宇宙線が見える?簡単・林式高感度霧箱を作って 宇宙線を観察しよう

名古屋大学基本粒子研究室客員研究員 林 熙崇

[宇宙線が見えるの?]

宇宙線の多くは原子よりもさらに 1000 万倍以上小さい素粒子と呼ばれる電気を帯びた粒子です。とても小さいので、最大の拡大率を誇る電子微鏡でも見えません。顕微鏡でも見えない大きさの素粒子ですから、宇宙線そのものは見ることが出来ません。しかし宇宙線が通った跡は見ることが出来るのです。

皆さん飛行機雲を知っていますね。青い空を高高度で飛んでいる飛行機は肉 眼ではほとんど見えませんが、飛行機が飛行機雲を引いていると飛行機本体は 見えなくても飛んでいる位置がすぐわかります。



宇宙線の飛行機雲をつくる装置が霧箱です。



高感度大型霧箱中を水平に近い角度で通過した宇宙線の飛跡

「霧箱で宇宙線の飛行機雲が出来るわけ〕

飛行機雲は-50℃くらいに温度の下がった高い空で出来ます。温度が低いため、水蒸気が飽和水蒸気の状態を通り越して**過飽和状態**(その温度では水蒸気が気体で存在できる満杯状態以上に水蒸気が存在する状態)になっている空間を飛ぶ飛行機のジェットエンジンから放出された燃焼ガス中の多量の**微粒子が核になって周囲の水蒸気がドバっと集まり、目に見える雲になったものです。**

宇宙線の粒子は多くが電気を持っています。物質を作る原子は中心に+の電気を持つ原子核があり、原子核から遥かに離れた外側を-の電気を持つ電子が雲のように広がって取り囲んでいます。そこへ電気をもった宇宙線がやってくると電気力(引力もしくは斥力)で電子を原子の外へ飛ばしてしまいます。電子が抜けた原子は「電離した原子」=「イオン」となります。

霧箱で宇宙線の飛行機雲が出来る原理は上下が逆さになりますが、上空にできる飛行機雲と似ています。

- ① 霧箱の下部をドライアイス $(-78\mathbb{C})$ で $-50\mathbb{C}$ 以下に冷却します。
- ② 霧箱上部からアルコール蒸気が拡散します。
- ③ 霧箱内を拡散するアルコール蒸気は下ほど温度が低いので、下方に向かう 途中で飽和状態になり、さらに下がると過飽和状態になります。
- ④ 宇宙線が空気中を通ると、通り道にあった窒素や酸素の原子が電離され、 イオンになります。
- ⑤ 過飽和蒸気の中で宇宙線によるイオンができると、イオンが核になってアルコール蒸気がドバっと集まり(100 万個以上か)、目に見える大きさのアルコールの液滴に一瞬で成長します。
- ⑥ 宇宙線が通過した後がアルコールの小さい液滴の列(飛行機雲)になって見えます。

1 林式高感度霧箱の特徴

宇宙線の飛跡が見える高性能の霧箱をホームセンターや100円ショップで購入できる材料で簡単に安く作ります。

宇宙線や β 線は空気(窒素や酸素の原子)を電離する作用が α 線より弱く、 霧箱内を素粒子が通過するときに出来るイオンの数が α 線に比べて大幅に少ないです。そのため α 線のように簡単に飛跡が見えません。

それを見えるように工夫した重要なポイントが次の5点です。

- ① **霧箱の底をアルコールのプールにする**。 飛跡ができる過飽和層が深く、安定するようになった。
- ② 上面を薄いポリメチルペン材のラップフイルム(厚さ 11 μm) にする。 アルコール蒸気との相互作用が少なく、外気と霧箱内上面との熱交換も 比較的うまくいく蓋にした(無添加ポリエチレンラップも代用できる)。
- ③ フレームの内側を黒ラシャ紙で覆う。

黒ラシャ紙は

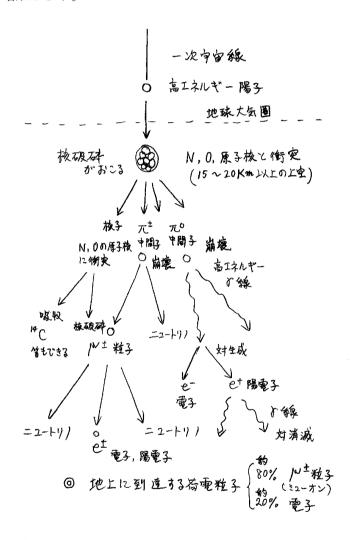
- (a)外部光の遮光と内部の反射光を吸収する
- (b)底のアルコール液を上部に運ぶポンプの働きをする
- (c)上部でアルコール液を蒸発させる蒸発器の働きをする の三つの働きをする。
- ④ 淡い飛跡が見えるように観察方向から照明光をあてる。 宇宙線の飛跡は電離するイオンの数が少なく、飛跡になる液滴の数が少ない。 それで、反射光量が出来るだけ多くなる観察方向からの照明方法にする。
- ⑤ **霧箱の底は照明の反射光が少なくなるように黒のベルベット布にする。** コントラストが増し、淡い飛跡も観察できるようになる。
 - *工夫により高感度な状態で、安定して観察できる霧箱になりました。
 - *この霧箱は放射線源を霧箱内に入れなくても放射線の飛跡が見えます。
 - *上空や周囲からやってくる宇宙線や B 線を観察できます。

*宇宙線は私たちの周囲に絶え間なく降り注いでいる

宇宙線や放射線の飛跡を肉眼で直接観察できる高感度霧箱を製作します。開発した高感 度霧箱は霧箱内に放射線源を入れなくても放射線の飛跡が数多く見えるのが特徴です。

地球内部から出てきて崩壊し、空気中のごみに付着して浮遊している放射性物質や、宇宙からやってきて、私たちの頭上から降り注ぐ宇宙線をとらえることができます。

下図は上空から**地上に降り注ぐ 2 次宇宙線がやってくる様子**です。10 km くらいの高度で 粒子数が最も増殖します。



- * 宇宙線やβ線は霧箱内で飛跡の元となるイオンの発生数が少なく、イオンを多く作る α線のようには簡単に見えません。
- * すべての放射線を観察できるようにしたのが今回製作する高感度霧箱です。 (この方式の高感度霧箱の開発者名をつけて林式霧箱と名付けます)

2 林式高感度小型霧箱の製作

(材料の加工から始めても2時間はかからない。加工した材料を手元に置けば40分で本体完成?)



動作状態の完成した高感度小型霧箱

2-1 材料を用意する

1. 段ボールプラスチック(ダンプラ)910mm×910mm×4mm 材(ホームセンター)の サイズが一般的である。

2. アルミバット6号 (216×157×30mm) (ホームセンター)





- **2. ガムテープ (黒) 50mmh 幅** (ホームセンター)
- **3. 接着剤** スプレーノリが便利であるがすこし高価(約 2000 円 net 430ml)である プラスチック用接着剤のボンド **GP クリヤー等が良い** (ホームセンター)



4. ベルベット布 (黒) (通販もしくは布地専門店―名古屋の場合、大塚屋車道本店)



5. 5~7㎜幅のライラク ソフトゴムテープ (ダイソー)



6. ドアアタリ防音テープ 70cm (ホームセンター)



7. **黒ラシャ紙(395mm×545mm) 1枚**(東急ハンズ、ホームセンター)



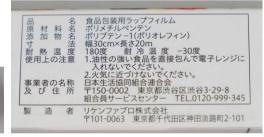
8. 100mm 幅ストレッチフイルム 1本 (ホームセンター)



9. ポリメチルペンテン材ラップフイルム {生協 (coop) は 300mm 幅、リケンラップフイルム—通販 は 300mm,450mm 幅である}

[注意] (無添加ポリエチレンラップフイルムは代用できるがサランラップ等は不適当)





- **10. 断熱材** $\{$ スタイロフォーム材(ホームセンター)で断熱箱を作ると良い。ただし 2 時間程度の観察であればドライアイスと霧箱を $7\sim10$ 重の新聞紙でくるんだもので間に合う。 くるんだ新聞紙の下にさらに新聞紙を厚く敷くと良い。)
- **11. 燃料用アルコール (ネンアル)** (スギ薬局やホームセンター内にある薬局で 500ml が 330 円前後で購入できる。



・エタノールも霧箱に問題なく使えるが 500ml で 1400 円以上と高価、プロパノールも 使用できるが販売している薬局が少ない。

《注意》消毒用アルコールは水が25%入っていて、使用すると霧箱の底が凍って全面真っ 白になり、飛跡が見えなくなる。使用不可。)

12. ドライアイス {1 kg単位で小売りしてくれる卸店―名古屋市内だと小島商会 (052-916-2693-北区)、タカギ産業(052-331-6551 中区)、昭炭商事(株) 名古屋ドライアイスセンター (052-381-1200 港区)、(株) イフェクト (052-331-6821 中区) 等がある。また宅配便 (3~5 kg以上) でも送料分高いがドライアイスを入手できる。}

2-2 組み立てる

1. アルミバットの底に入る大きさのフレームをつくる段ボールプラスチックの 折り曲げ位置を決める。

(2重に段ボールプラスチックを用いるので、厚さも考慮して寸法を決める)

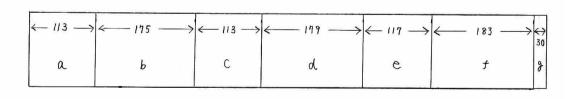
フレームは2重で、高さは13~13.5cm くらいにする。

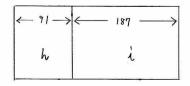
(横幅 $191 \, \text{mm}$ 、奥行き $119 \, \text{mm}$ 、高さ $135 \, \text{mm}$ くらいのサイズだとアルミバット $6 \, \text{号に}$ うまく入る。)

「参考寸法]

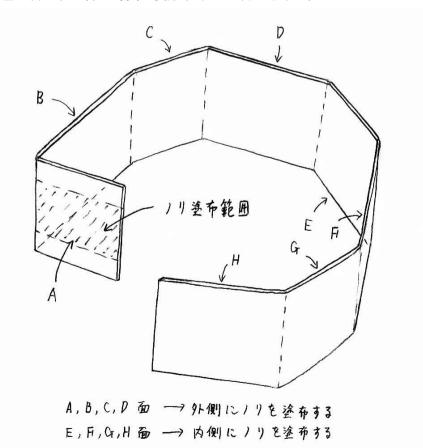
910mm×910mm の段ボールプラスチック板(プラバン)から縞目が横向きになる様に、幅約 135mm(段ボールプラスチックのステーの無い部分で切り取る)の板を作る。その板に図の寸法図で折り目の線を引く

(1820 $\text{mm} \times 910 \text{mm}$ の段ボールプラスチックの場合は \mathbf{f} の 183 mmの次に \mathbf{g} と \mathbf{h} 部分が重なった寸法 121 mmを取る。最後の \mathbf{i} は 185 mmでよい)。





- 2. カットした段ボールプラスチックを寸法位置できちんと折り曲げる。
- [重要] この時、折り曲げる位置に切り込み等を入れると曲げやすいが、 強度が下がるので切り込み等の曲げ易くする操作を加えてはいけない。
 - *切り込み等を入れないで、寸法の位置できれいに曲げる方法の一例
 - ① 段ボールプラスチックを曲げる寸法位置で机のエッジに置き、
 - ② その上から板で強く押さえたまま、曲げる向きに別の板で押して曲げる。
 - *この状態でフレームを組むと少し太鼓上に膨らんだ長方形になるが、その形を保持する ことが大事(フレームの強度が増す、上部のラップフイルムがきれいに張れる)。
- 3. 折り目がついてからもう一度展開して、
 - ① 下図の各面にボンド GP クリヤーをノリ塗布範囲内でラフに薄く塗布する
 - ② 机などの平面上で、長方形になる様に A 面と E 面を重ねてフレームの形にし、 隙間が出来ないように押さえながら B, C, D 面と順番に接着していく。 (少し太鼓上に膨らんだ形は保つ)
- **注意** ゆがんだ形で固まらないように注意する、また強く押さえて一度接着した部分は 無理に剥がすと材が奇異に変形するので剥がさない)



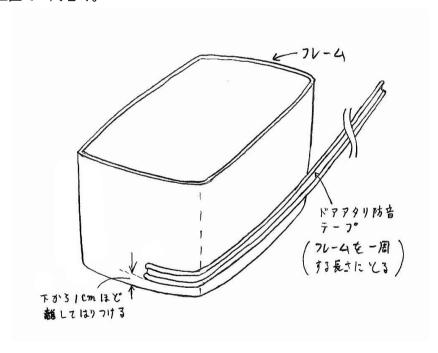




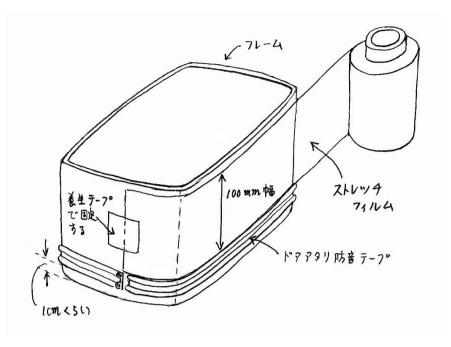
3 の写真

4の写真

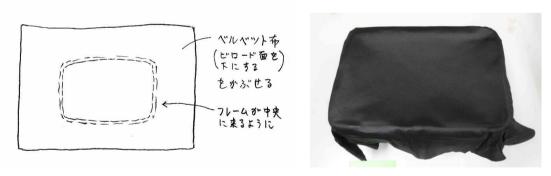
- 4. フレームの上部を黒色ガムテープで隙間なく覆う。
- 5. ドアアタリ防音テープ (裏面が粘着面になっている) をフレームの下端から 1cm ほど 上の位置で一周巻く。



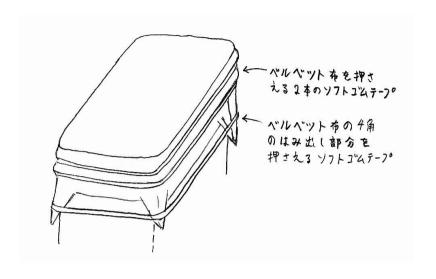
6. フイルムの下端がドアアタリ防音テープの上端に来るようにストレッチフイルムを 少し張力をかけてフレームに3重に巻く



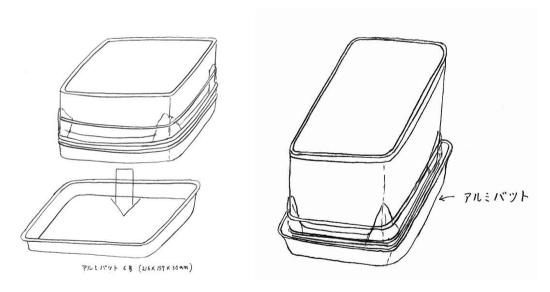
- 6. 5~7 m幅のソフトゴムテープで フレーム一周の 3/4 くらいの長さのテープを 3本 つくる。 そして各々の両端を縛って輪ゴムを 3 本作る (結んだ出っ張りが 2cm 以内 になる様に)。
- 7. フレームの下部(ガムテープを貼らなかった方))を上にしてベルベット布をビロード面が下面になる様にかける。(ベルベット布の大きさは折れ曲がった各辺が 5 cm は垂れる余裕度が必要)。



- 8. (a) ドアアタリ防音テープがある位置のベルベット布の上にソフトゴムテープの輪ゴムをかけてベルベット布を固定する。
 - (b) ベルベット布を下に引っ張り、布がピンと張った状態で、2本目のソフトゴムテープの輪ゴムをドアアタリ防音テープの下側 (ベルベット布の端が出る方)にかける。
 - (c) 4 角にはみ出すベルベット布は3 本目の輪ゴムでベルベット布を押さえる。



9. アルミバットの中にベルベット布面を下にしたフレームを押し込む



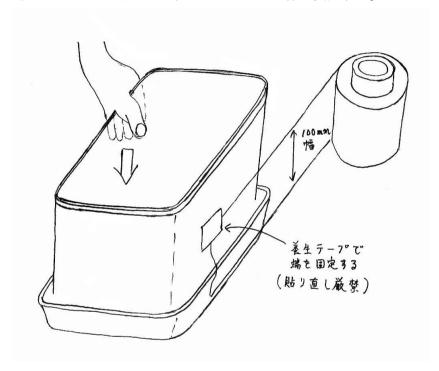
10. フレームの中にアルコールをおおよそ 100ml ほど入れる (アルコール液の中でベルベット布があちこちで液面の上に顔を出している状態になる)

- 11. a. アルコールを入れて1分くらいは放置して、ベルベット布にアルコールが十分に しみこむのを待つ
 - b. フレーム中のベルベット布を見ながら、ベルベット布の端を引っ張って底面の ベルベット布の凸凹を無くする

12. a. 養生テープでストレッチフイルムの端を止めてから、図のようにフレームを下向き に押さえた状態で、ベルベット布の凸凹が目立たないことを確認する

(凸凹があれば、押さえた状態でベルベット布の端を引っ張って凸凹を無くする)。

b.目立った凸凹が無ければ上からフレームを押さえたまま、ストレッチフイルムの下側がアルミバットの下の方まで来る位置で、張力を強くかけながら 3 重に巻き付けて、アルミバットとフレームをストレッチフイルムで一体に固定する。







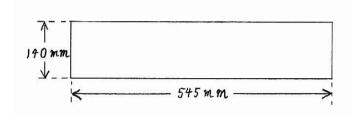
注意点

ストレッチフイルムの下端がアルミバットの下の方まで来るように巻く。

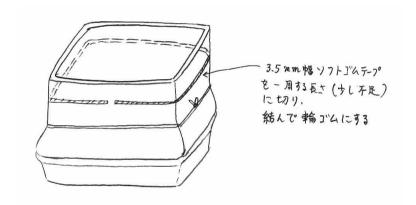
(ただしストレッチフイルムの下端がアルミバットの下端より下にはみ出さないこと)

*霧箱本体の組み立ては完成です

- 3 林式高感度霧箱を動作させる
- 3-1 林式高感度霧箱のセッテイング
- ① 準備する
- (a) 図の寸法の黒ラシャ紙を2枚用意する



(b)3.5~5mm 幅のソフトゴムテープを下図のようにカットして、結んで輪ゴム にしたものを一本用意する



(c)燃料用アルコール(ネンアル)を約 300ml 用意する

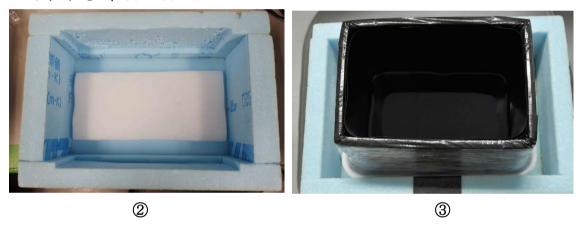


(d)ポリメチルペンテン材のラップフイルムを用意する

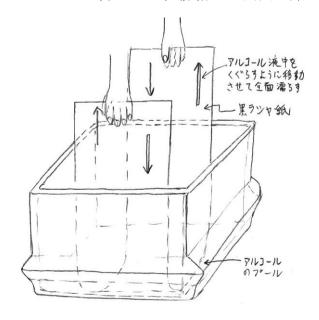


(e)明るい LED 懐中電灯(自転車用の強力なものは特に良い)を用意する。

- ② 断熱箱 (スタイロフォーム材) にドライアイスを入れる (写真は 1kg ⇒12cm×24cm×2cm のドライアイス) 断熱箱を使わない簡易方法
 - . 2時間程度の観察であれば10枚ほど重ねた新聞紙の上にドライアイスを置き、その上に霧箱本体を乗せて③~⑥までの作業をおこなう。⑥までの作業が済んでから新聞紙の側面を曲げて霧箱の側面を包み、その状態で新聞紙をひも等で縛って広がらないようにする。その霧箱の入った新聞紙をさらに10枚以上重ねた新聞紙の上において観察すると良い。
- ③ ドライアイスの上に霧箱本体を乗せて燃料用アルコール (ネンアル) を霧箱 に入れる (200~250 ml



④ 黒ラシャ紙にアルコールを含ませて、霧箱の内側面に貼る



(a) 底のアルコールプールに黒ラシャ紙が上図のように浸かる状態にして、浸っ

た状態でラシャ紙を図のように上下に移動させて、ラシャ紙全体(端まで)がアルコールでべったり濡れた状態にする (使い捨てのポリ手袋等をして上の作業をすると良い)。

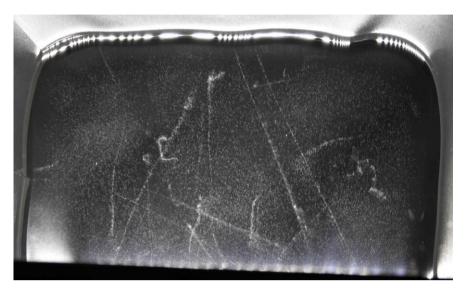
- (b) 濡れたラシャ紙の濡れを利用して霧箱の内面に貼り付けていく。 (4 角は貼り付けないで丸く放置する)
- (c) 1枚目のラシャ紙の貼り付けが終わったら、2枚目も1枚目と同様に全体を アルコ―に浸してから、1枚目の上から貼っていく (くっつくと動きにくいので端から貼っていく)
- ⑤ 底のベルベット布がアルコール液表面から浮き出て、干潟が出来ている場合 はアルコールを追加して干潟が完全に液の中に隠れるようにする。
- ⑥ ポリメチルペンテン・ラップフイルムで蓋をし、しわがよらないように引っ 張ってぴんとさせ、①-(b)で作った 3.5~5 mm 幅のソフトゴムテープの輪ゴ ムで固定する。



注意(霧箱の上部ストレッチフイルム面にラップフイルムがくっつくので、くっつきを利用して軽く引っ張りながらピンと張って、折り曲げると仕上がりがきれいになる)

- *ドライアイスで冷却を開始してから 10~15 分ほどすると飛跡が 見えるようになる。
- *懐中電灯(明るさの強力なものほど良い)の光を観察方向から内部を照らすと霧箱内部にできた飛跡が鮮やかに見える

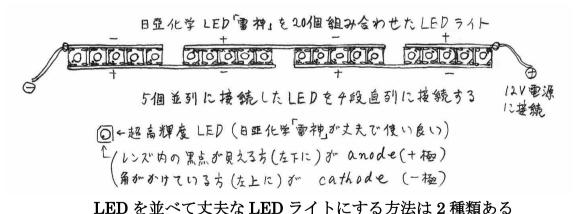
(シューと走る直線や、くねくね曲がった糸くずのように見える細い霧の線が現れる。それらが宇宙線や環境β線の飛跡である)



[補足1]

LED ライトの製作

懐中電灯では全面を同時に照明できないので、飛跡を十分に観察できない。 飛跡をきちんと観察するには霧箱内を全面照明できる明るい LED ライトが必要である **日亜化学の明るい白色 LED を用いた霧箱用の LED ライトの製作方法を紹介する**



(a) 21cm 長のユニバーサル基板を LED が並ぶように細長くカットする。その基板に LED を 20 個さしこみ、スズメッキ線(0.5mm)で配線して半田付けする。

明るい LED ライトが出来る。

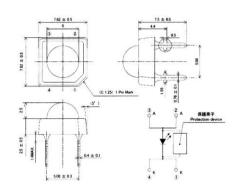
この方式の LED ライトは機能的にベストであるが欠点もある。製作するとき、不要部分の基板が出来ること、基板カットに手間がかかること、基板代が高いこと等である。

(b) **基板の加工無しで安く作る方法がある。割りばしに、LED 20 個を図のように 5 個組単位で、割りばしに挟んで固定する**(LED の 4 本の足を利用して挟む)。その足を図のようにスズメッキ線(0.5mm)で配線し、半田付けして完成させる。

これも明るい LED ライトになる(基盤のものより少し太めになるのが欠点)。

日亜化学の雷神 LED のカタログ





この LED ライトを 2 本並列に並べて霧箱内を照明すると、蛍光灯の下でも飛跡を十分観察できる明るさになる

(写真は細長くカットしたユニバーサル基板に LED をセットしたもの)



電源は市販のアダプター型の 12V、1Aの直流電源で良い。

注意・(LED ライトのコードに電源アダプターに適合するメスコネクターをつけておく)



*製作した LED ライトを用いた照明方法

- (a) LED ライトを観測者に近い方のラップの上に置き、照明光の中心が 20~30度くらい斜下の前方に向くように置く。
- (b) コネクターを 12V 電源アダプターにつないで点灯する。(LED ライトから 出ているコードを霧箱側面で前後させると照射方向を簡単に調整できる)





(a),(b)

(c)

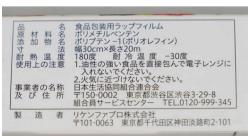
(c) LED ライトの上に遮光用の黒紙をかぶせる。

《重要》 霧箱にはネンアル (燃料用アルコール) を使用しています。 引火の危険性があることを頭に入れて実験しましよう。

「補足2]《重要》

- **霧箱の上面を覆うラップの材質は霧箱の性能に大きく影響を与える。** (添加物等が大きく影響しているのではないか?)
- ◎霧箱上面のラップとして良かったのは写真のようなポリメチルペンテン材のラップフイルム、それに次ぐのが無添加ポリエチレンのラップフイルムやストレッチフイルムであった。









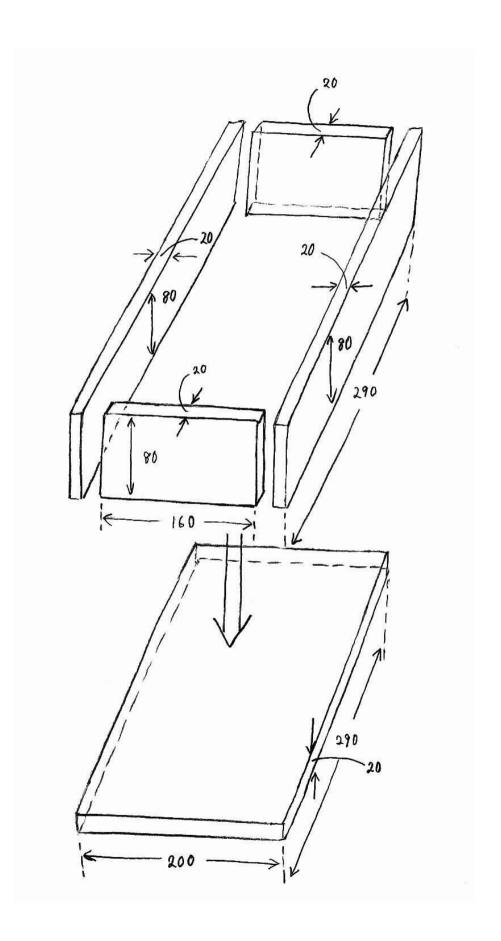


- ・塩化ビニール素材のラップが最も悪かった、塩化ビニリデン素材のラップ (クレラップ、サランラップ) も良くなかった。
- ・ラップの添加剤も原因の一つになっている。同じポリエチレンラップでも無 添加ポリエチレンラップと、添加剤使用ポリエチレンラップとで差が出た。

[補足3] 断熱箱の製作

図のような寸法にカットしたスタイロフォーム材(建築用断熱材)を ボンド GP クリヤー等のプラスチック用接着剤を用いて接着すると 長期間壊れない安定した断熱箱が出来る。

*急ぐときはガムテープで各辺を仮止めしてから、しっかりと全周 をガムテープで補強する方法でもよい。(スタイロフォーム材はガ ムテープと相性が悪い。ガムテープとガムテープを粘着させる)



4 霧箱でなぜ宇宙線の飛跡が見えるのか

4-1 宇宙線や素粒子の飛跡をとらえて研究するための道具は、さまざまなもの が考えられ実用化されてきている。霧箱はその中でも長い歴史を持つ測定 器の一つである。

ほとんどの物質は、気体、液体、固体とその有り方(相)を変化させる。例えば水では、大気圧下では、0度で凍って固体になり、100度で沸騰して気体になる。一方、蒸発と液化は水面ではいつも起こっており、水分子が空気中へ蒸発する過程が起こるのと同時に、蒸発した水分子が液体に戻る過程も進行している。

密閉した容器中では、この蒸発と液化の過程が平衡状態になっている。この とき、水面の上の空気中に含まれる水蒸気の量を**飽和水蒸気量**という。(飽和水 蒸気量は温度に依存していて、温度が高いほど多くなる。)

何らかの原因でこの飽和水蒸気量より多い水蒸気が存在する状態が起こることがあり、これを**過飽和状態**と呼ぶ。過飽和状態はきっかけがあると、本来の飽和状態に戻るが、その際に余分の水蒸気が液化される。

この液化のきっかけは、水蒸気中に**核**になるものがあると起こりやすく、このような核になるものを**凝結核**と呼んでいる。凝結核に水蒸気が凝結していき、水滴が目に見える大きさまで成長すると、霧滴、あるいは雨粒と呼ばれるものになる。

放射線が空気中を通過すると、空気が電離されてイオンができる。

アルコール蒸気が過飽和になっている状態だと、そのイオンが凝結核となって目に見える大きさまで液滴が成長する。

液滴は放射線が通った後を連なってできるから、飛行機雲のように放射線の 飛跡が目に見える。これが霧箱である。

過飽和状態をつくる方法として**静的につくる方法と、動的につくる方法**がある。

世界で最初に霧箱を考案したウイルソン(イギリス人)は動的方法を用いた。

動的方法の霧箱はウイルソン霧箱とよばれていて、ピストンやゴム幕などを 瞬間的に動作させて、容器内を減圧する方法である。気体の断熱膨張によって 温度が低下し、瞬時に過飽和状態が実現する。

この霧箱は放射線が霧箱内に入る (イオンが出来る) タイミングと、断熱膨 張のタイミングが同期しないと飛跡ができない。またメカニカルな装置が必要。

*今回製作した霧箱は上が温かく、下ほど温度が低くなっている気体中に アルコール蒸気を拡散させて、

静的にアルコール蒸気の過飽和状態をつくる霧箱である。

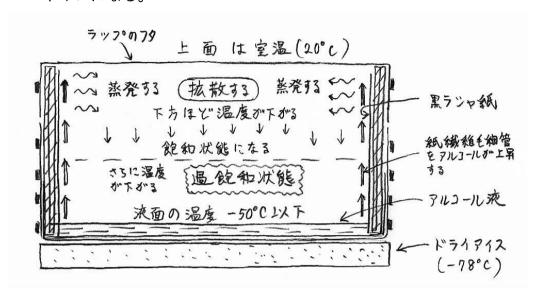
この方式の霧箱を拡散型霧箱とよぶ。

*飛跡が見える場所が霧箱の下の方になるのは、アルコール蒸気が過飽和状態 になる位置が容器の下の方になるからである。

4-2 林式拡散型霧箱の動作

- ① 過飽和層の形成
- (a) 段ボールプラスチック容器の中で、上方のラップフイルム面は室温の空気に接して温められている。下方のアルコール面はドライアイスでー50℃以下に冷却されている。
- (b) 〈下ほど気体温度が低い〉 ⇒ 〈下ほど気体密度が大きい〉 〈下の気体が重く、上の気体が軽い〉ので対流が起こらない。
- (c)上面近くで蒸発したアルコール蒸気は、拡散によってのみ、下方へ移動していく。下がるにつれて冷却されていくので、いずれかの場所で過飽和状態が 実現する。
- ① 飛跡の核になるイオンの形成
 - ・荷雷粒子は大きなエネルギーを持っている。荷雷粒子が気体中を通過する

- と、気体を構成する原子の電子が軌道からはじき出されて、原子は イオン化する。
- ・空気中では窒素分子が多くイオン化される(酸素分子は 1/5 の確率で起こる)→窒素原子は+イオンになる。
- ・そして、はじき出されて原子外に去った電子の多くが酸素分子に付着して ーイオンになる。



- ③ ドライアイスで冷却された下部の過飽和層では+イオンと-イオンを核にしてアルコール蒸気が凝結する。液滴が 0.1 mmくらいのサイズに成長するまで凝結が一気に進む。
- ④ イオンが荷電粒子の通過した道筋に出来るので、凝結した液滴が連なって 飛行機雲のような飛跡になる。
- ⑤ 飛跡になった液滴は重いので、雨となってアルコールの海に落下する。
- ⑥ アルコールの海のアルコールは側面のラシャ紙中を毛細管現象で上昇する。上部に達したアルコールはそこで蒸発する (上部は室温である)。
- ⑦ 蒸発したアルコールは拡散し、下降して過飽和層を作る。そこで荷電粒子がつくったイオンを核にして、液滴に成長して飛跡を作る。そして落下する。
- ⑧ このようにこの霧箱は循環型になっていて、アルコールの補給無しで、安定して、荷電粒子の飛跡をドライアイスの冷却が終了するまでつくり続ける。