

# ASPECTE PRIVIND STADIUL MĂSURĂRILOR DE TEMPERATURĂ SUB 30 K

## ASPECTS REGARDING THE STATUS OF MEASUREMENTS BELOW 30 K

Cristian Dorin Nichita \*\*

\* RENAR

**Rezumat:** Scara Internațională de Temperatură din 1990 (SIT-90) definește punctele fixe de la 0,65 K până la circa 1358 K ( $-272,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  la  $1085\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) fiind subîmpărțită în mai multe domenii de temperatură. Scara SIT-90 a fost extinsă în domeniul temperaturilor joase în anul 2000, când CIPM a adoptat o scară suplimentară, Scara de Temperatură Joasă Aproximativă de la 0.9 mK la 1 K (PLTS-2000). Având în vedere diversele aplicații tehnice, în articol sunt abordate aspecte ale măsurărilor temperaturilor joase și materialelor criogenice.

**Cuvinte cheie:** Scara Internațională de Temperatură, materiale criogenice, kelvin

**Abstract:** The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) defines the fixed points ranging from 0.65 K to approximately 1358 K, being subdivided in several temperature ranges. The SIT-90, was extended downward in temperature in 2000, when the CIPM adopted a supplemental scale, the Provisional Low Temperature Scale from 0.9 mK to 1 K (PLTS-2000). Taking into consideration the technical applications, in the paper aspects of low temperature measurements and cryogenic materials are presented.

**Key words:** International Temperature Scale, cryogenic materials, kelvin

### 1. INTRODUCERE

Unitatea fundamentală de temperatură termodinamică este kelvinul, definit ca fracția  $1/273,16$  din temperatura termodinamică a punctului triplu al apei. În anul 2005, Comitetul Internațional pentru Măsură și Greutăți (CIPM) a clarificat definiția punctului triplu al apei specificând compoziția izotopică a apei ca fiind cea a Etalonului de la Viena de apă medie oceanică (V-SMOW). Pentru celelalte temperaturi, măsurări directe de temperatură termodinamică necesită un termometru primar bazat pe un sistem fizic bine înțeles a cărui temperatură poate deriva din măsurări de alte mărimi fizice, ceea ce este dificil și laborios în practică. Ca alternativă, Scara Internațională de Temperatură furnizează o modalitate acceptată internațional pentru realizarea practică a temperaturii.

Scara Internațională de Temperatură din 1990 (SIT-90) definește punctele fixe de la 0,65 K până la circa 1358 K ( $-272,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  la  $1085\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) fiind subîmpărțită în mai multe domenii de temperatură, care se suprapun în oarecare măsură. Scara SIT-90 a fost extinsă în domeniul temperaturilor joase în anul 2000, când CIPM a adoptat o scară suplimentară,

### 1. INTRODUCTION

The main unit of the thermodynamic temperature is the kelvin, defined as the fraction  $1/273.16$  of the thermodynamic temperature of the triple point of water. The International Committee for Weights and Measures (CIPM) clarified in 2005 the definition of the triple point of water by specifying the isotopic composition of the water to be that of Vienna Standard Mean Ocean Water (V-SMOW). For the other temperatures, direct measurements of thermodynamic temperature require a primary thermometer based on a well-understood physical system whose temperature may be derived from measurements of other quantities, difficult and time consuming in practice. As an alternative, the International Temperature Scale provides an internationally accepted recipe for realizing temperature in a practical way.

The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) defines the fixed points ranging from 0.65 K to approximately 1358 K, being subdivided in several temperature ranges, overlapping somehow. The SIT-90, was extended downward in temperature in 2000, when the CIPM adopted a supplemental

Scara de Temperatură Joasă Aproximativă de la 0.9 mK la 1 K (PLTS-2000).

Având în vedere diversele aplicații tehnice, în articol sunt abordate aspecte ale măsurărilor temperaturilor joase și materialelor criogenice.

## 2. SCARA INTERNAȚIONALĂ DE TEMPERATURĂ, SIT-90

Scara Internațională de temperatură din 1990 [1] a fost adoptată de Comitetul Internațional pentru măsuri și Greutăți la întâlnirea sa din 1989, în acord cu cerința inclusă în Rezoluția 7 a celei de-a 18-a Conferință Generală pentru Măsuri și Greutăți din 1987, înlocuind Scara de Temperatură Practică Internațională din 1968 (ediție amendată în 1975) și Scara de Temperatură Aproximativă de la 0,5 K la 30 K. SIT-90 a fost a cincea scară adoptată după ITS-27, ITS-48, IPTS-68 și a extensiei sale din 1976 pentru intervalul (0,5 ... 30) K.

Scara de Temperatură Internațională din 1927, SIT-27, a fost adoptată de cea de-a 7-a Conferință Generală pentru Măsuri și Greutăți pentru a depăși dificultățile practice de realizare directă a temperaturii termodinamice prin termometrie de gaz și pentru a înlocui la nivel mondial diferite scări naționale de temperatură. ITS-27 a fost formulată astfel încât să permită ca măsurările de temperatură să fie efectuate precis și repetabil și să aproximeze cât mai bine temperatura termodinamică în condițiile disponibile la acel moment. Intervalul dintre punctul de fierbere al oxigenului și punctul de îngheț al aurului era bazat pe un număr de temperaturi reproductibile sau puncte fixe față de care valorile numerice erau atribuite și pe două instrumente de interpolare etalon. Fiecare din aceste instrumente de interpolare erau etalonate la câteva puncte fixe, aceasta conducând la constante pentru formula de interpolare în domeniul corespunzător. O termorezistență de platină a fost folosită pentru limita de jos a domeniului și un termocuplu platină / platină rodium pentru temperaturi mai mari de 660 °C.

Scara de Temperatură Internațională din 1948, ITS-48, a fost adoptată de cea de-a 9-a Conferință Generală pentru Măsuri și Greutăți. Printre altele, modificările față de ITS-27 au fost: limita inferioară a domeniului termorezistenței de platină a fost modificată de la -190 °C la punctul de fierbere al oxigenului definit de - 182,97 °C, joncțiunea domeniului termorezistenței de platină și a domeniului termocuplului a devenit punctul de îngheț al antimoniului (circa 630 °C) în loc de 660 °C, punctul de îngheț al argintului a fost definit ca fiind 960,5 °C, punctul de îngheț al aurului a fost înlocuit cu punctul de topire al aurului (1063 °C); legea radiației Planck a înlocuit legea Wien.

Scara de Temperatură Practică Internațională din

scale, the Provisional Low Temperature Scale from 0.9 mK to 1 K (PLTS-2000).

Taking into consideration the technical applications, in the paper aspects of low temperature measurements and cryogenic materials are presented.

## 2. THE INTERNATIONAL TEMPERATURE SCALE, ITS-90

The International Temperature Scale of 1990 [1] was adopted by the International Committee of Weights and Measures at its meeting in 1989, in accordance with the requested embodies in Resolution 7 of the 18th General Conference of Weights and Measures of 1987, replacing the scale of 1968 (amended edition of 1975) and the 1976 Provisional 0.5 K to 30 K Temperature Scale. ITS-90 represented the fifth scale adopted after ITS-27, ITS-48, IPTS-68 and its extension, from 1976 for the range of (0,5 ... 30) K.

The International Temperature Scale of 1927, ITS-27, was adopted by the seventh Conférence Générale des Poids et Mesures to overcome the practical difficulties of the direct realization of thermodynamic temperatures by gas thermometry, and to universally replace the different existing national temperature scales. The ITS-27 was formulated so as to allow measurements of temperature to be made precisely and reproducibly, with as close an approximation to thermodynamic temperatures as could be determined at that time. Between the oxygen boiling point and the gold freezing point it was based upon a number of reproducible temperatures or fixed points to which numerical values were assigned and two standard interpolating instruments. Each of these interpolating instruments was calibrated at several of the fixed points, this giving the constants for the interpolating formula in the appropriate temperature range. A platinum resistance thermometer was used for the lower part and a platinum rhodium / platinum thermocouple for temperature above 660 °C.

The International Temperature Scale of 1948 was adopted by the ninth Conférence Générale des Poids et Mesures, Among others, changes from ITS-27 were: the lower limit of the platinum resistance thermometer range was changed from -190 °C to the defined oxygen boiling point of - 182.97 °C, the junction of the platinum resistance thermometer range and the thermocouple range become the measured antimony freezing point (about 630 °C) in place of 660 °C; the silver freezing point was defined as being 960,5 °C; the gold freezing point replaced in the gold melting point (1063 °C); the Planck radiation law replaced the Wien law

The International Temperature Scale of 1948,

1948, ediția amendată din 1960, ITS-48, a fost adoptată de cea de-a 11-a Conferință Generală pentru Măsuri și Greutăți, după ce cea de-a 10-a Conferință Generală adoptase punctul triplu al apei ca singurul punct care definește kelvinul, unitatea de temperatură termodinamică. Suplimentar față de introducerea termenului „Practică” modificările la ITS-48 au fost: punctul triplu al apei ca singurul punct definit ca 0.01 °C, a înlocuit punctul de topire al gheții ca punctul de etalonare din acest domeniu; punctul de îngheț al zincului, definit ca 419,505 °C, a devenit un punct alternativ preferat punctului de fierbere al sulfului (444,6 °C) ca un punct de etalonare; domeniile permise pentru constantele formulelor de interpolare pentru termocuple și termorezistențe etalon au fost mai departe modificate; restricția pentru radiația „vizibilă” pentru pirometria optică a fost eliminată.

În 1968 Comitetul Internațional pentru Măsuri și Greutăți a promulgat Scara de Temperatură Practică Internațională 1968, SIPT-68, fiind împuternicită pentru aceasta de cea de-a 13-a Conferință Generală din 1967-1968. IPTS-68 a incorporat schimbările semnificative de la IPTS-48. Acestea includeau schimbări numerice, proiectate să o aducă în acord mai bun cu temperaturile termodinamice, care erau suficient de mari să fie sesizate de mulți utilizatori. Alte modificări au fost: limita inferioară a scării a fost extinsă până la 13,81 K; la temperaturi chiar mai joase (0,5 K ... 5,2 K) era recomandată utilizarea a două scări de presiune de vapori a heliului; au fost introduse șase puncte de definiție – punctul triplu de echilibru a hidrogenului (17,042 K), punctul normal de fierbere al hidrogenului la echilibru (20,28 K), punctul de fierbere a neonului (27,102 K), punctul triplu al oxigenului (54,361 K) și punctul de congelare al staniului (231,9681 °C) care a devenit o alternativă permisă punctului de fierbere al apei, punctul de fierbere al sulfului a fost eliminat, valorile atribuite unor patru puncte fixe au fost modificate – punctul de fierbere al oxigenului (90,188 K), punctul de îngheț al zincului (419,58 °C), punctul de îngheț al argintului (961,93 °C) și punctul de îngheț al aurului (1064,43 C); formula de interpolare pentru domeniul termorezistenței a devenit mult mai complexă, domeniile permise ale constantelor  $c_2$  pentru formulele de interpolare pentru termorezistențe și termocuple au fost din nou modificate.

Scara de Temperatură Practică Internațională din 1968, ediția amendată din 1975, a fost adoptată de cea de-a 15-a Conferință Generală în 1975. Așa cum a fost cazul pentru IPTS-48 față de ITS-48, IPTS-68(75) nu a introdus modificări numerice. Majoritatea modificărilor textuale extensive au fost intenționate doar pentru a clarifica și simplifica utilizarea sa. Modificări de substanță mai mari au fost: punctul oxigenului a fost definit ca punctul de condensare în locul punctului de fierbere; punctul triplu al argonului

amended edition of 1960, ITS-48, was adopted by the eleventh Conférence Générale des Poids et Mesures. The tenth Conférence Générale has already adopted the triple point of water as the sole point defining the kelvin, the unit of thermodynamic temperature. In addition to the introduction of the word “Practical” the modifications to ITS-48 were: the triple point of water as the sole point defined as 0.01 °C, replaced the melting point of ice as the calibration point in this region; the freezing point of zinc, defined as being 419.505 °C, became a preferred alternative point to the sulphur boiling point (444.6 °C) as a calibration point; the permitted ranges for the constants of interpolation formulae for the standard resistance thermometer and the thermocouple were further modified; the restriction to “visible” radiation for optical pyrometry was removed.

In 1968 the Comité International des Poids et Mesures promulgated the International Practical Temperature Scale of 1968, having been empowered to do so by the thirteenth Conférence Générale of 1967 – 1968. The IPTS-68 incorporated very extensive changes from IPTS-48. These included numerical changes, designed to bring it more nearly in accord with thermodynamic temperatures, that were sufficiently large to be apparent to many users. Other changes were as follows: the lower limit of the scale was extended down to 13.81 K; at even lower temperatures (0.5 K to 5.2 K) the use of two helium vapour pressure scales was recommended; six new defining fixed points were introduced – the triple point of equilibrium hydrogen (17.042 K), the normal boiling point of equilibrium hydrogen (20.28 K), the boiling point of neon (27.102 K), the triple point of oxygen (54.361 K), and the freezing point of tin (231.9681 °C) which became a permitted alternative to the boiling point of water; the boiling point of sulphur was deleted; the values assigned to four fixed points were changed – the boiling point of oxygen (90.188 K), the freezing point of zinc (419.58 °C), the freezing point of silver (961.93 °C) and the freezing point of gold (1064.43 C); the interpolating formulae for the resistance thermometer range became much more complex; the permitted ranges of the constants  $c_2$  for the interpolation formulae for the resistance thermometer and thermocouple were again modified.

The International Practical Temperature Scale of 1968, amended edition of 1975, was adopted by the fifteenth Conférence Générale in 1975. As was the case for the IPTS-48 with respect to the ITS-48, the IPTS-68(75) introduced no numerical changes. Most of the extensive textual changes were intended only to clarify and simply its use. More substantive changes were: the oxygen point was defined as condensation point rather than the boiling point; the triple point of argon (83.798 K) was introduced as a permitted alternative to the condensation point of

(83,798 K) a fost introdus ca o alternativă permisă pentru punctul de condensare al oxigenului: noile valori de compoziție izotopică a neonului prezent natural au fost adoptate; recomandarea de a utiliza valori ale lui  $T$  fiind date scările de presiune de vapori din 1958  $^4\text{He}$  și din 1962  $^3\text{He}$  a fost anulată.

Scara de Temperatură de la 0.5 K la 30 K aproximativă din 1976, EPT-76, a fost introdusă pentru a îndeplini două cerințe importante: acestea au fost furnizarea de mijloace de a reduce substanțial erorile (față de valorile termodinamice corespunzătoare) sub 27 K care erau cunoscute că existau în IPTS-68 și domeniile complete de temperatură ale scărilor de presiune de vapori ale  $^4\text{He}$  și  $^3\text{He}$  din 1958 și 1962 și, respectiv, să umple un gol între 5,2 K și 13,81 K în care nu a existat înainte o scară internațională. Alte obiective în proiectarea EPT-76 au fost “să fie termodinamic lin, să fie continue cu IPTS-68 la 27.1 K, și să fie în acord cu temperatura termodinamică  $T$  pe cât posibil permit aceste două condiții”. În contrast cu IPTS-68, și pentru a asigura adoptarea sa rapidă, au fost aprobate mai multe metode pentru realizarea EPT-76. Acestea au inclus: folosirea unui instrument de interpolare termodinamic și una sau mai multe din cele unsprezece puncte de referință atribuite; considerarea diferențelor față de IPTS-68 deasupra 13,81 K; considerarea diferențelor față de scările presiunii de vapori ale heliului sub 5 K; considerarea diferențelor față de anumite scări de laborator bine stabilite. Deoarece a fost o anumită “lipsă de consistență internă” s-a admis că s-au putea introduce „ușoare ambiguități între realizări”. Cu toate acestea, s-a considerat că avantajele câștigate prin adoptarea EPT-76 ca scară de lucru până ce se revizuieste și extinde IPTS-68 depășesc dezavantajele.

Există diferențe numerice semnificative între valorile  $T_{90}$  și valorile corespunzătoare ale  $T_{68}$  măsurate pe Scara de Temperatură Practică Internațională (IPTS-68). Similar, au fost diferențe dintre IPTS-68 și Scara de Temperatură Practică Internațională din 1948 (IPTS-48) și dintre Scara de Temperatură Internațională din 1948 (ITS-48) și Scara de Temperatură Internațională din 1927 (ITS-27).

Punctele scării SIT-90 sunt prezentate în tabelul 1.

Între 0,65 K și 5,0 este definită în termeni de relații temperatură presiune de vapori a  $^3\text{He}$  și  $^4\text{He}$ , folosind ecuații de forma:

$$T_{90} / K = A_0 + \sum A_i [(\ln(p/Pa) - B)/C]^i \quad (1)$$

Valorile constantelor  $A_0$ ,  $A_i$ ,  $B$  și  $C$  sunt date pentru  $^3\text{He}$  în domeniul 0,65 K la 3,2 K, și pentru  $^4\text{He}$  în domeniile 1,25 K la 2,1768 K (punctul  $\lambda$ ) și 2,1768 K la 5,0 K.

oxygen: new values of the isotopic composition of naturally occurring neon were adopted; the recommendation to use values of  $T$  given by the 1958  $^4\text{He}$  and 1962  $^3\text{He}$  vapour-pressure scales was rescinded.

The 1976 Provisional 0.5 K to 30 K Temperature Scale, EPT-76, was introduced to meet two important requirements: these were to provide means of substantially reducing errors (with respect to corresponding thermodynamic values) below 27 K that were then known to exist in the IPTS-68 and throughout the temperature ranges of the  $^4\text{He}$  and  $^3\text{He}$  vapour pressure scales of 1958 and 1962 respectively, and to bridge the gap between 5.2 K and 13.81 K in which there had not previously been an international scale. Other objectives in devising the EPT-76 were “that it should be thermodynamically smooth, that it should be continuous with the IPTS-68 at 27.1 K, and that it should agree with the thermodynamic temperature  $T$  as closely as these two conditions allow”. In contrast with the IPTS-68, and to ensure its rapid adoption, several methods of realizing the EPT-76 were approved. These included: using a thermodynamic interpolation instrument and one or more of eleven assigned reference points; taking differences from IPTS-68 above 13.81 K; taking differences from helium vapour pressure scales below 5 K; and taking differences from certain well-established laboratory scales. Because there was a certain “lack of internal-consistency” it was admitted that „slight ambiguities between realizations” might be introduced. However the advantages gained by adopting the EPT-76 as a working scale until such time as the IPTS-68 should be revised and extended were considered to outweigh the disadvantages.

There are significant numerical differences between the values  $T_{90}$  and the corresponding values of  $T_{68}$  measured on the International Practical Temperature Scale of 1968 (IPTS-68). Similarly there were differences between the IPTS-68 and the International Practical Temperature Scale of 1948 (IPTS-48), and between the International Temperature Scale of 1948 (ITS-48) and the International Temperature Scale of 1927 (ITS-27).

The defining points of the ITS-90 are presented in table 1.

Between 0.65 K and 5.0 K is defined in terms of the vapor-pressure temperature relations of  $^3\text{He}$  and  $^4\text{He}$  using equations of the form:

$$T_{90} / K = A_0 + \sum A_i [(\ln(p/Pa) - B)/C]^i \quad (1)$$

The values of the constants  $A_0$ ,  $A_i$ ,  $B$  and  $C$  are given for  $^3\text{He}$  in the range of 0.65 K to 3.2 K, and for  $^4\text{He}$  in the ranges 1.25 K to 2.1768 K (the  $\lambda$  point) and 2.1768 K to 5.0 K.

**Tabelul 1.** Punctele fixe care definesc ITS-90  
**Table 1.** Defining fixed points of the ITS-90

Nr.	Temperatura definită / Defined Temperature		Substanța și starea ei Substance and its state
	$T_{90}$ , K	$t_{90}$ , °C	
1	0.65 ... 3.2	- 272.50 ... - 269.95	He Relația dintre temperatură și presiunea vaporilor saturați ai izotopului <sup>3</sup> He <i>Relationship between temperature and saturated vapour pressure point of <sup>3</sup>He isotope</i>
2	1,25 ... 2,1768	- 271,90 ... -270,9732	He Relația dintre temperatură și presiunea vaporilor saturați ai izotopului <sup>4</sup> He sub punctul său lambda <i>Relationship between temperature and saturated vapour pressure point of <sup>4</sup>He isotope below its lambda point</i>
3	2,1768 ... 5,0	- 270,9732 ... - 268,15	He Relația dintre temperatură și presiunea vaporilor saturați ai izotopului <sup>4</sup> He deasupra punctul său lambda <i>Relationship between temperature and saturated vapour pressure point of <sup>4</sup>He isotope above its lambda point</i>
4	3 ... 5	-270,15 ... -268,15	He Relația dintre temperatură și presiunea vaporilor saturați ai heliului <i>Relationship between temperature and saturated vapour pressure point of He</i>
5	13,8033	-259,3467	H Punctul triplu al hidrogenului la concentrația de echilibru a formelor moleculare orto și para <i>Triple point of hydrogen at the equilibrium concentration of the ortho- and para-molecular forms</i>
6	24.5561	- 248.5939	Ne Punct triplu al Ne cu compoziție izotopică naturală <i>Triple point of Ne of natural isotopic composition</i>
7	54.3584	- 218.7916	O <sub>2</sub> Punct triplu al oxigenului cu compoziție izotopică naturală <i>Triple point of oxygen of natural isotopic composition</i>
8	83.8058	- 189.3442	Ar Punct triplu al argonului cu compoziție izotopică naturală <i>Triple point of argon of natural isotopic composition</i>
9	234.3156	- 38.8344	Hg Punct triplu al mercurului cu compoziție izotopică naturală <i>Triple point of mercury of natural isotopic composition</i>
10	273.16	0.01	H <sub>2</sub> O Punct triplu al apei cu compoziția izotopică V-SMOW <i>Triple point of water of V-SMOW isotopic composition</i>
11	302.9146	29.7646	Ga Punctul de topire al Ga cu compoziție izotopică naturală <i>Melting point of gallium of natural isotopic composition</i>
12	429.7485	156.598	In Punctul de solidificare al indiului cu compoziție izotopică naturală <i>Freezing point of indium of natural isotopic composition</i>
13	505.078	231.928	Sn Punctul de solidificare al staniului cu compoziție izotopică naturală <i>Freezing point of tin of natural isotopic composition</i>
14	692.677	419.527	Zn Punctul de solidificare al zincului cu compoziție izotopică naturală <i>Freezing point of Zinc of natural isotopic composition</i>
15	933.473	660.323	Al Punctul de solidificare al aluminiului cu compoziție izotopică naturală <i>Freezing point of aluminum of natural isotopic composition</i>
16	1234.93	961.78	Ag Punctul de solidificare al argintului cu compoziție izotopică naturală <i>Freezing point of silver of natural isotopic composition</i>
17	1337.33	1064.18	Au Punctul de solidificare al aurului cu compoziție izotopică naturală <i>Freezing point of gold of natural isotopic composition</i>
18	1357.77	1084.62	Cu Punctul de solidificare al cuprului cu compoziție izotopică naturală <i>Freezing point of copper of natural isotopic composition</i>

De la 3.0 K la 24.5561 K,  $T_{90}$  este definită în termeni a unui termometru cu gaz  $^3\text{He}$  sau cu  $^4\text{He}$  tip cu volum constant care a fost etalonat la trei temperaturi. Acestea sunt punctul triplu al neonului (24.5561 K), punctul triplu al hidrogenului la echilibru (13.8033), și o temperatură între 3.0 K și 5.0 K. Această ultimă temperatură este determinată folosind un termometru cu  $^3\text{He}$  sau cu  $^4\text{He}$ .

De la 4.2 K până la punctul triplu al neonului,  $T_{90}$  este definită prin relația:

$$T_{90} = a + bp + cp^2 \quad (2)$$

unde  $p$  este presiunea în termometrul de gaz și  $a$ ,  $b$  și  $c$  sunt coeficienți, ai căror valori numerice sunt obținute din măsurări efectuate la trei puncte fixe de definiție, dar cu restricția ulterioară că cel mai jos din aceste puncte să se afle între 4.2 K și 5.0 K.

De la 3.0 K la punctul triplu al neonului (24.5561 K)  $T_{90}$  este definită prin relația :

$$T_{90} = \frac{a + bp + cp^2}{1 + B_x(T_{90})N/V} \quad (3)$$

unde  $p$  este presiunea în termometrul de gaz,  $a$ ,  $b$  și  $c$  sunt coeficienți ai căror valori numerice sunt obținute din măsurări la trei temperaturi de definiție,  $N/V$  este densitatea gazului cu  $N$  fiind cantitatea de gaz și  $V$  – volumul rezervorului,  $x$  este 3 sau 4 în funcție de izotopul utilizat. Valorile celui de-al doilea coeficient viral sunt obținute din relații documentate.

Pentru un termometru cu gaz  $^3\text{He}$  și pentru un termometru cu gaz  $^4\text{He}$ , folosit sub 4.2 K, trebuie considerată comportarea ne ideală a gazului.

Au fost efectuate susținute cercetări științifice pentru a stabili o scară care să extindă temperaturile sub 0.65 K. Scara Aproximativă de Temperatură Joasă de la 0.9 mK la 1 K, PLTS-2000 este definită [2] prin utilizarea următoarei ecuații care corelează presiunea de topire  $p$  a izotopului  $^3\text{He}$  de temperatura  $T_{2000}$ :

$$p / \text{MPa} = \sum_{i=1}^{+9} a_i (T_{2000} / \text{K})^i \quad (4)$$

### 3. ASPECTE PRIVIND FLUIDE CRIOGENICE

Agenții criogenici specifici care se utilizează în mod curent în experimente în domeniul temperaturilor joase sunt azotul lichid, hidrogenul și heliul.

Azotul lichid este un agent criogenic uzual, comod și ușor de obținut prin distilare fracționată a aerului. Este ieftin de transportat și ușor de depozitat. În criogenie interesează azotul lichid doar pentru calitățile sale tehnologice.

În laboratoarele de criogenie azotul lichid este utilizat în următoarele scopuri:

From 3.0 K to 24.5561,  $T_{90}$  is defined in terms of a  $^3\text{He}$  or a  $^4\text{He}$  gas thermometer of the constant-volume type that has been calibrated at three temperatures. These are the triple point of neon (24.5561 K), the triple point of equilibrium hydrogen (13.8033), and a temperature between 3.0 K and 5.0 K. This last temperature is determined using a  $^3\text{He}$  or a  $^4\text{He}$  vapour pressure thermometer.

From 4.2 K to the triple point of neon,  $T_{90}$  is defined by the relation:

$$T_{90} = a + bp + cp^2 \quad (2)$$

where  $p$  is the pressure in the gas thermometer and  $a$ ,  $b$  and  $c$  are coefficients the numerical values of which are obtained from measurements made at three defining fixed points given in Sect.3.2, but with the further restriction that the lowest one of these points lies between 4.2 K and 5.0 K.

From 3.0 K to triple point of neon (24.5561 K),  $T_{90}$  is defined by the relation:

$$T_{90} = \frac{a + bp + cp^2}{1 + B_x(T_{90})N/V} \quad (3)$$

where  $p$  is the pressure in the gas thermometer,  $a$ ,  $b$ , and  $c$  are coefficients the numerical values of which are obtained from measurements at three defining temperatures,  $N/V$  is the gas density with  $N$  being the quantity of gas and  $V$  the volume of the bulb,  $x$  is 3 or 4 according to the isotope used. The values of the second virial coefficients are given by documented relations.

For a  $^3\text{He}$  gas thermometer, and for a  $^4\text{He}$  gas thermometer used below 4.2 K, the non-ideality of the gas must be accounted.

Considerable research has been conducted on establishing a temperature scale extending to temperatures lower than 0.65 K The Provisional Low Temperature Scale from 0.9 mK to 1 K, PLTS-2000 is defined [2] by the following equation relating the melting pressure  $p$  of  $^3\text{He}$  to temperature  $T_{2000}$ :

$$p / \text{MPa} = \sum_{i=1}^{+9} a_i (T_{2000} / \text{K})^i \quad (4)$$

### 3.ASPECTS REGARDING THE CRYOGENIC FLUIDS

Specific cryogenic agents usually used in experiments in low temperature ranges are the liquid nitrogen, hydrogen and helium.

The liquid nitrogen is a common cryogenic agent, convenient and easy to obtain by fraction distillation of air. It is cheap to transport and easy to store it. In cryogenic applications only the liquid nitrogen is of interest for the following purposes:

- to obtain a direct or intermediate source of cold, depending of the experiment; an intermediate source of cold it is not always necessary taking into

- pentru obținerea unei surse de frig directe sau intermediare în funcție de experiment; o sursă de frig intermediară nu este întotdeauna necesară, ținând cont de nivelul ridicat al tehnicilor de izolație;

- ca preîncălzitor sau agent răcitor;
- pentru pre-răcirea aparatului înainte de a fi utilizată la temperaturi mai joase, deși se mai utilizează în asemenea sisteme și frigul vaporilor lichidului inclus în experiment;

- pentru răcirea adsorbanților utilizați în purificarea gazelor;

- alte utilizări.

Azotul lichid este destul de rece pentru a condensa aerul din atmosferă, fapt care poate cauza erori la măsurările de temperatură.

Hidrogenul este elementul cu cea mai mică greutate moleculară și ca atare este cel mai ușor gaz, are cea mai mică densitate în orice stare de agregare și în stare solidă este mai dens decât lichidul.

Mișcarea moleculelor de hidrogen are viteza cea mai mare și ca atare are rata de difuzie cea mai mare și totodată cea mai scăzută vâscozitate. Termic, prezintă cea mai mare capacitate calorică în orice stare de agregare. Trebuie amintit că la schimbarea de fază (tranziție de ordinul I) potențialul Gibbs este constant, cât timp entropia variază abrupt și căldură specifică tinde spre infinit, situație care se exprimă:

$$Q = const. \quad (5)$$

$$S = -\left(\frac{\delta G}{\delta T}\right)_F \quad (6)$$

$$C_p = T\left(\frac{\delta S}{\delta T}\right)_F \rightarrow \infty \quad (7)$$

Din această cauză căldură specifică  $C_p$  nu este determinată în timpul schimbării de fază și practic își pierde înțelesul fizic (în această regiune).

Hidrogenul este o substanță care trebuie manipulată cu grijă respectând prescripțiile de siguranță anti-ex și incendiu, deoarece prezintă un larg interval de aprindere în aer 4 - 75 % și prezintă pericol de explozie în limitele de 18 - 65 % în aer, în special în volume închise. O atenție deosebită trebuie dată evitării prezenței oxigenului solid în hidrogenul solid.

Sursele de hidrogen sunt de natură industrială și au la bază, în principal următoarele procese tehnologice: reformarea catalitică a gazelor naturale, oxidarea parțială a combustibililor lichizi, electroliza apei, etc.

Hidrogenul are trei izotopi: propriu (H) de masa atomică 1, deuteriul (D) de masa atomică 2 și tritiul (T) de masa atomică 3. Primii doi H și D sunt izotopi stabili, tritiul este radioactiv fiind imitator de radiație  $\beta$  la o energie de 5,6 KeV, cu timp de înjumătățire de 12,3 ani.

În Tabelul 2 se prezintă principalii parametri ai moleculelor hidrogenului și a izotopilor lui.  $T_k$ ,  $p_k$ ,

account the high level of insulate techniques;

- as a pre-heater or cooling agent;
- to pre-cool the apparatus before being used at lower temperatures, although in such experiments the cold of the vapour included in the experiment may be also used;

- to cool the adsorbers used to purify gases;

- other uses.

The liquid nitrogen is rather cold to condensate the atmospheric air, causing errors in temperature measurements.

The hydrogen is the element having the smallest molar weight and therefore is the lightest gas, it has the smallest density in every physical state and in the solid state is more dens than the liquid.

The movement of the hydrogen molecules gases occurs with the highest velocity and therefore it has the highest diffusion rate and also the lowest viscosity. It has the highest caloric capacity in any aggregation state. It should be noted that during the phase change (Ist order transition) the Gibbs potential is constant as long as the entropy vary abruptly and the specific heat tends to infinite, situation expressed as:

$$Q = const. \quad (5)$$

$$S = -\left(\frac{\delta G}{\delta T}\right)_F \quad (6)$$

$$C_p = T\left(\frac{\delta S}{\delta T}\right)_F \rightarrow \infty \quad (7)$$

For this reason, the specific heat  $C_p$  is not determined during the phase exchange and practically it loses the physical meaning (in this region).

The hydrogen is a substance to be handled with care, following the anti-ex and fire requirements because it has a large interval of self ignition in air of 4 to 75 %, it has an explosion threat and it also present its explosive potential within the limits of 18 - 65 % in air, especially in closed volumes. A special care should be given to the presence of solid oxygen in solid hydrogen.

Sources of hydrogen are of industrial nature and relies mainly on the following technologic processes: natural gases platforming, partial oxidation of the liquid fossils, water electrolysis, etc.

There are three isotopes of hydrogen: protium (H) having the atomic mass of 1, deuterium (D) having the atomic mass of 2 and tritium (T) having the atomic mass of 3. The first two, H and D, are stable isotopes, tritium is radioactive being a mimic of  $\beta$  radiation at a energy of 5.6 KeV, and having a half live of 12.3 years.

Main parameters of the hydrogen molecules and isotopes are presented in table 2.  $T_k$ ,  $p_k$ ,  $v_k$  are state parameters in the critical point

$v_k$  sunt parametri de stare în punctul critic.

**Tabelul 2** - Principalii parametri ai moleculelor hidrogenului și a izotopilor lui  
**Table 2** Main parameters of the hydrogen molecules and isotopes

		<b>H<sub>2</sub></b>	<b>HD</b>	<b>D<sub>2</sub></b>	<b>DT</b>	<b>T<sub>2</sub></b>
<b>T<sub>k</sub></b>	K	33,24	35,9	38,2	39,5	40,6
<b>p<sub>k</sub></b>	kg/cm <sup>2</sup>	12,797	14,6	16,2	17,3	18,1
<b>v<sub>k</sub></b>	m <sup>3</sup> /mol	66,95	-	60,3	-	57,1
<b>Greutatea moleculară Molar weight</b>	g/mol	2 2,016	3	4	5	6
<b>Temperatura de fierbere la 1 atm Boiling temperature at 1 atm</b>	K	20,39	22,13	23,57	-	-

Separarea izotopilor hidrogenului se bazează pe diferențele foarte mici între parametrii fizici prezentați în tabel, ceea ce conduce la tehnologii de separare caracterizate printr-un mare volum specific și o sensibilitate ridicată în operarea instalațiilor.

O comportare specifică hidrogenului se datorează poziției relative a spinului atomilor care formează molecula de hidrogen. Molecula de hidrogen cu spini orientați în aceeași direcție, adică cu spini paraleli corespunde modificării orto și dacă spinii sunt orientați în direcții opuse, adică spini antiparaleli, corespunde modificării para.

În Tabelul 3 sunt prezentate valorile mărimilor de stare pentru cele două specii moleculare ale hidrogenului – orto și para.

În condițiile mediului ambiant hidrogenul este format din 75 % molecule orto și 25 % para. Compoziția la echilibru între cele două specii moleculare este funcție de temperatură. În figura 3 sunt date curbele de echilibru pentru cei trei izotopi ai hidrogenului, pe ordonata fiind marcat continutul în para hidrogen.

The separation of hydrogen isotopes relies on very small differences between the physical parameters presented in the table, leading to separation technologies characterized by a specific volume and a high sensitivity in the installation operation.

A specific behavior of the hydrogen is due to the relative position of the atom's spine from the hydrogen molecule. The hydrogen molecule having spines orientated in the same direction, i.e parallel spins correspond to the modification ortho, and if the spins are orientate in opposite directions, anti-parallel spins, it corresponds to para modification.

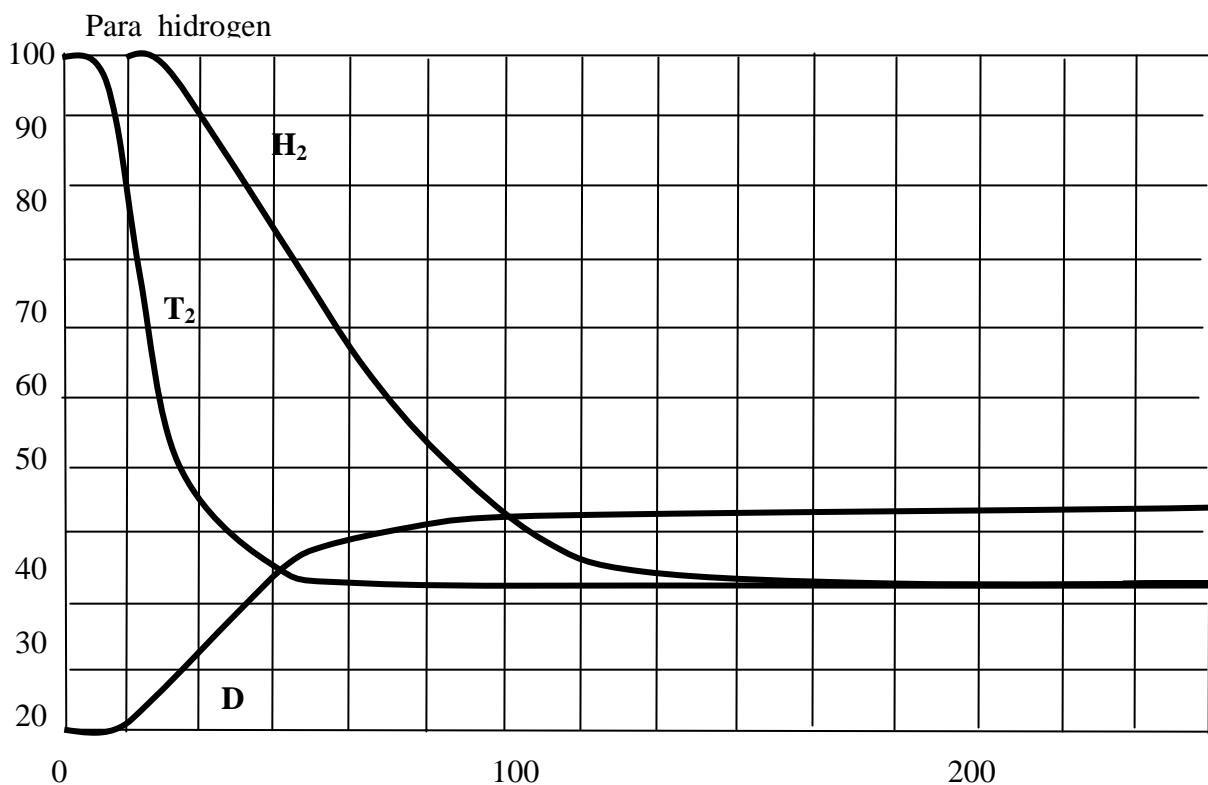
Values of the state quantities *the* two molecular species of hydrogen ortho and para are presented in Table 3.

In ambient environment the hydrogen consists of 75 % molecules ortho and 25 % para. The composition at equilibrium between the two molecular species depends on temperature. In figure 1 there are presented the equilibrium curves for the three isotopes of hydrogen, on abscise being marked the para hydrogen content.

**Tabel 3.** Valorile mărimilor de stare pentru cele două specii moleculare ale hidrogenului orto și para  
**Table 2.** Values of state quantities for the two molecular species of hydrogen ortho and para

		<b>ORTO - HIDROGEN</b>	<b>PARA - HIDROGEN</b>		
<b>Punct critic Critic point</b>	<i>P</i>	12,98	12,759		
	<i>T</i>	33,18	32,976		
<b>Punct de fierbere la 1 atm Boiling point at 1 arm</b>	<i>r</i>	0,01494	0,01559		
	<i>T</i>	20,38	20,268		
	<i>r<sub>L</sub></i>	0,0352	0,03511		
<b>Punct triplu Triple point</b>	<i>r<sub>V</sub></i>	0,0006606	0,0006636		
	<i>p</i>	0,071	0,0695		
	<i>T</i>	13,947	13,803		
	<i>r<sub>S</sub></i>	3,04301	0,04291		
	<i>r<sub>L</sub></i>	0,03830	0,03821		
	<i>r<sub>V</sub></i>	0,0000631	0,0000624		
p - atm	r - mol/cm <sup>3</sup>	S - solid	V – vapori	T - K	L - lichid





**Figura 1.** Diagrama de echilibru orto – para pentru izotopii hidrogenului  
**Figure 1** Equilibrium diagram ortho- para for the isotopes of hydrogen

Importanța cunoașterii echilibrului orto/para în funcție de temperatură se datorează căldurii mari de conversie care în domeniul (15 ... 70) K este de 706 J/kg și este mai mare decât căldura de vaporizare, a cărei valoare este de numai 447 J/kg. Viteza de conversie este relativ redusă, dar cu toate acestea, prin căldura dezvoltată, face imposibilă stocarea hidrogenului lichid pentru un timp mai îndelungat.

Timpul de conversie orto – para hidrogen este dat de relația:

$$X_{pH_2} \cong \frac{0,25 + 0,00855\tau}{\lambda + 0,00885\tau} \quad (8)$$

unde:  $X_{pH_2}$  reprezintă concentrația în para-hidrogen;  
 -  $\tau$  timpul în ore.

Ca ordin de marime, după o mie de ore  $X_{pH_2} \cong 0,92$  pornind de la o concentrație inițială 0,25 (primul termen în relația de mai sus).

Având la bază concentrația hidrogenului natural ( $nH_2$ ), căldura de conversie în funcție de temperatura, respectând echilibrul, este data în tabelul 4.

The importance of knowing the orto/para equilibrium depending on temperature is due to the high value of the conversion heat, of 706 J/kg in the range of (15 ... 70) K, higher than the vapour heat of only 447 J/kg. The conversion speed is rather small, however by means of the developed heat it is impossible to store the liquid hydrogen for a longer period.

The conversion time ortho- para hydrogen is given by the equation:

$$X_{pH_2} \cong \frac{0,25 + 0,00855\tau}{\lambda + 0,00885\tau} \quad (8)$$

where:  $X_{pH_2}$  is the concentration in para-hydrogen;  
 -  $\tau$  is time in hours.

As a magnitude order, after one thousand of hours,  $X_{pH_2} \cong 0,92$ , starting from an initial concentration of 0.25 (first term of the above equation). Starting from the concentration of the natural hydrogen the conversion heat is given in the table 4, meeting the equilibrium.

**Tabel 4.** Căldura de conversie în funcție de temperatură  
**Table 4** Conversion heat as a function of temperature

$T(K)$	15	20,30	30	75	501	250
$q(J/g)$	527	525	506	185	15,1	0,25

Pregătirea pentru stocarea îndelungată a hidrogenului se face prin conversia lui la forma para - hidrogen. Parahidrogenul evaporat rămâne timp îndelungat sub forma de para, chiar și la 300 K (ambient).

Conversia orto-para este o relație de ordinul doi, definită prin constanta de reacție K. Fiind o operație costisitoare, atunci când depozitarea hidrogenului se face pentru intervale de timp limitate, se utilizează cu succes instalații de recondensare a vaporilor de hidrogen.

Heliul este elementul cu cele mai scăzute date critice și care prezintă o serie de proprietăți cu totul deosebite. Datorită acestor proprietăți el este atractiv nu numai din punctul de vedere al criogeniei, unde marchează limita inferioară de temperatură, ci și din punct de vedere fizic.

Sursele de heliu sunt gazele de sondă din apropierea câmpurilor petrolifere unde se găsește în concentrații de 0,1 până la 2 % și, în mod cu totul excepțional la 8 % . În general, sursele de heliu se găsesc în regiuni cu zăcăminte de uraniu și toriu. Concentrația de heliu în aer este în jur de 5 ppm .

Greutatea moleculară a heliului este  $M = 4,0026$  g/mol și are temperatura de fierbere la presiunea de  $p = 1,013$  bar, de  $T_f = 4,224$  K.

Datele critice sunt:  $T_k = 5,2014$  K,  $p_k = 2,275$  bar și  $r_k = 0,0694$  g/cm<sup>3</sup>.

Căldura de topire în punctul minim este nulă și la temperaturi foarte mici, chiar se eliberează căldură, așa că pentru solidificare va trebui introdusă căldură. Solidificarea heliului se produce la presiuni mari, spre exemplu:

la  $T = 1$  K  $\rightarrow$   $p = 40,11$  bar

la  $T = 3$  K  $\rightarrow$   $p = 129$  bar.

Diagrama din figura 2 explica comportarea mai deosebită a He față de hidrogen și celelalte gaze greu lichefiabile. Faptul că heliu nu are punct triplu îl deosebește de toate gazele. Răcit sub presiunea propriilor vapori, heliul rămâne lichid până la temperatura de zero absolut. Micșorând presiunea vaporilor de heliu în fierbere, acesta își va scădea temperatura, până când la nivelul de 2,177 K și 50,4 mbar faza lichidă va suferi o transformare trecând în faza <sup>4</sup>HeII din faza inițială de <sup>4</sup>HeI. În diagrama din figura 2, cele două faze sunt separate de linia λ. Atât timp cât HeI se comporta ca lichid normal, <sup>4</sup>HeII este un lichid care prezintă unele proprietăți fizice cu totul neobișnuite. Astfel, <sup>4</sup>HeI prezintă o puternică agitație la fierbere, care la trecerea prin linia λ se liniștește complet, lichidul <sup>4</sup>HeII, cu toate că este în fierbere, are o suprafață netedă cu o muchie ascuțită la suprafața vasului. Prin trecerea definitivă de la linia λ în domeniul <sup>4</sup>HeII, viscozitatea scade de milioane de ori, iar conductivitatea termică crește de milioane de ori.

The preparation of storing hydrogen for a longer period is achieved by its conversion to the para hydrogen. The evaporated para hydrogen rests for a long time in this form even at 300 K (ambient temperature).

The ortho- para conversion is a second order equation, defined by the reaction constant. Being a costly operation, when the storage is performed for limited periods of time, installations for recondensation of vapour hydrogen are used successfully.

Helium is the chemical element having the lower critical data and presents some remarkable properties. Due to these properties it is attractive not only from the cryogenic point of view, where it marks the lower limit, but also from the physical point of view.

Helium sources are petroleum gases in the vicinity of oil fields, where it can be found in concentration ranging from 0.1 to 2 %, exceptionally up to 8 %. In general, the helium sources are to be found near uranium and thorium deposits. In air helium is in a concentration of about 5 ppm.

The molar mass of helium is  $M=4.0026$  g/mole and it has the boiling temperature of  $T_f = 4.224$  K at the atmospheric pressure of  $p = 1,013$  bar.

The critical data are:  $T_k = 5,2014$  K,  $p_k = 2,275$  bar and  $r_k = 0,0694$  g/cm<sup>3</sup>

The melting heating in the minimum point is zero and at very low temperatures, heat is still liberated, thus for solidification it will be needed to introduce heat. The solidification of helium is produced at high pressure, such as:

la  $T = 1$  K  $\rightarrow$   $p = 40,11$  bar

la  $T = 3$  K  $\rightarrow$   $p = 129$  bar.

The diagram presented in figure 2 explains the special behavior of He against hydrogen and the other gases. The fact that helium has not a triple point makes it different from all other gases. Cooled below the pressure of its vapours, helium remains liquid until absolute zero temperatures. Lowering the vapour pressure of boiling helium, its temperature will further decrease and at 2.177 K and 50.4 mbar the liquid phase will be transformed from <sup>4</sup>HeI, in the initial phase, to <sup>4</sup>HeII. In the diagram presented in figure 2, the two phases are separated by the λ line. As long as HeI behaves as a normal liquid, <sup>4</sup>HeII is liquid having very unusual physical properties. Thus, <sup>4</sup>HeI presents a vivid agitation at boiling, that, after crossing the λ line, completely becomes calm, although the <sup>4</sup>HeII liquid is boiling it has a flat surface with a sharp edge at the bowl surface. After complete crossing the λ line in <sup>4</sup>HeII area, the viscosity decrease by billion of times and the thermic conductivity increase by billion of times.

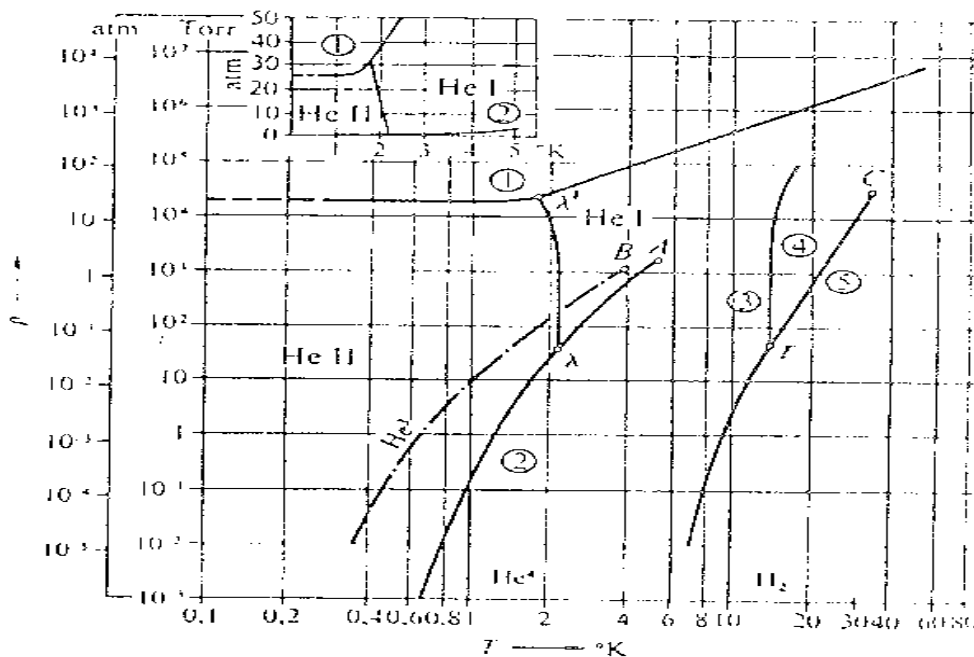
Near zero absolute temperature, the viscosity becomes zero and <sup>4</sup>HeII turns into a superfluid

La apropierea de zero absolut viscozitatea devine nulă și  ${}^4\text{HeII}$  devine un lichid suprafluid, practic fără frecare. În cifre, viscozitatea atinge valoarea de  $10^{-11}$  poise și conductibilitatea termică este de 200 ori mai mare ca a cuprului.

Notații pentru diagrama din figura 2: A punctul critic al  ${}^4\text{He}$ ;  ${}^3\text{He}$  – curba de vapori; B – Punctul critic al  ${}^3\text{He}$ ; C- Punctul critic al  $\text{H}_2$ ; T – Punctul triplu al  $\text{H}_2$ ; Domenii: 1- He solid; 2-He gaz; 3 –  $\text{H}_2$  solid; 4 –  $\text{H}_2$  lichid; 5 –  $\text{H}_2$  gaz.

liquid, practically without friction. In figures, the viscosity reaches  $10^{-11}$  poise and the thermic conductivity is 200 times higher that those of copper.

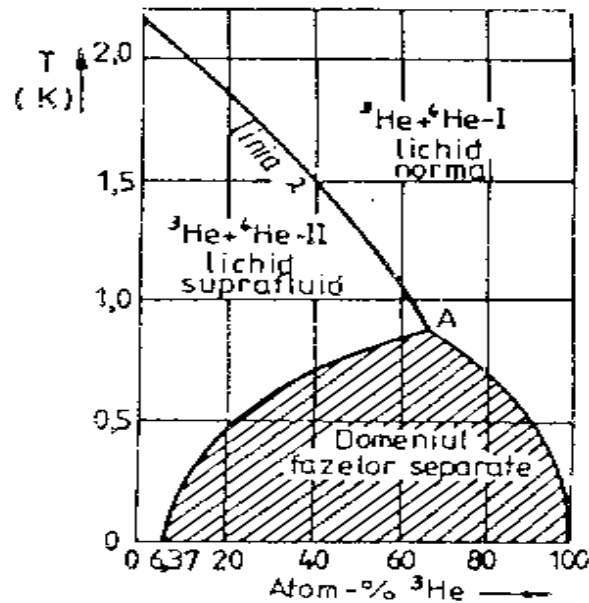
Notations in the diagram presented in figure 2: A critical of point of  ${}^4\text{He}$ ;  ${}^3\text{He}$  – vapour curve; B – critical of point of  ${}^3\text{He}$ ; C- critical of point of  $\text{H}_2$ ; T – triple point of  $\text{H}_2$ ; Domains: 1- He solid; 2-He gas; 3 –  $\text{H}_2$  solid; 4 –  $\text{H}_2$  liquid; 5 –  $\text{H}_2$  gas.



**Figura 2.** Diagrama de faza pentru  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^3\text{He}$  și  $\text{H}_2$   
**Figure 2.** Phase diagram for  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^3\text{He}$  and  $\text{H}_2$

Deosebirea mare între proprietățile fizice ale celor doi izotopi ai heliului este pusă în evidență prin diagrama fazelor a amestecului  ${}^3\text{He} + {}^4\text{He}$ , ilustrată în figura 3, care prezintă trei domenii: a unui lichid normal  ${}^3\text{He} + {}^4\text{He-I}$ , a unui lichid suprafluid  ${}^3\text{He} + {}^4\text{He-II}$  și un domeniu în care apare o separare a fazelor. Este de observat că în apropierea temperaturii de zero absolut se menține solubilitatea finită a  ${}^3\text{He}$  în  ${}^4\text{He}$ , respectiv de 6,37%. Această comportare a amestecului  ${}^3\text{He} + {}^4\text{He}$  a permis realizarea unui proces criogenic cu funcționare continuă, acoperind un domeniu de temperaturi cuprinse între 100 și 1 mK.

The significant difference between the physical properties of the two helium isotopes is put into evidence in the phase diagram of the mixture  ${}^3\text{He} + {}^4\text{He}$ , shown in figure 3. Three domains of a normal liquid  ${}^3\text{He} + {}^4\text{He-I}$ , of a superfluid liquid  ${}^3\text{He} + {}^4\text{He-II}$  and a field showing a phase separation are illustrated. Note that, in the vicinity of zero absolute temperature, the finite solubility of  ${}^3\text{He}$  in  ${}^4\text{He}$ , i.e. 6.37 %, is maintained. This behavior of the mixture  ${}^3\text{He} + {}^4\text{He}$  allowed the achievement of a cryogenic process having a continuous functioning, covering a range of temperatures lying between 100 and 1 mK.



**Figura 3.** Diagrama fazelor amestecului de  $^3\text{He} + ^4\text{He}$ . A- $T = 0,872 \pm 0,003\text{K}$ ;  $x = 66,9 \pm 0,5\%$  atom  $^3\text{He}$   
**Figura 3.** Phase diagram for the mixture  $^3\text{He} + ^4\text{He}$ . A- $T = 0,872 \pm 0,003\text{K}$ ;  $x = 66,9 \pm 0,5\%$  atom of  $^3\text{He}$

#### 4. CONCLUSIONS

Articolul a prezentat aspecte ale măsurării temperaturilor joase și a trecut în revistă o serie de proprietăți relevante a trei materiale utilizate în aplicații criogenice.

#### BIBLIOGRAFIE

- [1] Scara Internațională de Temperatură din 1990, publicată în Procesul verbal al Comitetului Internațional de Măsuri și Greutăți, întâlnirea a 78-a din 1989
- [2] Recomandarea PLTS-2000

#### Revizia științifică:

*Profesor universitar doctor Fănel IACOBESCU, director general BRML*

#### Despre autori:

*Cristian Dorin Nichita, doctorand, director general RENAR*

#### 4. CONCLUSIONS

The article presented aspects of the measurements performed at low temperatures and reviewed some relevant properties of three materials used in cryogenic applications

#### REFERENCES

- [1] The International Temperature Scale of 1990, published in Procès-verbaux du Comité International des Poids et Mesures, 78<sup>th</sup> meeting 1989
- [2] PLTS-2000 Recommendation

#### Scientific Review:

*Professor university doctor Fănel IACOBESCU, general director of BRML*

#### About authors:

*Cristian Dorin Nichita, Ph student, general director of RENAR*