ヘリウム蒸気圧温度目盛実現における圧力測定 の系統誤差の評価

奈良 広一, 田村 收

計 量 研 究 所
茨城県新治郡桜村梅園1-1-4
(1984年4月2日受理)

An Estimation of Systematic errors in the Pressure Measurement
to Realize the Helium Vapor Pressure Scale

Koichi NARA, Osamu TAMURA

National Research Laboratory of Metrology
1-4, 1-Umezono, Sakura-mura, Ibaraki

(Received April 2, 1985)

Synopsis :

The systematic error in the pressure measurement is estimated quantitatively for establishing the precise helium vapor pressure temperature scale in the temperature range from 0.5K to 5K. From this estimate, a design of the cryostat, in which the temperature scale can be realized with the uncertainty of 0.1mK, is described.

The thermomolecular effect and the hydrostatic pressure head are considered as the sources of the systematic error. The uncertainties in the correction are also estimated for both sources of error.

The Weber-Schmidt equation is used to estimate the thermomolecular effect for both ^4He and ^3He , which gives negative correction to the pressure value measured by the pressure gauge at room temperature. The thermomolecular effect for ^4He is shown to be negligible, if the temperature range is restricted above λ point. In the case of ^3He , in turn, the uncertainty in the correction for the thermomolecular effect at about 0.5K is shown to be critical unless properly designed cryostat is used. From the analysis of the temperature dependence of thermomolecular effect, an example of a set of tubings for the measurement of ^3He vapor pressure is shown to give uncertainty of only 0.05mK in the correction for the thermomolecular effect. In this example, the diameter of the tubing is changed by three steps according to the temperature range to minimize the heat input into the ^3He pot.

The hydrostatic pressure head gives, on the contrary, positive correction of about 0.3mK at most on the temperature scale. The correction is made by measuring the gas pressure in the capillary thermally attached to the sensing line used in the vapor pressure measurement. This technique is simpler than the conventional method which is based on the measurement of the temperature at several points along the sensing line and on the deduction of temperature between those points by interpolation. The uncertainty of the correction following the present technique is estimated to be less than 0.04mK for both ^4He and ^3He , assuming the probable errors in the several parameters. As the systematic error resulting from the non-ideality of gaseous helium can't be measured by this technique, this error should be added to the uncertainty of the correction. The total uncertainty is shown to be less than

0.09mK.

In conclusion, we give a design of a pressure sensing line which is expected to limit the uncertainty in realizing the helium vapor pressure scale to 0.05mK between 0.6K and 4.2K and to 0.1mK between 0.5K and 5.2K.

1. はじめに

現在, 4.2Kから0.5Kまでの温度範囲では液体ヘリウムの蒸気圧による温度目盛が広く使われている^{1),2)}。この温度範囲における蒸気圧と温度の関係式にはかつては58年ヘリウム-4蒸気圧温度目盛³⁾および62年ヘリウム-3蒸気圧温度目盛⁴⁾が用いられたが, 現在では最近再測定が行われた新蒸気圧目盛が推奨されている^{5),6)}。

このヘリウム蒸気圧温度目盛は原理的には0K近くから, 気相と液相の区別がなくなる臨界温度(ヘリウム-4で5.20Kヘリウム-3で3.3K)まで設定できるが, 高精度に設定するには蒸気圧測定に伴ういくつかの系統誤差の補正とその補正に伴う不確かさの評価が必要である。我々は0.5Kから5Kの範囲でヘリウム蒸気圧目盛を設定する際の圧力測定の系統誤差*に対し定量的な評価を行い, 0.1mKの精度を確保できる圧力測定管の基本設計を行ったので報告する。

温度目盛に用いるヘリウムは, λ 点以下でヘリウム-4の蒸気圧を測定することは超流動フィルム・フローのため基本的に困難であるので, λ 点以下の目盛はヘリウム-4ではなく, この温度範囲で超流動にならないヘリウム-3を用いることとした。 λ 点の温度は上述の58年目盛では, $2.1722 \pm 0.0001\text{K}$, 新しい温度目盛では $2.1768 \pm 0.0002\text{K}$ と測定されている⁶⁾。

2. 配管の熱アンカー

ヘリウム-4の蒸気圧の測定配管は, コールド・スポットを防ぐために, ヘリウム-4の臨界温度約5.20K**よりも高い温度から断熱空間の中を通されサンプル・セルにつながれている。ヘリウム-3の場合はその臨界温度が約3.3K**であるので, ヘリウム槽の温度で熱アンカーをとることができる。ただしヘリウム槽内のヘリウムの液面の変化の影響や圧力測定管にそっての急激な温度勾配を防ぐため, ヘリウム槽の内部では断熱

空間中を通すことにした。ヘリウム-4の場合では圧力測定管がセルに入る前の最終的な熱アンカーを窒素温度(77K)とすると熱流入が大きすぎるので, 77Kと5.2Kとの中間温度でも熱アンカーすることとし, 熱的負荷を軽減した⁷⁾。

3. 熱分子効果の評価

3-1 熱分子効果

ヘリウムに限らず, 温度勾配がある細管に低圧の気体を封入したとき熱分子効果によりその両端間には圧力差が生じる。よって極低温部の蒸気圧を測定するための圧力計が室温に設置されている限り, この効果を防ぐことはできない。この効果は気体の平均自由行程が長くなるほどその効果は大きくなり, 管径と同程度となると急激に大きくなる。この効果を減らす唯一の対策は管径を太くすることであるが, 全配管を太くすることはクライオスタットの冷却能力に不必要な負荷を加えるので, より詳しい検討が必要となった。

熱分子効果の評価には Weber-Schmidt の実験に基づいた計算式が広く用いられてきた⁸⁾。最近の蒸気圧目盛においてもその式が採用されており, またヘリウム-4とヘリウム-3で同じ式に従うことが報告されているので我々もこの式に基づいて解析を進めた^{9),9)}。その式は以下のように表現される。

$$\ln \frac{P_c}{P_w} = \frac{1}{2} \ln \frac{T_c}{T_w} + 0.18131 \ln \frac{y_c + 0.1878}{y_w + 0.1878} + 0.41284 \ln \frac{y_c + 1.8311}{y_w + 1.8311} - 0.15823 \ln \frac{y_c + 4.9930}{y_w + 4.9930} \quad (3.1)$$

ただし,

$$y = \left(\frac{273.15}{T} \right)^{1.147} \frac{Rp}{1.789}$$

ここで, p は圧力(Pa), T は温度(K), R は管の内径(mm)であり添字 c, w はそれぞれ, 冷端, 温端

* ここでは圧力測定のみに議論を限るが, その他に無視できない補正量として, たとえばヘリウム-3中にヘリウム-4が不純物として含まれる時の影響が知られている。ヘリウム-3中にヘリウム-4が0.02%含まれていると, その影響は最大0.13mKといわれている⁴⁾。

** ヘリウム-4の臨界温度は58年目盛では5.1994Kであり, 新しい目盛では5.1953Kが採用されている。一方, ヘリウム-3の臨界温度は58年目盛に基づき62年に測定された値は $3.324 \pm 0.0018\text{K}$ であり, 新しい目盛はこの温度の近傍では5.8mK大きな温度値を与える^{4),6)}。

を表わす。

しかしながら、この計算式(3.1)の係数は管の内壁の状態によって25%近く変化することが知られている²⁾。したがって、熱分子効果による圧力補正量は必要な圧力測定精度の4倍以下に抑えなければならず、その程度まで補正量を小さく抑えることを設計の目標とした。この設計には特に定量的な考察が必要となるので、以下に述べる。

3-2 ヘリウム-4の場合

ヘリウム-4の場合では超流動フィルム・フローのため、その蒸気圧が λ 点以下で測定されることは少ないとして λ 転移点以上の温度の場合のみ考えた。 λ 点におけるヘリウム-4の蒸気圧は5,042Paである。いくつかの管径の圧力測定管で蒸気圧を測定した際の熱分子効果による圧力補正量を計算し、蒸気圧温度目盛上での温度補正量に換算した結果をFig. 1にあげた。管径2mmというような細い管でも λ 点における熱分子効果は約8 μ Kと小さく、まったく問題とならない。

Fig. 1 The correction for the pressure increment caused by the thermomolecular effect in the measurement of ^4He vapor pressure, $\Delta T = T_{\text{calc}} - T$, where T : the temperature of the ^4He sample cell, T_{calc} : the temperature value calculated from the pressure measured with the pressure gauge at 300K. Curves 1, 2, 3, 4, 5 and 6 correspond to the pressure sensing tubes with the inner diameter of 1mm, 1.5mm, 2mm, 2.5mm, 3mm and 3.5mm, respectively.

Fig. 2 The correction for the pressure increment caused by the thermomolecular effect in the measurement of ^3He vapor pressure, $\Delta T = T_{\text{calc}} - T$, where T : the temperature of the ^3He sample cell, T_{calc} : the temperature value calculated from the pressure measured with the pressure gauge at 300K. Curves 1, 2, 3, 4, 5 and 6 correspond to the pressure sensing tubes with the inner diameter of 5mm, 10mm, 15mm, 20mm, 25mm and 30mm, respectively.

3-3 ヘリウム-3の場合

ヘリウム-3の蒸気圧測定の熱分子効果による補正量を温度に換算したものがFig. 2であり、ヘリウム-3の蒸気圧目盛により0.5 Kまでの温度目盛を作る場合には熱分子効果を減らすための対策が非常に重要であることがわかる。たとえ管径20mmという太い圧力測定管を用いても0.5 Kでは補正量は0.6mK程度となり、その補正值の不確かさのために最終的に0.1mKの精度を得ることはできない。また断熱空間内に管径20mmの配管を入れることは、熱流入が大きくなりすぎて感心できない。

我々は、圧力測定管に沿った圧力勾配が温度の高い所に集中していることに注目し、より合理的な設計方針を導いた。0.5 Kの部分と77 Kの部分の間の圧力差の温度換算値と、77 Kと室温の間のそれとを比べてみると、Fig. 3のように同じ管径では0.5 Kと室温の間の

圧力差の90%以上が77Kと室温の間で生じている。したがって、セルから室温まで均一な径の圧力測定管で測定するよりは、室温と77Kの間をより太く77Kとセルの間をより細くすることが、熱流入の見地からいっても望ましいと考え、設計目標を下の二つにまとめた。

目標1 77K以下の部分は管径を、その部分の補正量が77K以上の部分の1/4程度とするように細くする。それによりその部分での補正量が77K以上の部分の補正量の不確かさと同程度となり、それ以上太くして補正量をへらしても、全体の補正量の不確かさを減少させる効果はほとんどない。

目標2 77K以上の部分の管径は、測定する最低温度と目標とする測定精度から決定する。

これらの目標を定量化するために温度範囲を三つに分けて、それぞれで計算した補正量をFig. 4に示す。

Fig. 3 The correction for the thermomolecular effect in the measurement of ^3He vapor pressure in the case that the diameter of the pressure sensing tube changes at 77K. The ^3He sample cell is at 0.5K or at 0.6K. ΔT : the temperature correction to be subtracted from the temperature value calculated from the pressure measured with the pressure gauge at 300K. Curves L: the correction corresponding to the pressure increment along the sensing tube with the inner diameter of D_L between the cell and 77K; H: 77K-300K, D_H ; S: the total correction of L and H.

Fig. 4 The correction for the thermomolecular effect in the measurement of ^3He vapor pressure in the case that the diameter of the pressure sensing tube changes at 77K and 4.2K. The ^3He sample cell is at 0.5K or at 0.6K. ΔT 's: the temperature correction to be subtracted from the temperature value calculated from the pressure measured with the pressure gauge at 300K. Curves L: the correction ΔT_L corresponding to the pressure increment along the sensing tube with the inner diameter of D_L between the cell and 4.2K; M: ΔT_M , 4.2K-77K, D_M ; H: ΔT_H , 77K-300K, D_H ; S: the total correction ΔT_S of L, M and H.

この図でSは0.5Kと室温の間の総補正量、Lは0.5Kから4.2Kまで、Mは4.2Kから77Kまで、Hは77Kから室温までの部分の補正量をそれぞれ表わす。S及びHに対して、Mの縦軸は4倍、横軸は2倍、Lの縦軸は40倍、横軸は10倍にそれぞれ拡大して描かれている。Fig. 4に見るように、MとHがほぼ一致した位置にあり、Lが十分下の位置にあることから、次の結論が導かれた。

4.2Kと77Kの間の中温部の管径は77Kと室温の間の高温部の管径の1/2倍とすることができる。管径が変化する接合部の温度が変動すると補正量に影響を与えるので、その温度は一定に保たなければならない。また、セルと4.2Kの間の低温部の管径は4.2Kと77Kの間の管径の1/5程度に細くしても補正量の不確かさにほとんど影響はない。本設計では最低温度を

0.5 K に選び, 0.05mK の不確かさまで許すとしたため, 補正量の合計を 0.2mK に押えることにした。高温部で管径 40mm, 中間部で管径 20mm とする必要がある, 低温部は管径 5 mm 程度で十分である。もし, 最低温度を 0.6 K とするならば, 高温部を管径 15mm としてもその補正量は 0.15mK となり, 不確かさも 0.04mK 以下となる。

以上すべてをまとめて, 配管の方法, 熱アンカー及び管径を Fig. 5 と Table 1 にあげた。これらの配管は第 2 章でも述べたように断熱空間中を通す。

4. ヘリウム静水圧補正の評価

ヘリウム・サンプルセルと圧力計の間には, 空間的高度差があり, それらを接ぐ圧力測定管中には各温度に対応する密度のガスが存在するため, 両者の間に圧力差が生じる。この圧力差は重力による静水圧がその原因であるので蒸気圧が高い場合に大きくなり, 第 3 章の熱分子効果の場合とは逆に圧力計の指示値がセルにおける圧力値よりも小さくなる。

セルの位置を高度の原点にとり, 高度 x (m) での圧力, 密度をそれぞれ $p(x)$ (Pa), $\rho(x)$ (kg/m³) とすると以下の式が成り立つ。

$$p(x) - p(0) = -g \int_0^x \rho(X) dX \quad (4.1)$$

g (m/s²) は重力加速度

後でも評価するようにこの補正量は最大でも温度に換算して 0.3mK 程度であるので, 補正量の不確かさを 0.05mK 以下に押さえるという本設計の場合なら, 測定管中の圧力勾配を右边で無視して圧力を p_v とおける。理想気体であるとの近似を行えば, ヘリウムの原子量を M として式 (4.1) は以下のように近似できる。

$$\frac{p(x) - p(0)}{p_v} = -g \frac{M}{R} \int_0^x \frac{dX}{T} \quad (4.2)$$

ただしここでの理想気体であるとの近似は, 臨界点近傍の 5 K では無視できない誤差を招くので, 理想気体からの外れによる寄与の評価も行う必要がある。以下では理想気体として補正量を計算し, 理想気体からの外れによる誤差は補正の不確かさに加える。

熱伝導率が温度に対して単調増加であるならば*, 式 (4.2) の右边の積分は以下のように評価できる (証

* ステンレス鋼, キュプロニッケル, He ガス等の熱伝導率は温度上昇と共に単調に増加する。

Fig. 5 A suitable design of sensing tubes for measuring the vapor pressure of ⁴He and ³He.

Table 1 Designed sensing line Sensing line for ⁴He vapor pressure

Bottom end	Top end	Inner diameter	Length
Sample cell	10K	5 mm	200mm
10K	77K	5 mm	800mm
77K	Room temp.	5 mm	400mm

Sensing line for ³He vapor pressure

Bottom end	Top end	Inner diameter	Length
Sample cell	4.2K	5mm	200mm
4.2K	77K	20mm	800mm
77K	Room temp.	40mm	400mm

明は Appendix)。

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{dX}{T} \leq \frac{X_2 - X_1}{T_2 - T_1} \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \quad (4.3)$$

上式を用いて静水圧による補正量の絶対値の上限を評価すると, Table 1 の測定配管の場合には Fig. 6 のようになり, 最大約 0.3mK となった。

従来, 式 (4.1) を用いて静水圧による補正量を計算

するには、圧力測定管上の数箇所の温度を測定しそれら測定箇所間の温度分布を適当に補間して、式(4.1)右辺の積分を算出する方法がしばしば採用されている⁶⁾。しかしここでは、下端を封じた別の細管を圧力測定管に沿って熱的に接触させてその細管中の気体の圧力を室温部で測定することにより式(4.2)右辺の積分を算出する方法を用いることにし、不確かさの評価もその方法に基づいて計算することにした。この方法により従来の温度分布の補間に伴う不確かさを減少できる¹⁰⁾。

圧力測定管に沿って密着させた低温部分(室温以下の部分)の細管の断面積、長さ、容積をそれぞれ S_C 、 L_C 、 V_C とし、その細管につながった室温部分の容積、室温をそれぞれ V_R 、 T_R とする。 V_C と V_R を合わせた系全体の温度が T_R の時にその中に気体を p_0 の圧力で封入する。それから圧力測定管を冷却すると封入された気体の圧力 p は次の式ようになる。

$$\frac{p}{p_0} = \frac{\frac{V_R}{T_R} + \frac{S_C \times L_C}{T_R}}{\frac{V_R}{T_R} + S_C \int_{x_2}^{x_1} \frac{dX}{T}} \quad (4.4)$$

Fig. 6 Crude estimation of the temperature correction for the hydrostatic pressure head in the measurement of the vapor pressure of ^4He and ^3He . T : the temperature of helium sample cell. ΔT : the crude estimation of the temperature correction to be added to the temperature value calculated from the pressure measured with the pressure gauge at 300K.

Table 2 Capillary system for the correction of hydrostatic pressure head

	Value	Assumed uncertainty (%)
p measurement	...	1
Cross-sectional area S_C	25mm ²	10(5)*
Length in low temp. L_C	140cm	3
Volume in room temp. V_R	16.3cm ³	10(5)*
Room temperature T_R	300K	5

* In Fig. 9 the uncertainty in the parentheses is assumed to estimate the sum of uncertainties.

Fig. 7 The relation between the temperature of the helium sample cell and the pressure ratio P/P_0 of helium gas in the capillary system attached to ^4He or ^3He vapor pressure sensing tube. The capillary has the dimensions summarized in the Table 2. P_0 : the He gas pressure in the capillary system at 300K as a whole. P : the He gas pressure in the capillary system with the helium sample cell at the temperature T . See the text.

p/p_0 を測定すればその測定値から右辺の分母中の積分が求まり、式(4.2)から静水圧の補正量を算出できる。 p の温度依存性は使用する細管その他によって大きく異なるが、Table 2に示した例を採用したとするとFig. 7のように温度変化することがわかる。ただし線形近似(Appendix 参照)をここでも採用した。 p/p_0 から静水圧の補正を行う際に細管の寸法その他

に Table 2 のような不確かさがあるとすると、補正量に現われる不確かさはそれぞれ Fig. 8 のようになる。これらの不確かさを加えると最大で 0.04mK と評価された。

以上の補正はすべて理想気体を仮定したものであるが、ヘリウム液面から 10K までの圧力測定管中の静水圧補正は理想気体からの外れを考慮せねばならない。しかし上記の細管系を用いる方法では実験的に理想気体からの外れを評価することはできない。したがって理想気体からの外れはすべて補正量の不確かさとなりその大きさは以下の式により計算される。

$$\Delta p_{\text{nonideal}} - \Delta p_{\text{ideal}} = -g \frac{M p_v}{R} \int_0^x \frac{dX}{T} + Mg \int_0^x \rho_n(T, p_v) dX \quad (4.5)$$

ここで右辺の第二項の ρ_n はモル数密度を表し、ヘリウム-4 では実験的に高精度で求められている¹¹⁾。

温度分布の線形近似 (Appendix 参照) のみを仮定

Fig. 8 Uncertainties of hydrostatic pressure head correction, resulting from the uncertainties of different parameters in the capillary method. ΔT : the uncertainty of the correction converted to the temperature on the vapor pressure scale. Curves a: the correction uncertainty resulting from the uncertainty of 5% in T_R ; b: 10% in V_R or S_C ; c: 3% in L_C ; d: 1% in P/P_0 . The notation is the same as in Table 2. See the text.

し、 ρ_n に実験式を用いて直接積分して得た (4.5) 式左辺の差は 4.2 K 以上で急速に大きくなるが、温度に直すと 5 K で 0.04mK、4.2 K で 0.02mK 程度となった。

5. 結論

熱分子効果と静水圧差に対する補正量とその不確かさをそれぞれ第 3 章と第 4 章で示したが、ここで二つをまとめて設計された配管における系統誤差を述べる。補正量の不確かさは熱分子効果では補正量自体の 25% と仮定し、静水圧補正では細管系の寸法等に Table 2 にあげた不確かさを仮定して特にヘリウム-4 では理想気体からの外れを加算したものとししないものの 2 種の計算を行った。それぞれ Fig. 9 に示すような結果が得られた。二つの効果による補正量は互いに符合が逆であり、不確かさはヘリウム-3 の場合では使用される温度範囲内で最小値を持つ。またヘリウム-4 の場合では λ 点以下では精度高い測定が困難であることから、 λ 点以上が実質上問題となる。これらの解析の結果、本設計によれば、0.6 K から 4.2 K では 0.05mK よりも小さい不確かさを保証でき、0.5 K から 5 K までその温度範囲を広げても 0.1mK 以内にその不確かさを抑えることができることが明らかとなった。

謝辞

この報告をまとめるように助言下さった森村正直第 2 部長と有益な議論を頂いた櫻井弘久主任研究官に御礼申し上げます。

Appendix

熱伝導率 $\kappa(T)$ が温度に対して単調増加するならば下式が成立することの証明

$$\int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{T} \leq \frac{X_2 - X_1}{T_2 - T_1} \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)$$

平均熱伝導率 $F(T)$ を以下のように定義する。

$$\frac{\int_{T_1}^T \kappa(T) dT}{T - T_1} = F(T)$$

すると $\kappa(T)$ が単調増加であることから以下のように $F(T)$ も単調増加であることが示される。

$$F'(T) = \frac{(T - T_1) \kappa(T) - \int_{T_1}^T \kappa(T) dT}{(T - T_1)^2} \geq \frac{(T - T_1) \kappa(T) - (T - T_1) \kappa(T)}{(T - T_1)^2} = 0$$

配管が温度 T_1 である点 X_1 と温度 T_2 である点 X_2

Fig. 9 Correction and its uncertainty resulting from the thermomolecular effect and the hydrostatic pressure head in the pressure measurement for realizing the vapor pressure scale of ^4He and ^3He . T : the temperature of ^4He and ^3He in the sample cell. Curves a: the correction; b and c: the uncertainty. Curve b does not include the uncertainty resulting from the nonideality of helium gas. Curve c includes it.

に熱アンカーされている場合、その两点間の温度 T の分布は $\kappa(T)$ によって計算され、上式をも用いると以下の等式及び不等式が得られる。

$$\frac{X-X_1}{X_2-X_1} = \frac{\int_{T_1}^T \kappa(T) dT}{\int_{T_1}^{T_2} \kappa(T) dT} \leq \frac{T-T_1}{T_2-T_1}$$

よって次の不等式が得られる。

$$\begin{aligned} \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{T} &\leq \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{(T_2-T_1) \frac{(X-X_1)}{(X_2-X_1)} + T_1} \\ &= \frac{X_2-X_1}{T_2-T_1} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) \quad (\text{証明終り}) \end{aligned}$$

式 (4.3) の左辺と右辺が等しいと仮定することを線形近似と呼ぶことにする。 X_1 と X_2 の間で温度 T が X の一次関数になっていれば、式 (4.3) の左辺は右辺に一致するからである。

参 考 文 献

- 1) 奈良広一, 櫻井弘久, 田村 収: 固体物理 18 (1983) 568
- 2) BIPM: *Supplementary Information for the IPTS-68 and the EPT-76*
- 3) F. G. Brickwedde, H. van Dijt, M. Durieux, J. R. Clement and J. K. Logan: J Res NBS 64A (1960) 1
- 4) S. G. Sydoriak and R. H. Sherman: J Res NBS 68A (1964) 547
- 5) M. Durieux and R. L. Rusby: Metrologia 19 (1983) 67
- 6) R. L. Rusby and C. A. Swenson: Metrologia 16 (1980) 73
- 7) 奈良広一, 田村 収: 計量研究所報告 No. 3. Vol. 34 (1985) に掲載予定
- 8) S. Weber and G. Schmidt: Leiden Comm. No. 246C (1936)
- 9) T. R. Roberts and S. G. Sydoriak: Phys. Rev. 102 (1956) 304
- 10) H. Sakurai: Temperature 5 (1982) 39
- 11) D. B. Mann: NBS-Monograph 111 (1968) eds. R. H. Kropshot, B. W. Birmingham and D. B. Mann.