

線スペクトル偏光分光装置 CCD dewar 真空冷却実験報告 (1)

東北大学大学院理学研究科天文学専攻
博士課程後期 2 年
秋田谷 洋

2000 年 4 月 25 日

1 はじめに

線スペクトル偏光分光装置の CCD dewar について、dewar 内部の部品をほぼ全て含めての真空引き、冷却実験を行なった。内部部品を含めた上で $\sim 10^{-6}$ Torr 程度の高真空が達成できるか、また、CCD chip を含めた被冷却体を ~ 150 K 程度に冷却できるかを確認することが目的である。

2 実験

準備として、dewar 内部に、以下の部品を、適当な洗浄の上設置した。

- M-Front CLKAMP および専用アダプターボード
- コールドプレート (90mm × 70mm × 2.5mm; 無酸素銅)
- コールドプレート支柱 4 本 ($\phi 10$ mm, $l = 35$ mm; ポリカーボネイト製)
- CCD chip (mechanical sample)
- モレキュラーシーブス
- 冷凍器ヘッド～コールドプレート間銅線
- 銅-コンスタンタン熱電対 (冷凍器制御用)
- 白金抵抗 (100 Ω) (4 回目の真空引き・冷却より)

これらの部品は、dewar 内部に含まれるほぼ全ての部品となる。

4 回に渡り、真空引き、冷却 (真空引き継続後、真空引き停止)、冷却停止を繰り返し、真空計 (真空ポンプ附属)、熱電対 (および白金抵抗) により内部圧力と cold plate の温度をモニターした。熱電対は chip 直下の cold plate 裏面に、白金抵抗は 4 回目の真空引き・冷却から、cold plate 端面 (冷凍器ヘッドからの導線の接続点とは CCD chip を挟んで反対側) に固定した。

実験は、東北大学天文学教室光学暗室にて 2000 年 4 月 1 日から 5 日にかけて実施した。期間中、室温は 20 – 25°C でほぼ安定していた。

3 結果と考察

3.1 実験結果

4回の真空引きにおける内部圧力の時間変化を図1に示す。また、それぞれの真空引き後の冷却における熱電対温度測定値の時間変化を図2に示す。図中には、真空引き停止の時刻と、冷却停止の時刻を矢印で記入してある。4回目の冷却時には白金抵抗を設置したので、熱電対と白金抵抗の温度測定値の比較を図4に示した。また、図4は、図4から一旦冷却を止め180 K程度に温度を上昇させたところで、再度冷却を再開したものである。途中で真空引きを停止し、その前後の温度変化をモニターした。

3.2 真空引き

内部圧力は、4回の真空引きともに、50～300minで 5×10^{-5} Torrに達し、 $\sim 10^3$ min程度で 10^{-5} Torrに達している。その後、冷却を開始すると短時間で 10^{-6} Torr程度まで低下する(図1)。

2、3回目の真空引きでは、圧力低下の速度が早まっているが、これは真空引きの繰り返しで付着気体の減少が生じているためと思われる。4回目の真空引きで若干圧力低下速度がににぶっているのは、この真空引きの直前に冷凍器ヘッド～コールドプレート間の銅線を増やし、白金抵抗取付け作業を行なうなど内部での作業を行なった為であろう。

いずれにしても、dewar内部に部品を含めていても現実的な時間内で十分高真空が達成できることを確認した。

3.3 冷却

冷却時の温度変化は真空引きを継続している場合と停止した場合で大きく異なっている。冷却開始後も真空引きを継続した場合、200min程度で目標温度である150Kまで達し(図2; 4回目の冷却 or 図3)、さらに冷却を継続すると、 ~ 130 Kまで冷却することができた。しかし、冷凍器を動作させているにも関わらず、真空引きを停止すると、急に温度上昇が生じ、最終的には冷却達成温度が200 Kを大きく上回ってしまう(図2; 1-3回目の冷却、1本目の矢印以後 および 図4)。

真空引きを停止した直後に温度上昇が見られていることから、内部のどこかで気体の放出が起こっており、真空引き停止と同時にほぼ内部が一定量の気体で満たされ、気体を通じた熱流入が発生しているのではないかと考えられる。目標温度が達成できないため、原因の解明と対処が急務である。

一方で、真空引きを行ないながらの冷却では200 min程度の短い時間で目標温度の150 Kを達成できたことから、主にウィンドウからの輻射およびコールドプレート支柱からの熱伝導による熱流入に対しては、冷凍器は十分な出力を持っていることが確認できた。

以下に、今回の実験結果を用いて、冷凍器出力や今回明らかになった未知の熱流入の量を見積もる。また、気体の熱伝導を考えた場合の熱流入量の見積もりの妥当性について考察する。

4 熱流入・冷却諸量の見積り

4.1 系の熱収支

dewar coldplate 部の熱収支は、およそ以下のように書ける。

$$Q_{in} = Q_C + Q_R - Q_{CRYO} + Q_{unknown} \quad (1)$$

ここで、 Q_C は coldplate 支柱などを通じた熱伝導による熱流入、 Q_R は輻射による熱流入、 Q_{CRYO} は冷凍器出力、 $Q_{unknown}$ は、真空引き停止後に生じる未知の熱流入である。

これを、真空引きを行ないながらの冷却時と真空引きを停止した後の冷却時に分けて書くと、それぞれ、

$$Q_{in} = Q_C + Q_R - Q_{CRYO}(\text{真空引き継続}) \quad (2)$$

$$Q_{in} = Q_C + Q_R - Q_{CRYO} + Q_{unknown}(\text{真空引き停止}) \quad (3)$$

となる。

また、ある温度範囲における温度変化を ΔT 、時間を Δt 、被冷却体の熱容量を H とすれば、熱収支は

$$Q = \frac{H\Delta T}{\Delta t} \quad (4)$$

とかける。

ここで、 H は、coldplate (Cu; 9.0cm × 7.0cm × 0.25cm; 8.9g/cm³; 385J/(kg · K))、ccd chip (Al; 2cm × 5cm × 3cm; 2.7g/cm³; 900J/(kg · K)) より、 $H = 126.9\text{J/K}$ である。

4.2 冷凍器の冷却性能

図 3 の Pt 抵抗の温度時間変化より、150K 付近において、

t (min)	100	→	212
T (K)	182.9	→	138.36

より、熱伝導と輻射の効果を含めた正味の冷凍器能力 Q_{cool} は、式 (4) を用いて、

$$-Q_{cool} = Q_C + Q_R - Q_{CRYO} = \frac{126.9(138.36 - 182.9)}{212 - 100} = -0.84\text{W} \quad (5)$$

となる。ここで、モデル計算によるコールドプレート支柱からの熱伝導による熱流入量 $Q_C = 0.25\text{W}$ 、ウィンドウからの輻射による熱流入 $Q_R = 0.36\text{W}$ (いずれも 150 K の場合) を用いると、150 K 付近における冷凍器の出力を

$$Q_{CRYO} = Q_C + Q_R + Q_{cool} = 0.25 + 0.36 + 0.84 = 1.45\text{W} \quad (6)$$

と見積もれる。

冷凍器出力の仕様値である 1 W @ 80K と比較すると妥当な値である。

4.3 真空引き停止後に生じる熱流入量

真空引き停止後、冷却継続中の熱流入は、図 4 の Pt 抵抗の温度時間変化より、

t (min)	290	→	348
T (K)	126.26	→	185.50

式 (4) を用いると、

$$Q_1 = Q_C + Q_R - Q_{CRYO} + Q_{unknown} = \frac{126.9(185.50 - 126.26)}{348 - 290} = 2.16\text{W} \quad (7)$$

となる。結局、式 (5)、(7) より、

$$Q_{unknown} = Q_1 + Q_{cool} = 2.16 + 0.84 = 3.00\text{W} \quad (8)$$

となる。即ち、真空引きを停止すると、何らかの原因により $\sim 3\text{W}$ の熱流入が生じていることが分かった。

4.4 気体の熱伝導としての Q_{unknown} の妥当性

真空引き停止後の約 3 W の熱流入、 Q_{unknown} の原因としては、dewar 内部の部品からのアウトガスが考えられる。しかし、今回の実験では内部圧力測定は真空ポンプ附属の真空計を用いているため、真空引き停止後の内部圧力は直接は分からない。

ここで、熱流入を内部の気体を通じた熱伝導と仮定し、内部圧力がどの程度上昇しているかを見積もってみる。

まず、自由分子条件 (空気分子の平均自由行程 $\lambda >$ 容器の大きさ L ; 気体分子同士の衝突が分子と壁面との衝突に比べて無視できる場合) を仮定する。このとき、熱流入量は、

$$Q = \Lambda p S (T_1 - T_2) \quad (9)$$

$$\Lambda = \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \sqrt{\frac{R}{2\pi M}} \frac{2}{\sqrt{T_1} + \sqrt{T_2}} \quad (10)$$

となる。ここで、 Λ は自由分子熱伝導率 ($\text{W}/(\text{Pa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K})$)、 p は内部圧力 (Pa)、 S は被冷却体の表面積 (m^2)、 T_1, T_2 はそれぞれ高温側、低温側の温度 (K)、 $\gamma (= c_p/c_v)$ は比熱比、 M はモル分子質量 (kg/mol)、 $R (= 8.31)$ は気体定数 ($\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$) である。気体を空気 ($\gamma = 1.403$ 、 $M = 29 \times 10^{-3} \text{kg}/\text{mol}$)、 $T_1 = 300 \text{K}$ 、 $T_2 = 150 \text{K}$ 、 S としてコールドプレート両面の面積、 $S = 2 \times 0.09 \times 0.07 \text{m}^2$ とすると、

$$Q \sim 2.6p \quad (11)$$

となる。これより、 $Q \sim 3 \text{W}$ となる内部圧力は、 $p \sim 1.2 \text{Pa} (8.8 \times 10^{-3} \text{Torr})$ となる。

ここで、この圧力が自由分子条件下にあるか評価する。気体の平均自由行程 λ は、

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p} \quad (12)$$

と書ける。ここで、 n (cm^{-3}) は気体分子数密度、 T (K) は気体温度、 d (m) は気体分子直径、 p (Pa) は圧力である。

空気の分子直径として、 N_2 の分子間距離 $1.098 \times 10^{-10} \text{m}$ 、N 原子のファンデルワールス半径 $1.5 \times 10^{-10} \text{m}$ を用いて、 $d = (1.098 + 1.5 \times 2) \times 10^{-10} \sim 4.1 \times 10^{-10} \text{m}$ とする。また、 $T \sim 300 \text{K}$ 、 $p \sim 1.2 \text{Pa}$ とする。

すると、 $\lambda \sim 4.6 \times 10^{-3} \text{m}$ となる。この値は、コールドプレート (低温部) と dewar 壁面 (高温部) の典型的な間隔 0.03m に比べるとやや大きいため、この圧力では自由分子条件が破れて、分子同士の衝突が効いていると考えられる。しかし、chip 上面と window 部の間隔など、部分的には $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{mm}$ 程度の間隔となっているところもあるため、粗い見積もりであることも考慮に入れば、およそ自由分子条件を仮定して求めた圧力程度に内部圧力が上昇し、熱流入を引き起こしていると考えて差し支えないであろう。

恐らく、dewar 内部の部品のどこかに気体発生源があり、真空引き停止直後に dewar 内部に気体が放出され、 $\sim 1 \text{Pa} (\sim 10^{-2} \text{Torr})$ 程度まで内部圧力が上昇し、内部気体通じて 3W 程度の熱流入が発生しているものと考えられる。

5 今後の対策

気体放出の原因としては以下のようなことが考えられる。

- dewar 内部部品からのアウトガス (CLKAMP、コールドプレート支柱、導線など)
- ネジ穴に封入された気体の放出

CLKAMP がアウトガス源になることが複数の観測装置で問題になっているらしいなど、内部部品のアウトガスは十分考え得る。一方で、後者について、現在はコールドプレート支柱内のネジ穴には空気を逃すような穴を開けていないので、こちらも原因となっている可能性が高い。

近日、dewar に直接取り付けられる真空計を使用できることになるので、気体放出の要因となりそうな部品を付け外ししつつ、常温で真空引きを行ない、停止後の内部圧力上昇をモニターすることで、ガス放出の原因部品を特定する。また、コールドプレート支柱については、ねじで密閉されてしまう内部の空洞に通気穴を設けて真空引きを試みる。

その後、例えば CLKAMP が原因の場合は dewar 外に設置することを検討し、その他の部品が原因の場合は、アウトガスを起こさない素材に交換するなど対応を検討する。

6 Figures

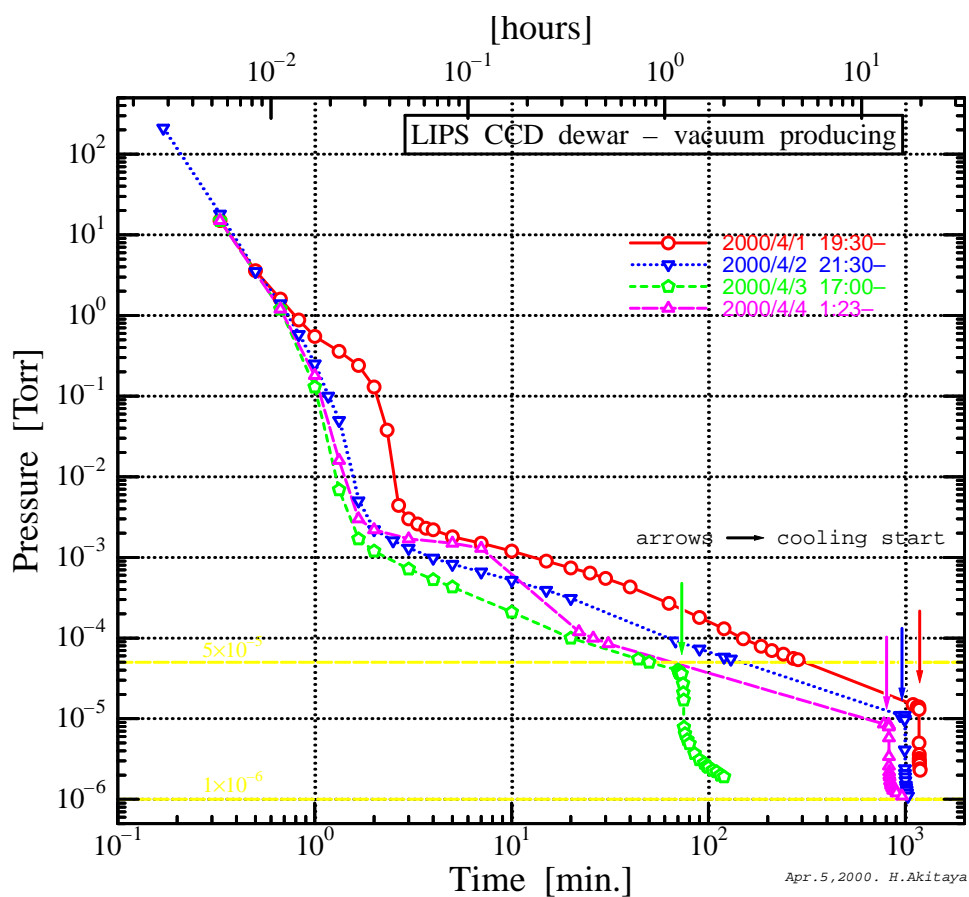


図 1: 4 回の真空引きにおける内部圧力の時間変化。冷却開始の時刻を矢印で示してある。

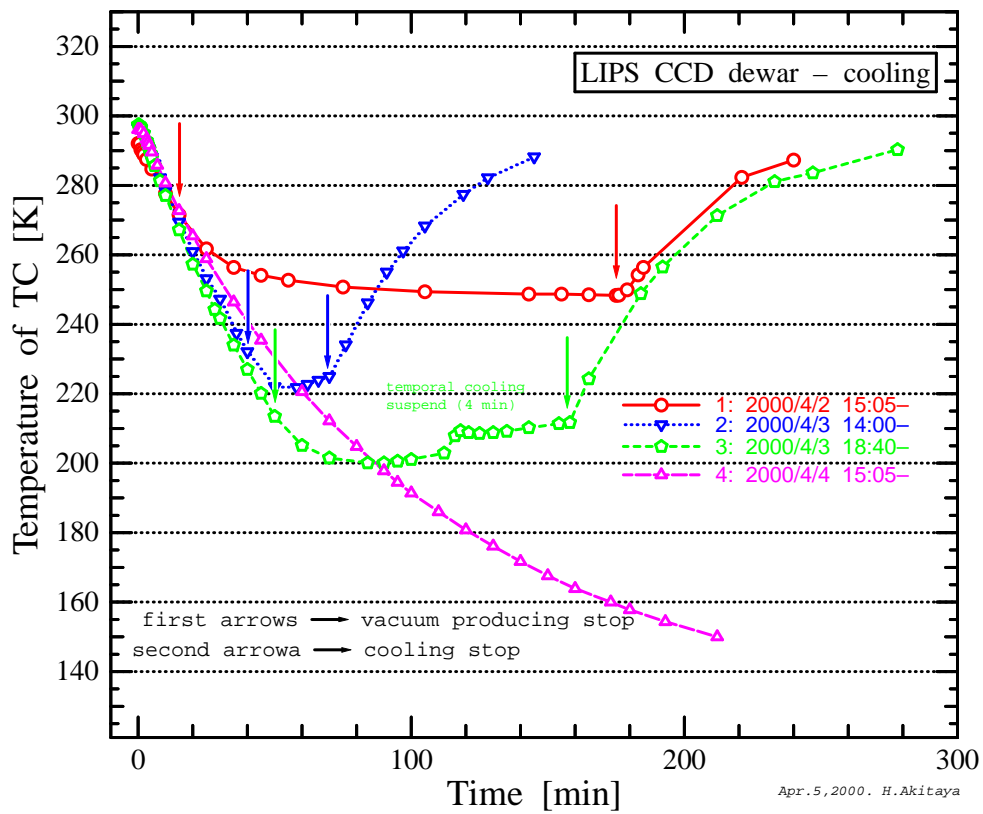


図 2: 冷却開始後の熱電対温度測定値の時間変化。1-3 回目の冷却については、真空引き停止の時刻と冷却停止の時刻を矢印で示した。3 回目の冷却の $t \sim 100$ 付近の温度の急上昇は、一時的に冷凍器を停止させたことによる。

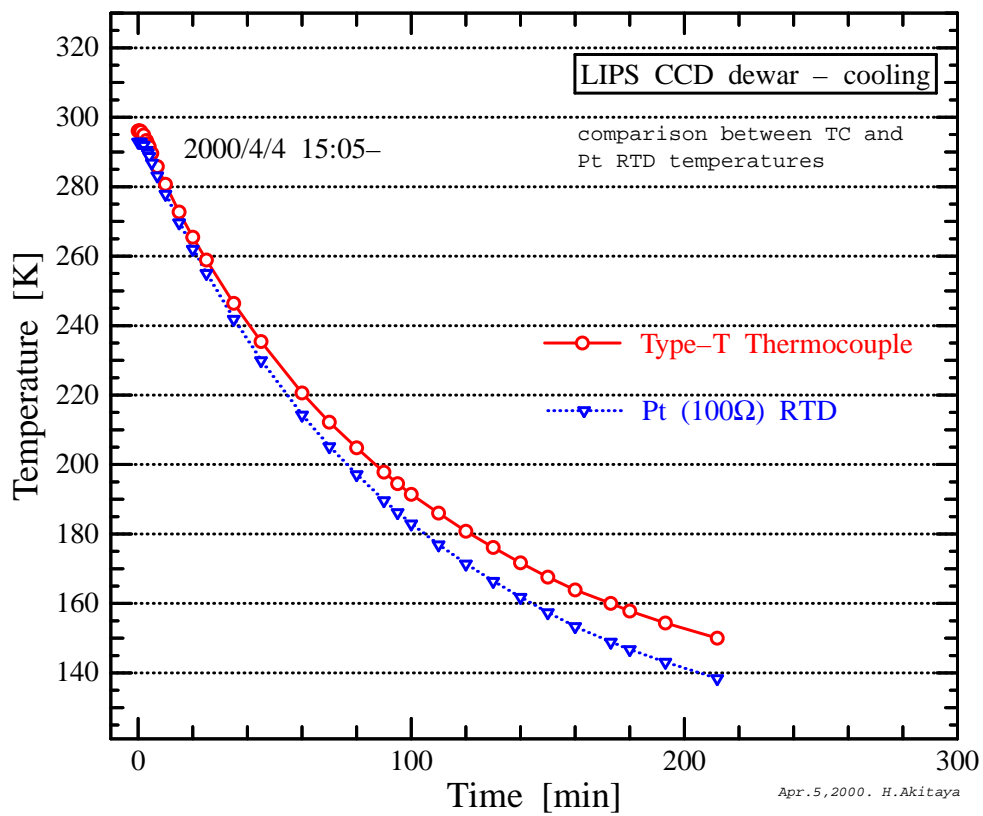


図 3: 4 回目の冷却における、熱電対温度と白金抵抗温度それぞれの測定値の時間変化

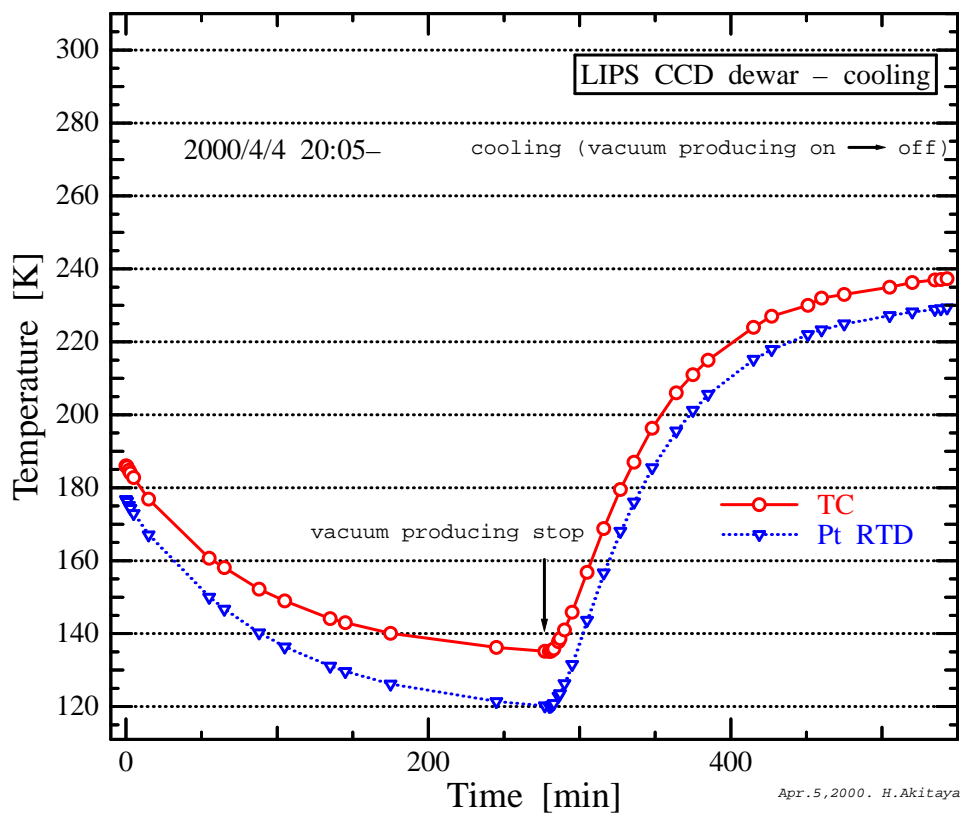


図 4: ~ 180 K 以下での冷却時の温度変化。はじめ真空引きを行ないながら冷却し、 $t \sim 280$ で真空引きを停止した。