の仕様

項 目 泡 箱	液体 水素 容量 (l)	大 さ (cm^2)	窓位置	電磁石 磁界の 強さ (KG)	膨脹方式	繰り返し (c/s)	冷凍機 能 力 (kW)	動作 温度 ($^{\circ}K$)	動作圧力 (kg/cm^2)		現在の 段階
									高	低	
BNL 20"	60	$50 \times 25 \times 23$	水平 2 枚	17	—	—	—	25.2	—	1.8	完成
UCRL (Berkeley) 25"	90	$60\phi \times 30$	水平 2 枚	23	ベローズ (窓移動)	$\frac{1}{6} \sim \frac{1}{2.5}$	—	27	5.8	3.7	〃
UCRL (Berkeley) ⁷⁾ 72"	520	$180 \times 50 \times 40$	水平 1 枚	18	気体膨脹	$\frac{1}{6}$	1800	27.7	6.0~ 5.4	3.5~ 3.1	〃
CERN 2m ⁷⁾	1000	$200 \times 60 \times 50$	垂直 2 枚	15	ピストン	1	4400	26.7	5.0	1.6	〃
素粒子研* 中 型	190	$75\phi \times 35$	垂直 1 枚	14	ピストン	1~2.5	1000 ~1500	26	—	—	建設中
ANL 12 ft	25000	$370\phi \times 230$	—	—	—	—	—	—	—	—	〃
BNL 14 ft	40000	$430\phi \times 300$	—	20	—	—	—	—	—	—	計画中

* 現在東大核研素粒研究所準備調査室が中心となつて建設中

図 17 建設期間と泡箱容積の関係

図 18 建設費と泡箱容積の関係

算機にかけて計算するようになっている装置もある。フランケンシュタインと呼ばれるフィルム解析装置などはその一例である。

6. 結び

最近ではますます泡箱の大型のものが計画され建設されている。表 1 に、現在稼動中あるいは建設、計画中の主な泡箱についての仕様をまとめてある。また、建設費建設に要した時間は、世界各所の泡箱についてのデータをグラフとして、図 17、図 18 にまとめてあるが、この建設費の規模から見ても、現在わが国の最大級の加速器の建設費、建設期間と同程度であることが分る。

わが国でも、将来建設を計画されている素粒子研究所の準備研究の一部として、中型の液体水素泡箱がすでに建設中である。しかし、世界的な水準から見れば、何年かの遅れを認めない訳にはいかない。

協会からの御依頼もあり、大それた解説を御引受してしまい、甚だ不十分な解説に終わってしまったことが心残りである。この稿をまとめるに当たって、広島大学の喜多勲教授、東大核研田中治郎助教授、同平林洋美氏に泡箱に関し多くのデータを頂き、また、いろいろ御教示を賜った。厚く感謝の意を表します。

〔文 献〕

- (1) D. A. Glaser : Phys. Rev. 87 (1952) 665.
- (2) J. G. Wood : Phys. Rev. 94 (1954) 731.
- (3) R. Fürth : Proc. Camb. Phil. Soc. 37 (1941) 252.
- (4) W. I. Goldburg : Bull. Amer Phys. Soc. (1958).
- (5) D. H. Glaser et al. : Phys. Rev. 102 (1956) 586.
- (6) R. H. Hilderband and D. E. Nagle : Phys. Rev. 98 (1953) 517.
- (7) D. F. Shau : Cryogenics 4 (1964) 193.