

第 37 回国際物理オリンピック
シンガポール
実験コンテスト
2006年7月12日 水曜日

最初にこれを読んで下さい。

1. 実験コンテストの制限時間は5時間である。
2. 実験問題は、4つのPartからなり、合計点は20点である。
3. 筆記には、用意された文具のみを用いなさい。
4. Writing sheet に解答を書きなさい。それらは採点の対象となる。
 - Writing sheet はおもて面だけを用いなさい。Writing sheet は問題ごとに新しい用紙を用いなさい。
 - 各用紙には以下のことを書きなさい。
 - 1) 試みた実験のPart番号
 - 2) ページ番号: Part ごとの一連の番号
 - 3) そのPartごとの総ページ数
 - 4) 国コード、生徒コード
 - 簡潔に書きなさい。できるだけ方程式、数、記号、図、グラフを用い、文章は最小限にとどめなさい。
 - 採点の対象となることを望まないページには大きな×を書き、用紙の通し番号に含めないこと。
5. 各問題の Answer Sheet には対応する枠内に最終的な答えを記入しなさい。重要な図には適切な番号を付けなさい。単位を付けるのを忘れないようにしなさい。
6. 終了したとき、**Partごとに**、次の順序にしたがってすべての用紙を整えなさい。
 - Answer Sheet
 - 採点の対象を希望する Writing Sheet (ページ順)
 - 採点対象を希望するグラフ用紙
 - 採点して欲しくない Writing Sheet とグラフ用紙
 - 未使用の用紙、グラフ用紙、問題用紙は一番下にする
7. すべての用紙はクリップでとめ、机の上に置いておきなさい。
8. すべての用紙、実験に用いたすべての物品は試験場から持ち出してはいけない。



37th International Physics Olympiad

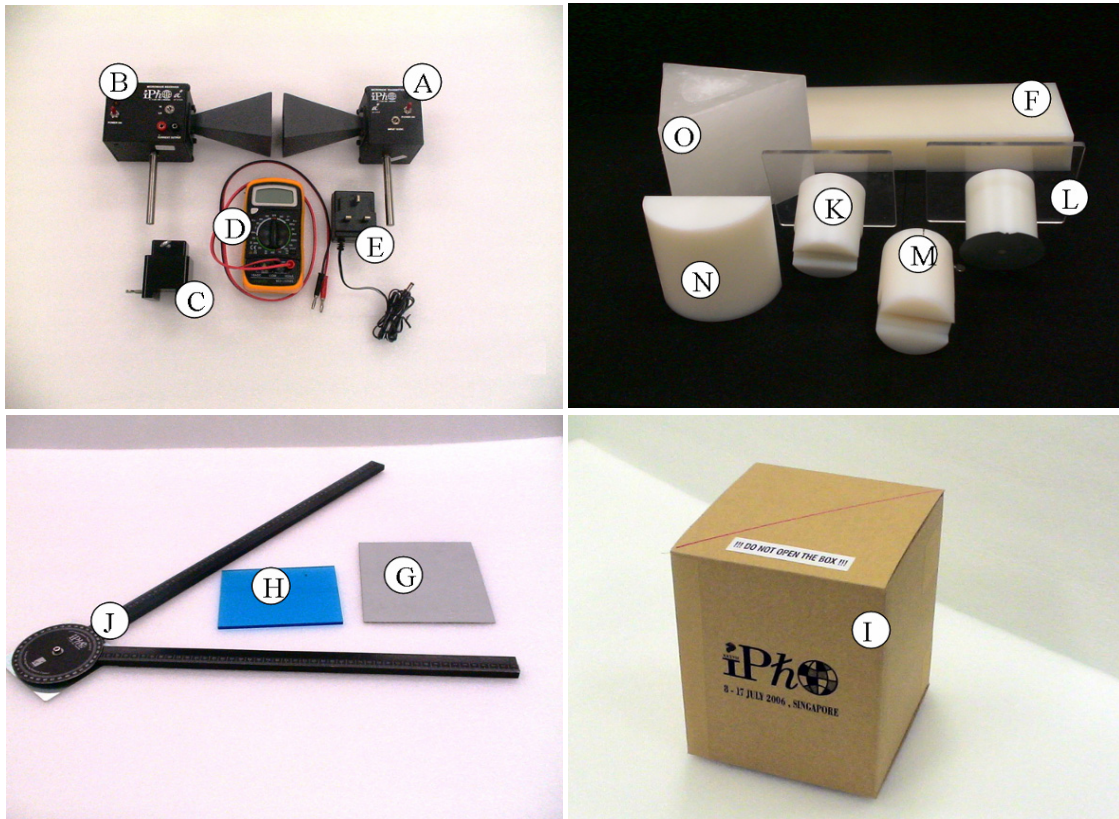
Singapore

8 - 17 July 2006

実験問題

2006年7月12日 (水)

実験器具一覧



器具記号	器具	個数	器具記号	器具	個数
Ⓐ	マイクロ波発信器	1	Ⓘ	ブラックボックス (金属棒格子が入っている)	1
Ⓑ	マイクロ波受信器	1	Ⓙ	角度調整器 (ゴニオメーター)	1
Ⓒ	発信器/受信器支持台	2	Ⓚ	プリズム支持台	1
Ⓓ	デジタルマルチメーター	1	Ⓛ	回転台	1
Ⓔ	発信器用電源	1	Ⓜ	レンズ/反射板支持台	1
Ⓕ	「薄膜」の役割をする樹脂板	1	Ⓝ	半円筒型レンズ (片側が平面)	1
Ⓖ	反射板 (金属板)	1	Ⓞ	ロウでできた三角柱プリズム	2
Ⓗ	ビーム分離器 (青色の透明アクリル樹脂板)	1		Blu-Tack (固定用の粘着材)	1 パック
	ノギス (別に配られる)			30 cm 定規 (別に配られる)	

はじめの注意:

- マイクロ波の発信器の出力は、標準的な安全レベルに保たれている。しかし、発信器のスイッチが入っているときは、近づいてマイクロ波発信器の開口部を決して直接のぞき込まないこと。
- 金属棒格子の入っているブラックボックス ①は決して開けないこと。
- ロウでできたプリズム ②はもろくて壊れやすいので注意すること (Part 3で使う)。

注意:

- 重要な注意なので忘れないこと：マイクロ波受信器の出力（電流値）は、マイクロ波のエネルギー強度ではなく、マイクロ波の振幅に比例する。
- マイクロ波受信器の感度切り替えスイッチは、常に「LO」に設定すること。
- データ取得中は、マルチメーターのレンジ（感度）を変えないこと。
- 影響を最小限にするために、使わない機器類は、実験装置からなるべく遠ざけること。また、自分の体を動かしても変わるので注意すること。
- 器具配置図を描くときには、器具を示すために、器具記号 (A, B, C, ...) を必ず用いること。



デジタルマルチメーターは、上の写真に示されているように、2本のリード線をつないで使用する。この実験では、この写真のように直流電流測定レンジの「2 m」（最大2 mA）の設定で使用する。

Part 1: マイケルソン干渉計

1.1. はじめに

マイケルソン干渉計は、次のような装置である。ビーム分離器が、入射した電磁波 (EM, Electromagnetic wave) を2つの経路に分けて送りだし、それぞれのビームは各々反射板で反射された後、一緒になって再び重なった電磁波が作られ、その結果、干渉パターンができる。図1.1 は、これから組み立てるマイケルソン干渉計の概略図である。入射波は、発信器から出て、2つの異なる経路に沿って、受信器へと進む。これら2つの波が、重なりあって干渉し、受信器で受信される。受信器の位置での信号の強さは、2つの波の位相差に依存する。位相差は、光路差を変えるとで変化する。

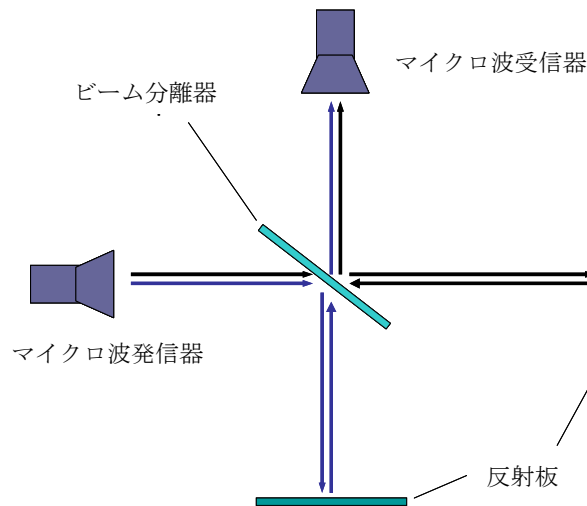


図 1.1: マイケルソン干渉計の概略図.

1.2. この実験に必要な実験器具一覧

- 1) マイクロ波発信器 (A) とその支持台 (C)
- 2) マイクロ波受信器 (B) とその支持台 (C)
- 3) 角度調整器 (J)
- 4) 2つの反射板: 反射板 (G) とその支持台 (M)、反射板として用いる樹脂板 (F) .
- 5) 支持台として機能する回転台 (L) にのせたビーム分離器 (H)
- 6) デジタルマルチメーター (D)

1.3. 課題：マイクロ波の波長の決定

(配点 2 点)

1.2 で示した実験器具だけを用いて、空気中におけるマイクロ波の波長 λ を決定するために、マイケルソン干渉計を組み立てなさい。光路差を変えながら測定した受信器の出力値を表に示しなさい。それをもとにして波長 λ を求めなさい。その際、定規の目盛の半分が読み取り誤差であることを考慮し、多数回測定して、求めた波長の最終的な誤差 $\Delta \lambda$ が 0.02 cm より小さくなるように示しなさい。

注意：樹脂版 ⑥ はマイクロ波を一部透過させるので、その後ろに立ったりすると測定結果に影響する。⑥ の後ろに立ったり、動いたりしないこと。

Part 2: 「薄膜」の干渉

2.1. はじめに

電磁波が、誘電体の「薄膜」に入射し、図 2.1 に示されるように、2つの波に分かれる。Aは「薄膜」の上面で反射され、Bは下面で反射される。AとBの重ね合わせが、いわゆる薄膜干渉に相当する。

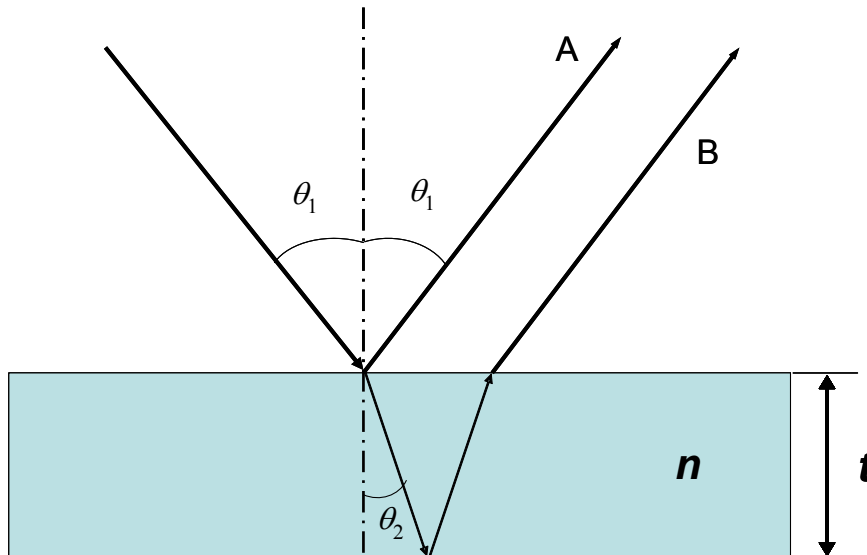


図 2.1: 薄膜の干渉現象の模式図.

AとBの光路差が干渉による強め合いや弱め合いの原因になる。そのとき得られる波の強度 I は、2つの波の光路差で決まる。それは結局、入射波の入射角 θ_1 、波長 λ 、薄膜の厚さ t 、および薄膜の屈折率 n で変わる。したがって、薄膜の屈

折率 n は、 t と λ の値を使い、受信器の出力 S 対 θ_1 の関係をプロットしたグラフから求めることができる。

2.2. この実験に必要な実験器具の一覧

- 1) マイクロ波発信器 (A) と支持台 (C)
- 2) マイクロ波受信器 (B) と支持台 (C)
- 3) 半円筒型レンズ (N) と支持台 (M)
- 4) 角度調整器 (J)
- 5) 回転台 (L)
- 6) デジタルマルチメーター (D)
- 7) 「薄膜」の役割をする樹脂板 (F)
- 8) ノギス

2.3. 課題: 樹脂板の屈折率の決定

(配点 6 点)

課題 1 : 強め合いと弱め合いの条件式を θ_1, t, λ, n を使って表しなさい。

(1 点)

課題 2 : 2.2 にリストされた実験器具だけを使って、受信器の出力 S の変化を、入射角 θ_1 が 40° から 75° の範囲の角度の関数として測定することのできる実験装置を組み立て、その略図を描きなさい。その際、入射角と反射角、および回転台の上の「薄膜」の位置などをはっきりと示しなさい。また、略図中では、2 ページで与えられた器具記号を使って各器具を明記しなさい。次に、得られたデータを表で示しなさい。さらに、それをもとに受信器出力 S を入射角 θ_1 に対してグラフに描きなさい。強め合いと弱め合いに対応する (受信器出力 S の最大値と最小値を与える) 角度をそれぞれ正確に決定しなさい。

(3 点)

課題 3 : 空気の屈折率を 1.00 と仮定し、干渉の次数、すなわち整数値 m を決定し、樹脂板の屈折率 n を求めなさい。 m と n の値を解答用紙に記入しなさい。

(1.5 点)

課題 4 : 得られた結果に対する誤差解析を進め、屈折率の誤差を見積もりなさい。誤差 Δn を解答用紙に記入しなさい。

(0.5 点)

注意:

- 半円筒型レンズの平面をマイクロ波発信器に向けて置くと、マイクロ波はほぼ平行ビーム、つまり平面波となる。そのレンズの平面とマイクロ波発信器の開口部の距離を **3 cm** にしなさい。

- マイクロ波発信器と受信器は樹脂板からなるべく離して設置するとよい結果が得られる。
- マイクロ波が平面波でないと、観測される受信器出力 S と入射角 θ_1 のグラフに不要なピークが現れてしまう。正しく測定されると、指定された θ_1 の範囲 $40^\circ \sim 75^\circ$ では、干渉によって、一つの極大と一つの極小が現れるだけである。

Part 3: 不満足な全反射

3.1. はじめに

全反射という現象は、光学的に密な物質から疎な物質へ平面波が入射したときに生じる。しかしながら実際には、幾何光学によって予想される全反射とは違って、入射波は光学的に疎な物質に侵入し、少しの間、境界に沿うように進んでから、散乱し、光学的に密な物質に戻る（図 3.1 を見なさい）。この効果は、反射波のずれ D で表される「グースーヘンヒェンのずれ」として知られている。

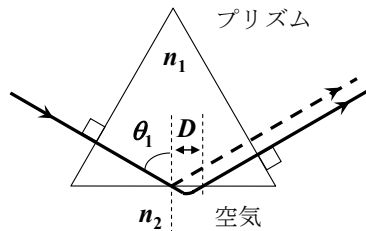


図 3.1: プリズムで起こる電磁波の全反射を表した概念図。ずれ D は、グースーヘンヒェンのずれによる反射波のプリズム表面での平行移動の距離を示している

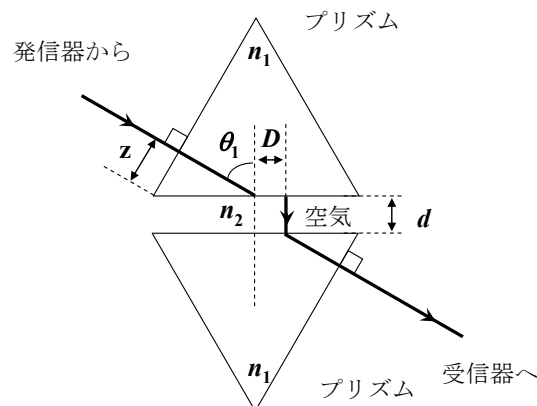


図 3.2: 2つのプリズムを距離 d 離れたときの実験の配置図。ずれ D は、グースーヘンヒェンのずれによる反射波のプリズム表面での平行移動の距離である。また、 z は発信器の中心軸とプリズムのふちまでの距離である。

図 3.2 に示すように、同じ屈折率をもつ（同じ物質でできている）2つのプリズムを、最初のプリズムからわずかな距離 d だけ離れた位置におくと、2番目のプリズムの中に電磁波が侵入する現象が起こる。この不思議な現象は、「不満足な全反射 (Frustrated Total Internal Reflection, FTIR)」と呼ばれる。伝播する波のエネルギー強度 I_t は、距離 d が増加するとともに、次の式で示されるように指数的に減少する。

$$I_t = I_0 \exp(-2\gamma d) \quad (3.1)$$

ここで、 I_0 は入射波のエネルギー強度を示し、 γ は次の式で与えられる。

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{n_1^2}{n_2^2} \sin^2 \theta_1 - 1} \quad (3.2)$$

λ は空気中での電磁波の波長である。 n_2 は、空気の屈折率であり、1.0 とする。

3.2. この実験に必要な実験器具一覧

- 1) マイクロ波発信器 ① とその支持台 ②
- 2) マイクロ波受信器 ③ とその支持台 ②
- 3) 片側が平面になっている半円筒型レンズ ④ とその支持台 ⑤
- 4) 2つのロウでできた三角柱のプリズム ⑥ とその支持台 ⑦、および支持台としても機能する回転台 ⑧
- 5) デジタルマルチメーター ⑨
- 6) 角度調整器 ⑩
- 7) 定規

3.3. 装置の設定

3.2 に表示された器具だけを使い、「不満足な全反射」におけるプリズム間の距離 d の関数として、エネルギー強度 I_t の変化を測定するための装置を組み立てる。よりよい実験結果を得るために、次のことに注意しなさい。

- この実験では、角度調整器の片方のアームだけを使い、また、必要なら発信器と受信器をアームからはずしてよい。
- プリズムの表面がお互いに平行になるように十分注意すること。
- プリズムとレンズの曲面の頂点との間の距離を 2 cm としなさい。
- マイクロ波受信器の開口部をプリズムに接触させて置くこと。
- それぞれの d の値ごとに、最大の信号を得るようにプリズムの面に沿って、マイクロ波受信器の位置を微調整しなさい。
- デジタルマルチメーターを 2 mA のレンジに設定し、 $d=0.6$ cm からデータを取り始めること。 d を大きくしていったとき、デジタルマルチメーターの読みが 0.20 mA 以下になったら、測定をやめ、再度同じ測定を繰り返しなさい。

3.4. 課題：プリズムの屈折率の決定

(配点 6 点)

課題 1

組みあがった実験装置の略図を描き、各実験器具には 2 ページで指示した器具記号を付けなさい。略図には、距離 z (図 3.2 を見なさい) の最適値を探してその値を明示しなさい。 z は、発信器の中心軸とプリズムのふちまでの距離である。

(1 点)

課題 2

この一連の測定を 2 度行って、測定したデータおよび誤差などを一覧表にしなさい。

(2.1 点)

課題 3

(a) 表のデータをグラフにプロットしなさい。その際、アーム目盛の読み取り誤差をグラフ中に示して描きなさい。これをもとにして屈折率 n_1 およびその誤差を求めなさい。

(b) プリズムの屈折率 n_1 とその誤差 Δn_1 を解答用紙に記入しなさい。

(2.9 点)

Part 4: 金属棒の格子構造によるマイクロ波の回折：ブラッグ反射

4.1. はじめに

ブラッグの法則

結晶の格子構造は、ブラッグの法則

$$2d \sin \theta = m\lambda \quad (4.1)$$

を使って、調べることができる。ここで、 d は、X線を「反射」する平行な格子面間の距離で、格子定数と呼ばれる。ここで、 m は回折次数で、 θ は入射X線と結晶面とのなす角である。ブラッグの法則は、一般的にはブラッグの反射式、あるいはX線回折式という名で知られている。

金属棒の格子構造

X線の波長は、結晶の格子定数と同程度の値であるので、通常のブラッグの回折実験は、X線を用いておこなわれている。しかし、マイクロ波の場合、より大きな格子定数をもつ結晶構造で回折が生じるので、簡単に定規で測定できる。

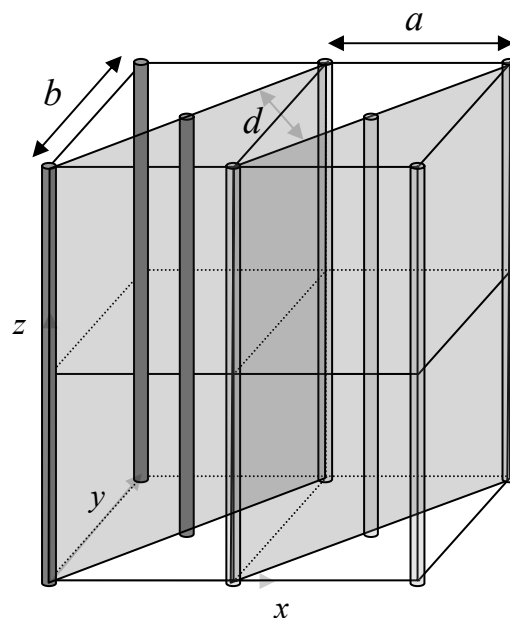


図 4.1 格子定数 a 、 b の金属棒格子，および格子面間隔 d

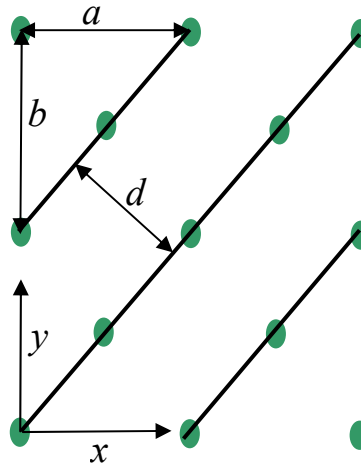


図 4.2 図 4.1 (同じスケールではない) を真上から見た金属棒の格子。
直線は、格子の対角線の面を示している。

この実験では、金属棒でつくられた格子は、ブラッグの法則を確認するために利用される。そのような金属棒格子の例を図 4.1 に示す。ここで、金属棒は、鉛直な太線で示している。xy 平面の対角線方向に沿った格子面を、影をつけた面で表している。また、図 4.2 は、金属棒の格子を上から見た図 (z 軸に沿って見下ろす) を表し、ここでは、点が棒を示し、線が対角線方向の格子面を表している。

4.2. この実験に必要な器具一覧

- 1) マイクロ波発信器 ㉠ と支持台 ㉢
- 2) マイクロ波受信器 ㉡ と支持台 ㉢
- 3) 円筒型レンズ ㉣ と支持台 ㉤
- 4) 金属棒格子の入ったブラックボックス ㉠
- 5) 回転台 ㉠
- 6) デジタルマルチメーター ㉠
- 7) 角度調整器 ㉠

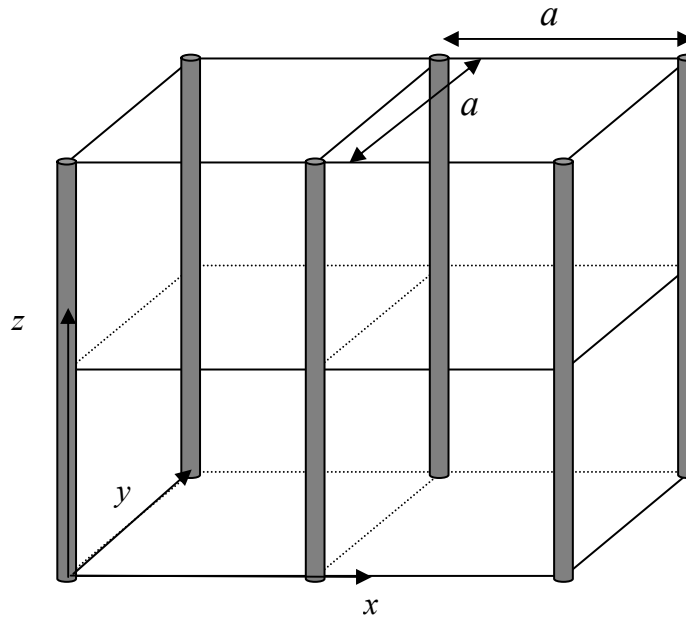


図 4.3: 金属棒による平方格子.

この実験では、図 4.3 に描かれているように、金属棒が**単純な**平方格子を作っているものが与えられている。この金属格子は、箱の中に密閉されている。この実験結果から格子の格子定数 a を導きだす。密閉されているブラックボックスは、そのまま測定できるので、絶対に、開けないこと。もし、実験終了後、箱が開けられていることがわかった場合、零点になるので、注意しなさい。

4.3. 課題： 単純平方格子の格子定数の決定

(配点 6 点)

課題 1

図 4.3 に示すような単純平方格子を真上から見るとどのような図形になるか。広い範囲で描きなさい。また、その図形に、与えられた格子の格子定数 a と対角線方向の格子面間隔 d とを描き込みなさい。この図形を使って、ブラッグの法則を導きなさい。(1 点)

課題 2

ブラッグの法則と与えられた装置を使って、格子定数 a を決定するためのブラッグの回折実験を設計しなさい。

- (a) 実験装置の組み立てをスケッチしなさい。2 ページの器具記号を使って、すべての器具を器具記号で示しなさい。そして、発信器と格子面とのなす角度 θ と発信器と受信器とのなす角度 ζ をはっきりわかるように示しなさい。この実験での回折面は、箱の上面の赤い線で示される対角線方向の面である。 (1.5 点)
- (b) 回折実験を $20^\circ \leq \theta \leq 50^\circ$ の θ に対して測定しなさい。解答用紙に、測定結果を表にして、 θ と ζ を記録しなさい。 (1.4 点)
- (c) θ の関数として、回折波のエネルギー強度をプロットしなさい。 (1.3 点)
- (d) グラフを使って、格子定数 a を決定して、実験誤差を見積もりなさい。 (0.8 点)

注意:

1. 最良の結果を得るために、受信器は実験の間動かさないこと（同じ場所に固定しておくこと）。発信器と格子の間、格子と受信機の間は、ともに 50cm 程度離すこと。
2. この実験では、格子の対角線方向の面だけを使いなさい。もし、他の面を使うと間違った結果になる。
3. 金属棒格子の入ったブラックボックス ① は、赤い対角線が描かれている面を上にして使用すること。
4. 正確な結果を得るには、それぞれの角度での回折強度のピークを得るように、そのピーク付近の角度で何点か測定しなさい。