

サマーチャレンジ2009 演習10

宇宙の温度を測る

第1章

イントロダクション

羽澄昌史 (KEK)

平成21年8月20日

この演習では、「宇宙マイクロ波背景放射」の温度測定を行う。宇宙マイクロ波背景放射は、英語で Cosmic Microwave Background と呼ばれる。略して CMB と表記されることが多く、本演習でも、以下、CMB と呼ぶ。

現代宇宙論では、さまざまな観測結果をもとに、いわゆるビッグバン宇宙論が広く支持されている。ビッグバン宇宙論では、宇宙初期は熱い火の玉状態（非常に温度が高い状態）であり、その小さい宇宙が膨張を続けて今日の我々が住む宇宙となったとされる。宇宙には、はじまりがあった、ということほど不思議なことはないように思われる。にもかかわらず、何故、現代科学ではこれが支持されているのだろうか？上で、「さまざまな観測結果をもとに」支持されているといったとおり、理由は多岐にわたり、ここですべてを網羅することはここではできない。しかし、幸いにして本演習で扱う CMB は、ビッグバン宇宙論を支える柱の一つである。以下で、CMB とは何か、それがなぜビッグバン宇宙論を支えるか、簡潔に説明する。

ビッグバン宇宙論では、時間が経過するとともに、宇宙のスケールの膨張により、熱い宇宙がだんだんと冷えていく。したがって、ある時刻ではある温度が対応し、その温度に見合った物理現象がおきる。ここで、CMB を論じるうえで肝心な水素原子について考えよう。水素原子の結合エネルギーについては量子力学で習っている（習いつつある？）かと思う。宇宙の歴史を過去にさかのぼってみていくと、ある時以前には、宇宙の温度が高すぎて、水素原子を保持できなくなるはずである。従って宇宙は、電子と陽子（と光子）のプラズマ状態であったことが予想されるだろう。そのようなプラズマ状態では、光子は、たくさんの荷電粒子（電子と陽子）を見るはめになり、高い頻度で散乱を繰り返す。光子はしょっちゅう邪魔をされるわけで、このような状態は、光学的に不透明だと言える。

さて、今度は宇宙の歴史をくだっていこう。すると、ある温度以下になると陽子が電子とくっついて水素原子ができて、もはや熱的に分解されることはなく、安定のままとどまる。水素原子は電氣的に中性だから、光子は反応しない。このプロセスが進めば、やがてプラズマは消え、光子が見ることのできる荷電粒子の数は、まったく取るに足らないものとなるであろう。このような状態は、光学的に透明だと言える。厚い雲で覆われていた空が、突然晴れ上がりようなものである。したがって、この現象を「宇宙の晴れ上がり」と呼ぶ。宇宙のはじまりを記述する物理法則を知らなくても、晴れ上がりがいつ起きたはずか、は普通の物理で計算できる。これは、温度にして約 3000 度（宇宙誕生から 38 万年後）

となるはずである。晴れ上がりの後は、光子は基本的に、「何物にも邪魔されずまっすぐ進む」(反応が起きる平均時間間隔が、宇宙の年齢より長い)。この光が、宇宙背景放射である。

さて、ビッグバン宇宙論に従えば、晴れ上がりから今日まで、宇宙のスケールは約 1000 倍になったことになる。これにともなって、光子のエネルギーは約 $1/1000$ になった。すなわち、温度にして約 3K になっている。約 3K の黒体放射は、(広い意味での)マイクロ波領域に分布する。したがって、宇宙マイクロ波背景放射、と呼ばれるのである。CMB の温度は、人工衛星による観測で最も精度よく測定されており

$$T_{CMB} = 2.728 \pm 0.004K$$

である。スペクトロスコピーといって、さまざまな周波数での CMB の強度を測定している。

本演習では、一周波数 (12GHz のマイクロ波) のみの強度を測ることにより、CMB 温度の測定をおこなう。地上でのこのような簡単な測定が、われわれの住む宇宙の壮大な秘密とつながっている！こんな不思議な気持ち (センス・オブ・ワンダー) を感じ取ってもらえれば演習担当一同、望外の喜びである。

補足 1

「宇宙の膨張」のイメージを正しくとらえることは簡単だが難しい。キーワードは「メトリック」である。メトリックとは何かを理解すれば、宇宙膨張についてのもろもろの誤解がすべて解け、目から鱗が落ちるであろう。一方、メトリックのことを知らずにいくら膨張の物理を理解しようとしても誤解をため込むだけであろう。こちら辺のところは、演習でのつきあいを通して説明していきたい。

補足 2

ビッグバン宇宙論や CMB のより定量的な説明は、(大学 3 年生にはかなり高度な内容ではあるが) サマーチャレンジ 2009 テキストの小玉英雄「宇宙創成の探査」を読んでもらいたい。

補足 3

CMB の観測は、「ビッグバンの前」を探る、という現代宇宙論の大テーマに直結している。興味のある方には参考文献を紹介するので申し出てほしい。

サマーチャレンジ 2009 演習 10

第 2 章

～ CMB 測定系の基礎 ～

KEK 吉田 光宏

CMB 測定の概要

CMB の絶対温度の測定を行うには、2 点の異なる温度の黒体輻射の校正源を用いて、電磁波の電力を温度に換算し、さらに地上の場合は大気中の水・酸素等の電磁波の吸収に伴う輻射熱（空の温度）を差し引きして、CMB の温度を求める必要があります。

従って

- 2 点の違う温度の黒体輻射の校正源
- 空の温度の角度依存性

の 2 つをいかに、その他の条件(雑音)を変えずに、精度良く測定するかが肝となります。

高周波回路

CMB はマイクロ波～ミリ波帯の電磁波なので、その波長域で精度良く温度の測定を行うためには、アンテナの性能と、低雑音の増幅器(LNA)がほとんどの測定精度を決めてしまいます。

- [増幅器の雑音] 増幅器の雑音は、通常は、シグナルノイズ比(S/N) の入出力での比を雑音指数 F と呼び、その対数である Noise Figure(NF) という量で記述されています。

$$NF = 10 \log_{10} F, \quad F = \frac{S_{in} / N_{in}}{S_{out} / N_{out}} = \frac{S_{in} / N_{in}}{GS_{in} / (N_{amp} + GN_{in})} = \frac{N_{amp} + GN_{in}}{GN_{in}}$$

(G は増幅率、 N_{amp} は増幅器の雑音)

雑音指数 F は、入力ノイズを規定すれば決まる事になりますが、大気や壁、ダミーロードなどからの熱雑音を基準に規定すると都合が良いため、 $T_0 = 290K = 16.8^\circ C$ の熱雑音を基準とし、 $N_{in} = kT_0B = -174 \times B[dBm]$ を用いて記述されています。

$$F = \frac{N_{amp} + kT_0BG}{kT_0BG}$$

なお N_{amp} も通常の増幅器では帯域 B に比例するため、雑音指数は帯域によりません。

従って、実効入力雑音温度(Noise Temperature)を $T_e = \frac{N_{amp}}{kGB}$ と定義すると、NF の関係は以下ようになります。

$$T_e = T_0 (F - 1) = T_0 \left(10^{\frac{NF}{10}} - 1 \right)$$

- [多段の増幅器の雑音]

2段の増幅器を考えると、全体の雑音指数 F_{system} は以下のように計算できます。

$$F_{system} = \frac{N_{amp2} + G_2 N_{amp1} + G_1 G_2 N_{in}}{G_1 G_2 N_{in}} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1}$$

これから2段目以降の雑音は無視でき、全体の雑音はほぼ初段の増幅器の性能だけで決まる事が分ります。

- [アンテナを含めた性能]

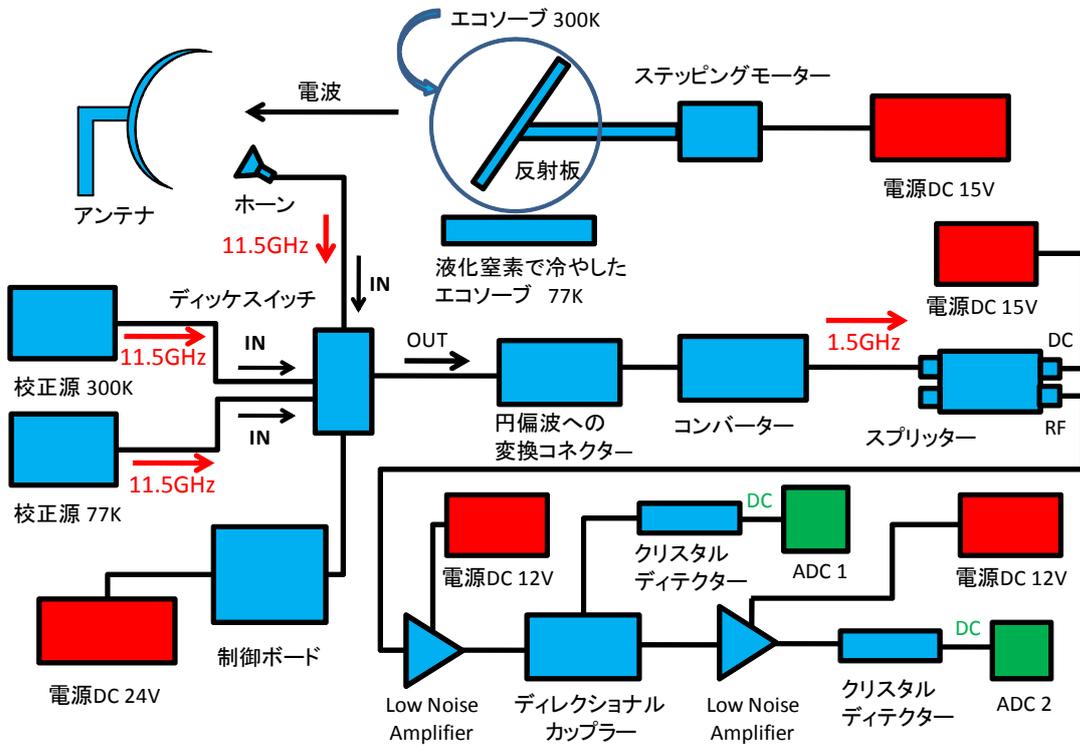
アンテナや増幅器を含めた受信系全体のシステムの性能は、以下の性能指数(G/T) で表されます。(単位は dB/K と書いてありますが、以下の計算の通りです)

$$\text{性能指数} = 10 \log_{10} (G/T) = 10 \log_{10} G (\text{アンテナの利得}) [dBi] - 10 \log_{10} (T_{system})$$

なおアンテナの利得とは全方向から信号が来た場合を1として、アンテナの最大放射方向の信号強度を表した物ですので、アンテナの面積を大きくすれば、放射角が狭まり、利得が上がります。

今回のサマーチャレンジの構成]

これらの条件を最も簡単に実現できる方法として、今回のサマーチャレンジでは、以下のような構成で実験を行うこととしました。



構成の要点は、

- [アンテナ及び増幅器] 通常の BS アンテナを用品。 (東芝 BCA-452K Amazon で ¥5562 で、皿+受信 (11GHz~12GHz) /出力 (1GHz~2GHz)+ケーブル (75 オーム) 付き。 <http://www.toshiba.co.jp/tcn/eng/eng/new/010.htm>)

仕様		外形寸法	
項目	形名	BCA-452K	
アンテナ部	アンテナ利得	BS	34.2dB (標準)
		CS	34.5dB (標準)
	受信偏波	右旋円偏波	
	受信周波数	11.7~12.75GHz	
	適合マスト径	25~50mm	
コンバータ部	迎角可変範囲	27~62° ※1	
	コンバータ利得	50~60dB	
	雑音指数	0.4dB (標準)	
	出力IF周波数	1032~2072MHz	
	出力インピーダンス(Q)	75F形コネクタ	
性能指数	位相雑音	1KHz	-65dBc/Hz以下
		5KHz	-90dBc/Hz以下
		10KHz	-100dBc/Hz以下
電源電圧	DC +15V		
消費電力	1.7W以下		
性能指数	BS	14.5dB/K (標準)	
	CS	15.0dB/K (標準)	
受風面積	0.19㎡		
質量(含コンバータ)	約1.1kg (アンテナ本体)		

この東芝のBSアンテナの受信器(コンバータ)は、仕様表の通り雑音指数がNF=0.4

dB ($T_e=28\text{ K}$)という最先端の HEMT 単体の室温での NF に限りなく近い非常に高い性能です。市販の低雑音アンプ(LNA)を謳っている物でも $NF = 1.0\text{ dB}$ 程度の物が多いので、BS アンテナの受信器を使用した方が感度は良い事になります。また HEMT を購入して LNA を組み立てるにしても、こういった最先端の HEMT を購入する場合 1000 個単位などになってしまうので、今回は BS アンテナを選択する事としました。なおこれ以上に雑音を下げるためには、LNA を冷却する必要がありますが、冷凍機は冷却に時間がかかる上に、室外で使用するのは困難です。

この BS アンテナの仕様を見ると、性能指数(G/T)が 14.5 dB/K で、アンテナの利得が 34.2 dBi となっていますので、システム雑音は 93 K となり、受信器単体の 28 K よりかなり大きい事が分ります。これはホーンやアンテナが家庭用サイズにするため十分な大きさに無く、地面などからの雑音により、このようにノイズが悪くなってしまうという意味だと考えられます。

BS アンテナの受信器(コンバーター)の内部は下の写真のようになっており、受信周波数帯は 12 GHz 帯ですが、このような高周波帯では同軸ケーブルの誘電損失が大きいため、受信器にはローカル発振器が内蔵されており、2 段の増幅を行った後、ミキサで $1\sim 2\text{ GHz}$ にダウンコンバートして同軸ケーブルで信号を伝送しています。またこの受信器に電源を供給するため、出力同軸ケーブルから DC も供給するようになっており、これらの DC と高周波を分離するのがスプリッターと呼ばれる部品です。



BS アンテナの受信器の中身

ただし BS アンテナを使用する場合、BS 衛星は隣国との電波干渉を防ぐため、隣国同士で円偏波の回転方向を変えているため、円偏波を受信するようになっています。CMB は直線偏波ですので、S/N を上げるためには直線偏波を受信するようなホーンと、ホーンで受けた電磁波を円偏波に変換して BS アンテナに付属の受信器に入力する必要があります。

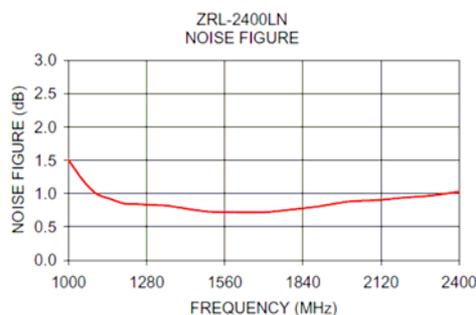
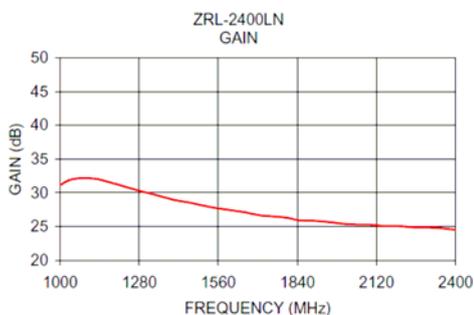
- [回転反射板] アンテナを直接回転させると、アンテナケーブルの曲げや、サイドローブによる環境温度の変化が混入してしまいます。これらの影響を避けるためにアンテナ

ナは常に同一の方向を観測している状態で、光軸に対して45度の回転する反射板を置き、空→液体窒素温度からの放射→室温の放射を順に観測します。回転反射板は2相200ステップのステッピングモーターで直接軸を回転していますので、1パルス辺り1.8度回転します。なお使用しているのは1 N・mのそれなりの大きさのモーターですが、強風で回ってしまうことがあります(減速ギアを入れておけば良かったかも・・・)。

- [ディッケスイッチ] 増幅器のゲイン変動など測定系の変動を常に校正するために、スイッチで観測対象と校正用放射源とを切り替えて読み出します。今回は雑音などが混入しないように、機械式の同軸スイッチ(Agilent 87104B)を使用しました。ただし機械式なので、切り替え速度は遅く(スイッチング時間は15ms)、ガクチャガチャ音がします。4ポートのそれぞれに、観測対象及び、室温・液体窒素温度・+可能な液体ヘリウム放射源を接続し、切り替えて読み出します。なお12GHz帯の信号では、ケーブルの損失が1dB/m程度と大きく雑音の増加の原因になりますので、ホーン～ディッケスイッチ～受信器までは、できるだけ短く配線する必要があります。
- [後段の増幅器と検波器] BSアンテナの受信器の出力では、空の温度などはBS衛星に比べて電力が小さく(BSの受信にとっての雑音のレベルなので)、十分な出力が得られません。従って受信器の1~2GHzの出力を数千倍~数万倍増幅(Mini-Circuit製ZRL-2400LN+)してから、検波器で直流電圧にし、さらにオペアンプで平滑化(積分時定数~1ms程度)しつつ10~100倍程度拡大すると、やっとADCで精度良く測定が可能なレンジになります。

※ 増幅率は高周波部分だけで80dB、つまり100,000,000倍にもなりますので、発振源などから過大入力を入れると増幅器が壊れますので注意(測定等の際はできるだけ入力を絞った状態からスタート)して下さい。

MODEL NO.	FREQUENCY (MHz)		GAIN (dB)				NOISE FIGURE (dB) Note 3		MAXIMUM POWER OUTPUT (dBm)			INTERCEPT POINT (dBm) Note 1	VSWR (-1) Typ.		ACTIVE DIRECTIVITY (dB) (Isolation-Gain)	DC VOLTAGE @ Pin V+ (V) Nom. Note 2	DC OPERATING CURRENT @ Pin V+ (mA)	
	f _c	f ₀	Typ.	Min.	Typ.	Max.	Typ.	Max.	Saturated at 3dB Compr. (1 dB Compr.)				In	Out			Typ.	Typ.
ZRL-2400LN(+)	1000	2400																
	1000	1400	31	28	±1.6	±2.0	1.2	2.0	23	21	25.3	+45	1.50	1.35	13	12	424	500
	1400	1900	27	24	±1.8	±2.2	1.0	1.4	24	23	26.0	+44	1.15	1.25	16	12	424	500
	1900	2400	25	23	±1.0	±2.0	1.2	1.4	24	23	26.0	+45	1.20	1.30	16	12	424	500



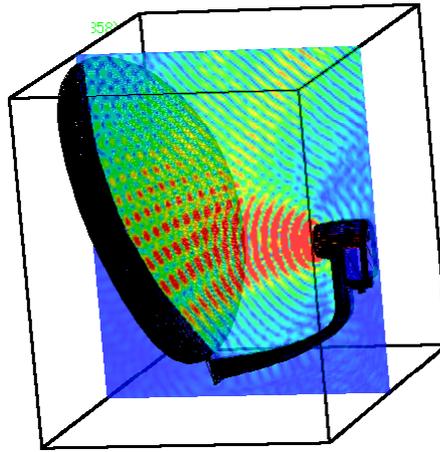
後段の増幅に使用している ZRL-2400LN+ の特性

シミュレーション結果

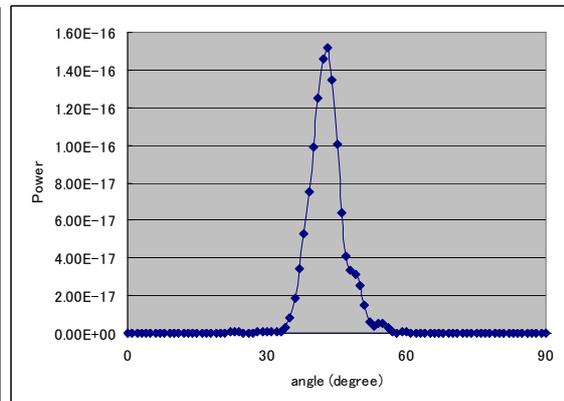
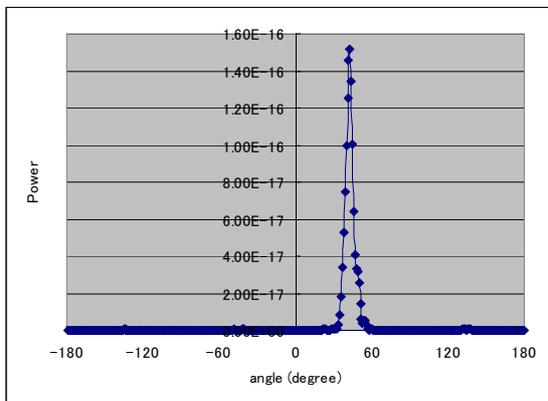
サマーチャレンジ用の CMB 測定装置の一部は、シミュレーションによる評価を元に製作を行いました。以下にシミュレーションの結果を添付しておきます。

パラボラアンテナのシミュレーション

パラボラアンテナの電磁波シミュレーションから分かるのはサイドローブの量及び、ビームの広がりです。



パラボラアンテナのシミュレーションモデル(写真じゃないよ! 3次元 CAD です。)

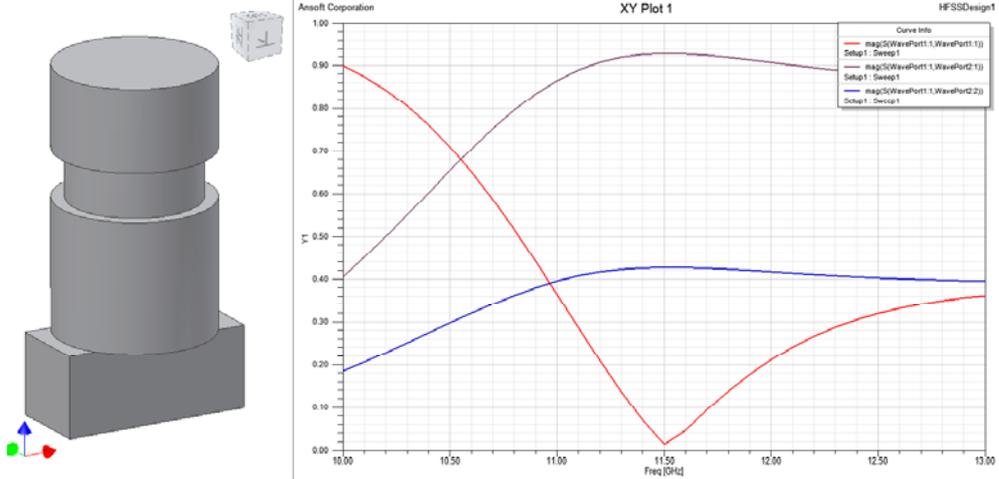


電力強度の角度分布

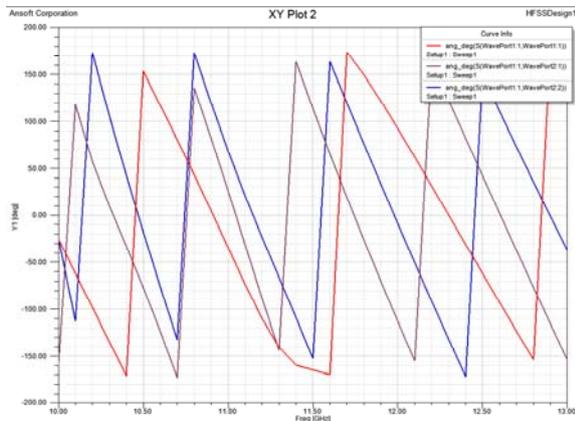
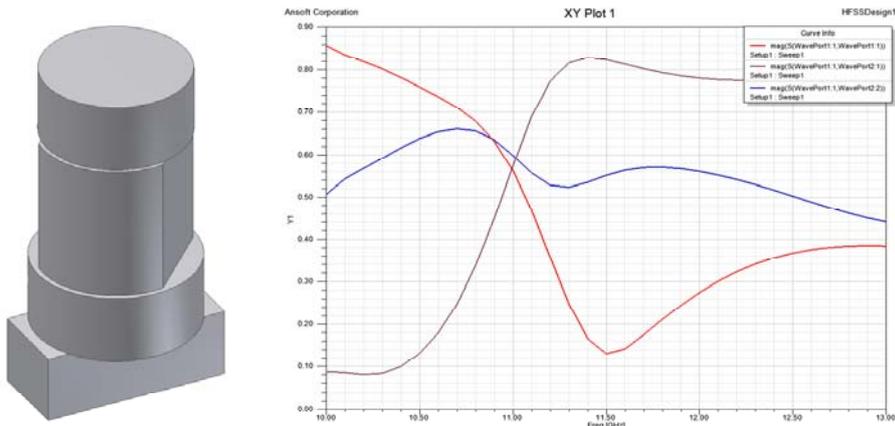
角度分布のグラフより、アンテナのビームは $43 \pm 4^\circ$ 程度である事が分る。

この結果を用いると、アンテナから 3m 離れた所に液体窒素のトレーがあるとすると 20cm 程度ビームが太る事が分る。従ってアンテナの大きさ $30\text{cm} + 20\text{cm} + 20\text{cm} = 70\text{cm}$ となり、液体窒素容器を直径 1m とした。

校正源・ホーン・偏波変換器等のシミュレーション



校正源・ホーン変換部



円偏波→直線偏波変換器(右上は振幅、下は位相)

サマーチャレンジ2009 演習10

第3章

～冷媒の取り扱いについて～

KEK 鈴木敏一

2009年8月16日 日曜日

1 液体窒素について

演習10では、液体窒素で冷却したマイクロ波吸収体を輻射源の一つとして用いる。液体窒素は1気圧下での沸点が77K(-196°C)と非常に冷たいので、取り扱いには十分な注意を要する。ここでは演習に必要な範囲で、液体窒素の扱いについて述べる。

1.1 安全上の注意点

液体窒素を扱う際にまず注意すべきは、

- 凍傷
- 窒息

の二点で、どちらも我が身に起こらないようにするべきである事は言うまでもない。以下、具体的に述べる。

液体窒素で冷却されている金属に素手で触れない事。液体窒素を溜めている容器、運搬容器の液取り出し用ホース、を扱う際には必ず断熱グローブ(青色)を着用する事。もし液体窒素の滴が身体にかかっても、ごく少量が短時間直接皮膚に触れる程度ならばまず問題ない。皮膚は77Kに比べて圧倒的に高温なので滴が皮膚にとどまる危険は小さい。むしろ液体がしみ込む目の粗い布で覆われている場合が危ないので、軍手の使用は禁止。また、足元にこぼした際に通常の靴下は足の保護にならない。

滴でも眼に入ることは特に注意して避ける。不用意に運搬容器の液取り出し用ホースや液体窒素を溜めている容器に顔を近づけないこと。

窒素は無色、無臭の気体で大気中に78%含まれる。窒素の1気圧付近での蒸気圧-温度の関係を図1に示す。窒素ガスの密度は 1.25 kg/m^3 (0°C, 101325 Pa)、液体窒素の密度は 808 kg/m^3 (77K, 101325 Pa)であるから液体窒素が蒸発して室温付近のガスを生じると体積は約650倍になる。窒素ガスはその名のように窒息性を持ち、麻酔性も備えているので、狭い室内で多量の液体を蒸発させるような使い方は危険が大きい。演習で多量の液体窒素を使うのは屋外の予定であるが、もし室

内で使用する場合は十分な換気を心がける事。

演習では空中でマイクロ波吸収体を液体窒素に浸して冷却するので、大きな面積で大気と液体窒素が接触しうる。大気の組成は窒素（沸点 77K）78%、酸素（沸点 90K）21%、アルゴン（沸点 87K）1%、残りはほぼ二酸化炭素と水蒸気で、水蒸気の含有率は変動が大きい。図 1 は純窒素の蒸気圧-温度の関係を示しているが、液体窒素が大気と接触している場合には空中の窒素以外の成分が凝縮するので、液の沸騰温度は同圧力下での純窒素の沸点よりは高くなると考えられる。また、酸素の凝縮にともなって、液体中の酸素濃度は時間とともに上昇する。そのため、長い時間空気に曝した液体窒素の近くには火気を近づけないこと。

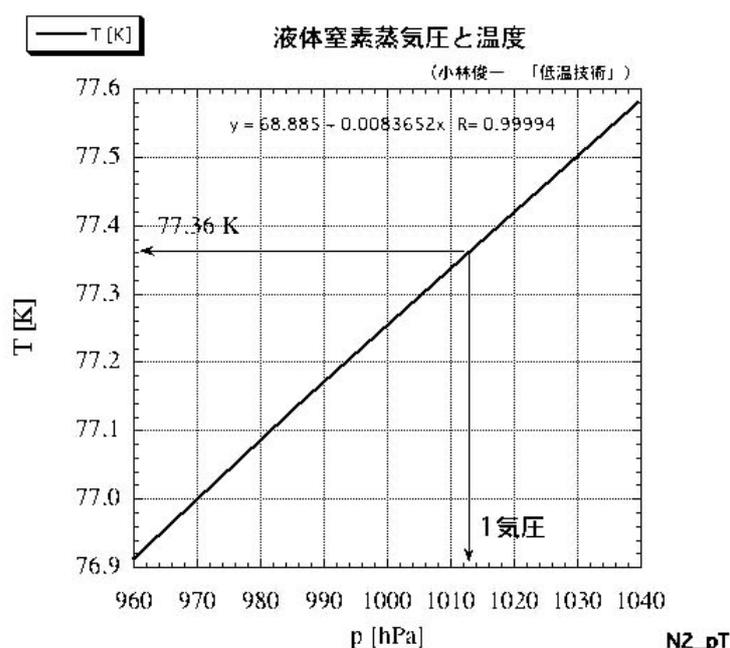


図 1: 液体窒素の温度-平衡蒸気圧。1 気圧 (=1013 hPa) 付近。

1.2 液体窒素運搬容器の扱い

演習で用いるような自己加圧型 液体窒素容器の操作法については、KEK 低温工学センターのページ

<http://cry3-aps.kek.jp/cryoweb/menu/menu4/LNdewar/LNdewar.html>

に簡単な記述があるので参考にしてほしい。

ここにも記述があるように、液を取り出すにはバルブ開閉状態を通常時と逆にすればよい。

金属製のフレキシブルホースは汲出バルブ¹の先に取り付ける。

バルブを全開にするときは、回し切ってロックした状態にしてはいけない。開状態である事がバルブの感触でわかるように全開位置から 1/4 回転くらいは戻しておく。

¹バルブ名称は容器の製造会社間で統一されていないようであるが、表 1 と名称表記は異なっても意味はとれるだろう。

表 1: 自己加圧型容器の操作：バルブの開閉状態

	通常時	液汲出時
汲出バルブ	閉	開
加圧バルブ	閉	開
放出バルブ	開	閉

全閉の時に締め過ぎてバルブの機能を損なわないように、締まった感触から判断する事。

液を取り出す際には圧力計を良く見ながら加圧をコントロールする。無闇と圧力を上げないこと。0.3 kg/cm² ~0.5 kg/cm² を目安にする。

容器を移動する際には車輪の転がりを見ながら行う。乱暴に扱って容器を倒したりする事のないように注意。

サマーチャレンジ2009 演習10

第4章

～演習内容～

岡山大 石野宏和

2009年8月17日

ここでは実際に宇宙背景放射の温度を測定しよう。

実験で取り扱う器具は高価なものが多いので、操作をするときは必ずスタッフ・TAの指示を仰ぐこと。液体窒素の扱いはかならずスタッフあるいはTAにやってもらうこと。液体窒素でむやみに遊ばないこと。

演習は次の日程で行う。

- 8月20日：オリエンテーション（4号館3階345室）、
演習1「電磁波で遊ぼう」（先端計測実験棟大実験室）
- 8月21日：演習2「測定系の基本的特性（リニアリティ、帯域幅測定）」
演習4「宇宙背景放射温度測定実験」（4号館屋上、晴れたら、夕方から）
得られたデータの解析（4号館3階345室）
- 8月22日：演習3「黒体放射の測定とシステム温度」（先端計測実験棟大実験室）
演習4「宇宙背景放射温度測定実験」（4号館屋上、晴れたら、夕方から）
得られたデータの解析（4号館3階345室）
- 8月23日：演習4「宇宙背景放射温度測定実験」（4号館屋上、晴れたら）
得られたデータの解析（4号館3階345室）
- 8月24日：休み
- 8月25日：演習4「宇宙背景放射温度測定実験」（4号館屋上、晴れたら）
得られたデータの解析（4号館3階345室）
- 8月26日：演習4「宇宙背景放射温度測定実験」（4号館屋上、晴れたら）
得られたデータの解析（4号館3階345室）
- 8月27日：得られたデータの解析（4号館3階345室）
発表会スライド作成・議論
- 8月28日：発表会

演習1「電磁波で遊ぼう」

CWジェネレータからの信号をホーンに投入し、ホーンから電磁波を放出する。周波数は11.5GHz、パワーは-50dBmに設定すること。BSアンテナを2mほど離れたところに置く。アンテナはオフセット集光になっていることに注意して、角度を合わせる。パラボラアンテナの中心が机の高さになるように調整する。机上のホーンの位置を左右にずらし、BSレシーバの出力が最大になる場所を選ぶ。CWジェネレータの周波数やパワーを変えてみてレシーバの出力がどう変化するか観察する。ホーンを左右にふって見て、電磁波ビームがどれほど広がっているのかを測定してみる。アルミホイルの細長い筒をつくり、ホーンにかぶせてみる。ビームが絞れるか確認する。

注意：x dBm のとき $10^{x/10}$ mWである。たとえば、-10 dBm のときは、0.1 mWとなる。

演習 2 「測定系の基本的特性（リニアリティ、帯域幅測定）」

2人ひと組となり、それぞれの組で測定を行う。

CWジェネレータの出力先にアッテネータとホーンをつなぐ。ホーンとBSレシーバを直接結合し、相対的な位置が動かないように固定する。ホーンとBSレシーバの接続部分をアルミホイルでかぶせる。

リニアリティ測定

CWジェネレータの周波数を 11.0, 11.5, 12.0 GHz(各組それぞれひとつの周波数についておこなう)に固定し、出力を -70dBm にする。アッテネータは 0dB 。CWジェネレータの出力を 1dBm ずつ減らしながらADCの値を記録していく。 -80dBm まできたら、出力を再度 -70dBm にもどし、アッテネータを -10dB にする。こうすると、BSレシーバに入力されるパワーは -80dBm に相当することになる。CWの出力を再度 1dBm ずつ減らしながら -80dBm でADCの値を記録する。その後アッテネータを -20dBm にし、 -70dBm から -80dBm まで変化させる。この操作を繰り返し、レシーバ入力が -100dBm になるまで続けること。記録したデータはコンピュータにテキスト形式で写し、横軸に入力パワー、縦軸にADCの値をプロットし、リニアリティを確認せよ。傾きと切片を求めよ。BSレシーバを室温と液体窒素のエコソープに向けて、それぞれのADCの値を記録し、その差から、1Kあたりどの程度のADCの値になるか推測せよ。

レシーバをアンテナにとりつけ、静止衛星の方向に向け、衛星からのパワーを温度に換算せよ。

帯域幅測定

CWジェネレータのパワーを -60 , -70 , -80dBm (各組それぞれ一つのパワーで行う)、アッテネータを 0dB にする。周波数を 9GHz から 14GHz まで 0.2GHz ずつ変えながらADCの値を記録する。横軸に周波数、縦軸にADCの値をプロットする。次に、アッテネータを -50dBm にして出力をほぼ0にし、その状態で再度周波数を変えながらADCの値を記録する。後者の測定はパワーのオフセットなので、前者から後者を差引いたものが実効的なパワーの入力になる。次の式で定義されている帯域幅 $\Delta\nu$ を求めよ。

$$\Delta\nu = \frac{\{\int G dv\}^2}{\int G^2 dv}$$

ここで $G = P_{\text{in}} - P_{\text{off}}$ であり、 P_{in} は -60 , -70 , -80dBm のときのADCの値、 P_{off} はアッテネータを -50dBm にしたときのADCの値である。これはBSレシーバが感受できる帯域幅である。

演習3 「黒体放射の測定とシステム温度」

測定されるパワー P_{tot} は、ホーンが受けた電磁波によるパワー P_0 以外に、測定系（アンプ、ケーブル、ホーン自身、その他）が出すパワー P_{sys} （システムノイズということにする）が足し合わさったものである。

$$P_{\text{tot}} = P_0 + P_{\text{sys}}$$

ホーンが受けた電磁波が温度 T [K] をもった完全な黒体放射であり、周波数帯域がレイリー・ジーンズ領域であれば、

$$P_0 = 2 \frac{k_B}{c^2} T \cdot S \cdot \int_{\nu_1}^{\nu_2} G \nu^2 d\nu$$

と表される。ここで、 $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$ [J / K] はボルツマン定数、 $c = 3 \cdot 10^8$ [m / s] は光速、 S [m²] はホーンが見込む実効的面積、 G は測定系のゲイン、 ν [Hz] は周波数で、積分は帯域幅の範囲で行う。

発砲スチロールの箱にエコソープをいれて、ホーンをエコソープに向けて位置を固定する。ホーンをエコソープから離しすぎると外からの放射が入り込むので注意する。まず室温で測定されるパワー P_{tot} (300K) を測定する。測定値からパワーへの変換は、演習2で行ったリニアリティの関係を使うこと。次に発砲スチロールの箱に液体窒素を入れた状態でパワー P_{tot} (77K) を測定する。室温と液体窒素をいれた状態での測定されたパワーの差から

$$P_{\text{tot}}(300\text{K}) - P_{\text{tot}}(77\text{K}) = 2 \frac{k_B}{c^2} (300 - 77) \cdot S \cdot \int_{\nu_1}^{\nu_2} G \nu^2 d\nu$$

が成立するか確認せよ（演習2で行った変換にはアンプのゲイン G も含まれていることに注意せよ）。

また、二つの測定パワーの比をとり、 $P_0 = \alpha T$ とすれば、

$$\frac{P_{\text{tot}}(300\text{K})}{P_{\text{tot}}(77\text{K})} = \frac{\alpha \cdot 300 + P_{\text{sys}}}{\alpha \cdot 77 + P_{\text{sys}}} = \frac{300 + T_{\text{sys}}}{77 + T_{\text{sys}}}$$

となる。ここで $P_{\text{sys}} = \alpha T_{\text{sys}}$ とし、システム温度 T_{sys} を定義する。この測定からシステム温度を求めよ。このようにして測定パワーの比から雑音測定を求める方法を、Y因子法といい、この比をY因子という。

演習 4 「宇宙背景放射温度測定実験」

実験で用いる電子回路とその仕組みはすでに第 2 章で説明されているので、ここでは実験手順のみを述べる。

実験に用いるものは、BS アンテナ、スイッチ、室温・液体窒素・液体ヘリウム較正源、アンプ、電源、アルミニウム反射板と回転装置、エコソープがはいったたらい、銀シートである。まず銀シートを所定の場所にしき、その上にたらい、BS アンテナ、反射板装置を配置する。ケーブルを接続し、動作確認すること。測定中、ケーブルが動かないように固定しておくこと。ケーブルの接続や曲がりが変わっただけで、システム温度が変わる可能性があるからである。実験装置のセットアップは、最初はTA やスタッフの指示に従うこと。まずは、たらいを室温に保ったまま測定を行う。一人がたらいの横で室温エコソープを縦に持つ。二つのエコソープが反射板から同じ距離になるように配置する。エコソープをもつ人は自分の体が完全に隠れるようにする。地面からの放射をふせぐために、4 人の人がたらいのまわりの銀シートを 20 度程度の角度をつけて測定中持っていること。残り一人は、反射板の後ろに完全に隠れて、コンピュータの操作をし、データ収集を行うこと。反射板が 360 度一回転する測定中は、なるべく動かないこと。測定後、すぐにデータをチェックすること。二つの室温のエコソープの温度が等しくなることを確認すること。その後、たらいに液体窒素をいれること。液体窒素の扱いは、第 3 章のテキストを良く目を通すこと。液体窒素がたらいにはいたら、再度実験を開始すること。

データをとった場合、どのような状況でデータをとったか仔細にログブックに記録し、どのデータがどの状況下で取ったものか、一対一対応がすぐにできるようにしておくこと。

取ったデータは各自解析すること。ここでは解析方法の簡単な説明のみを与える。

反射板が室温エコソープ、液体窒素エコソープ、空を向いているときにBS レシーバがうける電磁波の電力はそれぞれ

$$\begin{aligned}P_{300} &= \alpha(T_{300} + T_{\text{sys}}) \\P_{77} &= \alpha(T_{77} + T_{\text{sys}}) \\P_{\theta} &= \alpha\left(\frac{T_{\text{sky}}}{\cos\theta} + T_{\text{CMB}} + T_{\text{sys}}\right)\end{aligned}$$

で与えられる。ここで、 θ は天頂角で、 $\theta = 0$ のとき、上空垂直方向を向く。 T_{sky} は空の温度で、大気自体が放出している電波であり、この電力は大気の厚みに比例する。従って、天頂角が大きくなるほど見かけ上の大気の厚みが増し、 $1/\cos\theta$ に比例して温度が増えることになる。 T_{CMB} は宇宙背景放射の温度で、どの方角からも同じ強度で一様に来ているとする。まず、第一式と第二式から α と T_{sys} を求め、それを第三式に代入する。 P_{θ} と $1/\cos\theta$ のプロットをつくと直線になるので、その傾きと切片の大きさから T_{sky} と T_{CMB} を求める。誤差もきちんと評価すること（誤差の伝播を考えよ）。BS コンバータやアンプのゲインが時間的に変動することが知られているので、スイッチについての他の較正源を用いて、それを補

正すること。