

TERMODİNAMİK SICAKLIK BİRİMİ KELVIN (K) ve 1990 ULUSLARARASI SICAKLIK ÖLÇEĞİ (ITS-90)

Sevilay Uğur, Ahmet T. İnce

TÜBİTAK, Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) P.K.21 41470 Gebze/KOCAELİ

Özet

Temel yedi SI biriminden biri olan Kelvin (K) maddenin tek ve en iyi tanımlanmış ve tekrarlanabilir hali olan suyun üçlü noktasının termodinamik (mutlak) sıcaklığının $1/273.16$ 'sı olarak tanımlanır. Bu herkes tarafından kabul edilen evrensel bir tanımdır. Buna göre suyun üçlü noktası kesin olarak 273.16K veya 0.01°C dir.

Uluslararası Sıcaklık Ölçeği (ITS-90)'ne göre belli sıcaklık noktaları bir dizi sabit nokta tarafından gerçekleştirilir. ITS-90 bütün bu sabit noktaları belirlediği gibi, ara sıcaklıkların elde edilebilmesi için gereken interpolasyon denklemlerini de belirlemiştir. Ayrıca sıcaklıkla ilgili tüm metod ve ölçümler de, ITS-90 tarafından belirlenen standartlara izlenebilir olarak yapılmak zorundadır.

1. Giriş

Günümüzde sıcaklık, bilim ve teknolojide kullanılan temel değişkenlerden biridir. Termodinamik, akışkan mekaniği, ısı transferi, kimya ve fizik bilimleri sıcaklık kavramı olmadan bir yere varamazdı.

Eski zamanlarda bile insanlar, sıcaklığın dereceleri olduğunun farkındaydı. Yakan bir güneş veya buz tutmuş su onların günlük yaşamlarındaki doğal olaylardı. Bununla birlikte bilinen ilk sıcaklık ölçüm cihazı Galileo Galilei tarafından yapılan içinde hava ve su bulunan bir camdı. Bununla iki ayrı noktadaki sıcaklık farkı görülebiliyordu. Termometrenin tarihçesine [1] bir göz atacak olursak;

İlk olarak termometre sözcüğü, J.Leurechon tarafından kullanıldı ve onun termometresi bir ucu genişletilmiş ve su doldurulmuş cam tüp idi. Yaklaşık 1654 yılında Ferdinand II cam tüpü alkol ile doldurdu ve bu tüpü atmosferik basınçta kapatarak basınçtan etkilenmeyen ilk termometreyi yaptı.

1664'de Robert Hook bu termometreyi buz noktasındaki destile suya batırarak 0 (sıfır) noktasını işaretledi. 1694 yılına gelindiğinde hala bilim adamları sıcaklık veya soğukluğu ölçmek için, zaman, uzunluk ve ağırlıkta olduğu gibi bir standart olmamasının eksikliğini duyuyorlardı.

Sonunda 1694 yılında Carlo Renaldini buzun ergime noktasını ve suyun kaynama noktasını termometre ölçeği için iki sabit nokta olarak aldı. Bu iki sabit nokta arasını da 12 eşit parçaya böldü. Renaldini'nin termometriye katkısı o zamanlarda pek farkedilmedi.

1701 yılında Newton, tekrarlanabilen iki sabit noktaya dayalı sıcaklık ölçeğini tanımladı. İlk sabit nokta olarak buzun ergime noktasını aldı ve bu noktayı sıcaklık ölçeğinde 0 olarak

belirledi. İkinci sabit nokta ise sağlıklı bir İngilizin koltuk altı sıcaklığıydı ve bu noktayı da 12 olarak belirledi. Bu sıcaklığın eşit parçalara bölündüğü ölçekte suyun kaynama noktası 34 oluyordu.

1706'da Daniel Gabriel Fahrenheit adlı Amsterdam'lı bir usta termometreler yapmaya başladı. Birkaç farklı numaralama denedikten sonra ölçeğini 0, 48, 96 olarak belirlemeye karar verdi. Onun ölçeğinde 0 su, buz ve saf-amonyak karışımının sıcaklığı, 96 ise sağlıklı bir kişinin kanının sıcaklığı olarak tanımlanmıştı ve bu ölçekte atmosferik basınçta buz 32 noktasında eriyor ve su 212 noktasında kaynıyordu. Fahrenheit'in çalışmasının en önemli noktası termometrelerinin hem stabil olması hem de tekrarlanabilir bir ölçüğe sahip olmasıydı.

1742 yılında Anders Celcius sıfır noktasını buzun ergime noktası, 100 noktasını da suyun kaynama noktası olarak aldığı ölçeğini tanımladı. Bir yıl sonra Christian Lyons tarafından bağımsız olarak bugün kullandığımız santigrad ölçeği tanımlandı. Bu ölçek bugün Celcius ölçeği olarak bilinir.

18. yüzyıl sonunda pekçok sabit nokta ve interpolasyon cihazları kullanılmasına rağmen, ne Celcius ne de Fahrenheit ölçekleri kabul edilebilir bir sıcaklık ölçeğini tanımlamıyordu. Standart interpolasyon cihazlarına ve yöntemlerine gereksinim vardı, çünkü sabit noktalar dışındaki sıcaklık noktalarının tanımlanması hala karışıktı.

2. Mutlak sıcaklık

Mutlak sıcaklık, T için ideal gaz eşitliğini yazalım

$$pV=nRT$$

veya eşit bir şekilde

$$pV=\nu kT$$

Burada $R=N_a k$ dir. n mol sayısı, N_a Avagadro sayısı, k Boltzman sabitidir.

Pratikde ideal gaz durumu moleküllerarası uzaklığı büyük olan gazın yüksek oranda seyreltilmiş olduğu durumlarda elde edilebilir. $pV=nRT$ eşitliği incelenecek olursa bazı belirgin yargıları içerdiği görülür.

* Eğer sıcaklık sabit tutulursa, $pV=\text{sabit}$ olur. Bu ilişki "Boyle Kanunu" olarak bilinir.

* İkinci bir yargı ise gazın durum eşitliğinin, hangi gazın ele alındığından bağımsız olmasıdır.

Eğer ideal gaz eşitliğinde ideal gazın hacmi (V) sabit tutulursa o zaman basınç p doğrudan sıcaklıkla orantılıdır. Bu noktada k sabitinin (veya eşit olarak R) değerini bilmemekteyiz. Şöyle bir şey yapabiliriz; sabit hacimdeki ideal gaz, T_A sıcaklığındaki A sistemi ile termal kontak halinde olsun. Sonra yine ideal gaz, T_B sıcaklığındaki B sistemiyle termal kontak yaparsa

$$\frac{p_A}{p_B} = \frac{T_A}{T_B}$$

olacaktır. A ve B sistemlerinin mutlak sıcaklıklarının oranı p_A/p_B olarak elde edilebilir.

Suyun üçlü noktasında maddenin katı, sıvı ve gaz halinin bir arada bulunabildiği tek bir sıcaklık ve basınç değeri bulunduğu ve içindeki madde miktarından bağımsız olduğu için, burada standart durum olarak suyun üçlü noktasını alırsak. Böylece, suyun üçlü noktası çok iyi tekrarlanabilen bir sıcaklık standardı oluşturur. Suyun üçlü noktasının sıcaklığına T_t dersek, $T_t=273.16$ olarak bulunmuştur. Bu seçimle bu yeni sıcaklık ölçeği eski sıcaklık ölçeğiyle mümkün olduğu kadar yakın tutulmaya çalışılmıştır. Bu ölçekte sıcaklık birimi geçmiş yüzyılın ünlü fizikçisi Kelvin'in adını alarak Kelvin (K) olarak adlandırılır.

Tarihsel olarak Celcius ölçeğinde sıcaklık θ , termometri değişkeninin doğrusal fonksiyonu olarak seçilmiştir. Sabit hacimde termometrik parametre basınç, p , sabit basınçta ise hacim, V , dir. Örnek olarak termometrik parametreyi p alıp celcius sıcaklığı θ yı p basıncının doğrusal fonksiyonu olarak yazalım.

$$\theta = ap + b$$

a ve b bilinen iki sabit noktada belirlenmesi gereken sabitlerdir. Bu noktalar;

* buz ve havaya doymuş suyun denge hali (buz noktası, bu noktanın sıcaklığına $\theta=0$ denilmiştir).

* 1 Atmosferde su ve su buharının denge hali (bu noktaya da $\theta=100$ denilmiştir). Bunlara göre eşitlikleri yazarsak

$$\begin{aligned} 0 &= ap_i + b \\ 100 &= ap_s + b \\ \theta &= 100 \left(\frac{p - p_i}{p_s - p_i} \right) \end{aligned}$$

elde edilir. Bu eşitlik alternatif olarak p basıncını sıcaklık cinsinden elde etmek için de kullanılabilir. O zaman

$$p = p_i \left(1 + \frac{\theta}{\theta_0} \right), \quad \theta_0 = 100 \left(\frac{p_s}{p_i} - 1 \right)^{-1}$$

bağıntıları elde edilir. θ_0 sabit hacimde seçilen sadece iki sıcaklık noktasındaki basınçlar oranına bağlıdır. O yüzden gazın cinsine bağlı değildir ve bu iki noktada basınç ölçülerek bulunabilir. Bu ölçümler sonucu $\theta_0=273.15$ olarak bulunmuştur. Basınç oranlarını yazarsak

$$\frac{p_A}{p_B} = \frac{\theta_0 + \theta_A}{\theta_0 + \theta_B}$$

ifadesi bulunur. $T = \theta_0 + \theta$ olarak tanımlanırsa suyun üçlü noktasında $T=273.16K$ dir.

Böylece Kelvin termodinamik sıcaklık olarak bilinen ve T sembolüyle gösterilen temel fiziksel bir niceliğin birimidir. K ile ifade edilen bu birim suyun üçlü noktasının termodinamik sıcaklığının $1/273.16$ 'sı olarak tanımlanır.

Günlük hayatta ise sıcaklık $273.15K$ den fark olarak (buz noktası) ifade edilir. Bu şekilde ifade edilen termodinamik sıcaklık Celcius sıcaklığı olarak bilinir, t ile gösterilir ve

$$t/^{\circ}C = T/K - 273.15$$

eşitliğiyle tanımlanır. Celcius sıcaklığı (t) birimi derece celcius'dur ve $^{\circ}C$ sembolüyle

gösterilir ve büyüklüğü kelvine eşittir. İki sıcaklık farkı kelvin veya derece celsius olarak ifade edilebilir.

3. Sıcaklık Ölçeklerinin Tarihçesi

ITS-90 ölçeği [2], daha önce kullanılmış olan birçok uluslararası sıcaklık ölçeğinin bugüne dek gelişimiyle ortaya çıkmıştır. Bu ölçekler, sıcaklık ölçümlerinin doğru ve tekrarlanabilir bir şekilde yapılmasına ve ölçülen sıcaklığa karşılık gelen termodinamik sıcaklığa en yakın şekilde hesaplanabilmesine olanak verecek şekilde formüle edilmiştir. Şimdiye dek kullanılan sıcaklık ölçeklerinin kısa tarihçesi [3] şöyledir;

i. Normal Hidrojen Ölçeği

CIPM'in altıncı toplantısında 1887'de kabul edilmiş ve CGPM tarafından 1889 yılında onaylanmış bu ölçekte sabit noktalar, 0°C buz noktası ve 100°C buhar noktasıdır. Gaz termometresi esas alınarak oluşturulmuş ve civalı cam termometreler kullanılarak bu ölçek diğer laboratuvarlara dağıtılmıştır. O zamanlar bu ölçeğin erimi -25 den 100°C ye kadardı.

ii. ITS-27

ITS-27 pekçok tekrarlanabilir sıcaklıklardan veya belli sıcaklıkları veren sabit noktalardan ve bütün ölçek boyunca farklı bölgelerde kullanılan üç farklı cihazdan oluşur. Platin termometre düşük sıcaklıklarda, %10 rodyum-platin ısıçift orta bölgede ve optik pyrometre de yüksek sıcaklıklarda kullanılır.

Platin termometre için sabit noktalar, buz noktası (0.000°C), oksijen, su ve sülfürün kaynama noktaları (-182.97°C, 100.000°C ve 444.60°C) olarak tanımlanır. Optik pyrometre için ise sabit nokta altın'ın ergime noktası ve kullanılan formül de Wien kanunudur.

iii. ITS-48

Bu yılda Platin direnç termometresinin erimi oksijenin kaynama noktasına değiştirildi ve Platin termometreleri ile ısıçiftin birleşme noktası antimonun donma noktası olarak belirlendi. Altının donma noktası altının ergime noktası olarak değiştirildi ve Wien kanunu yerine de Planck radyasyon kanunu kullanılmaya başlandı.

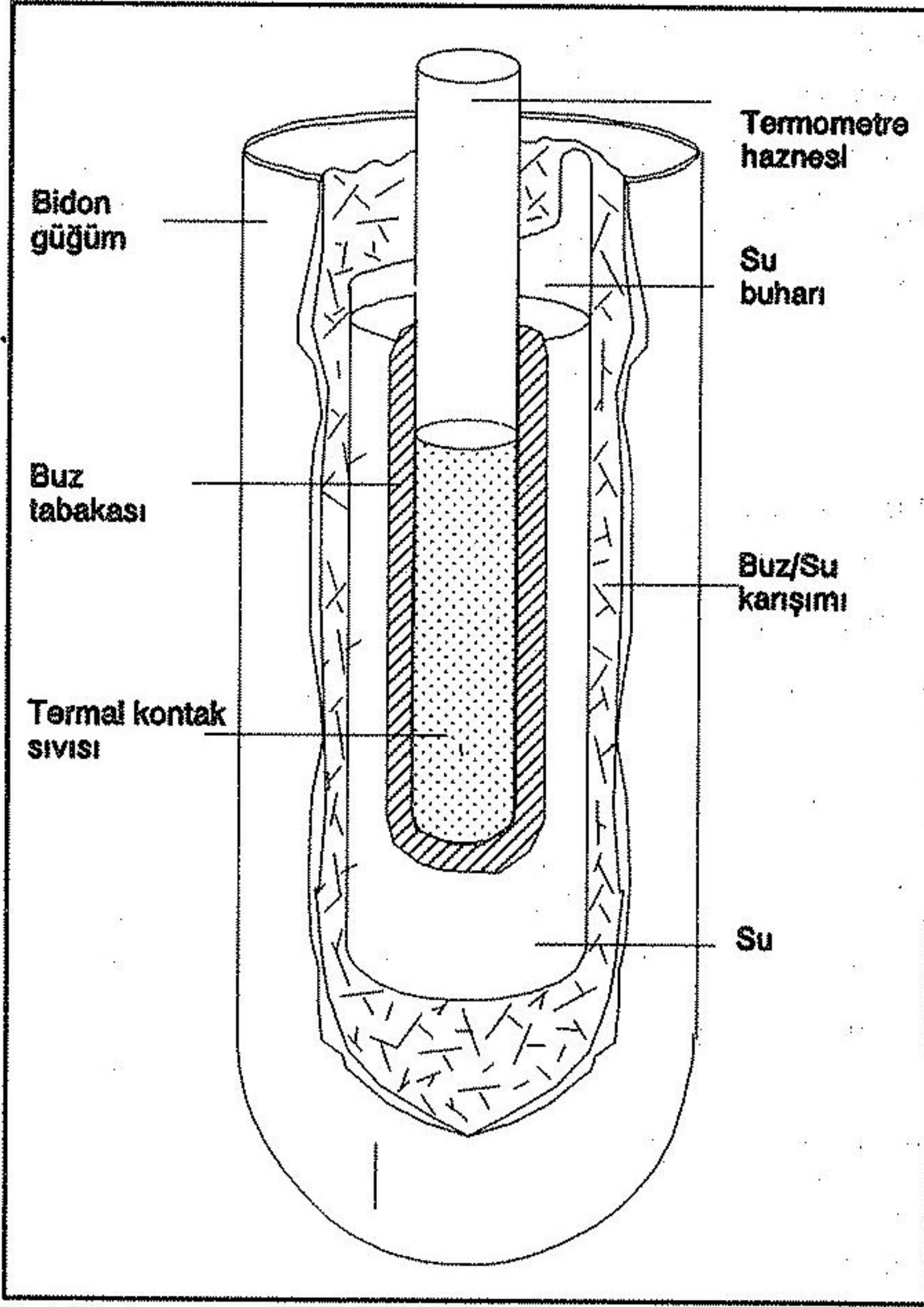
iv. IPTS-48

1960 yılında ITS-48 üzerinde yapılan bir değişiklikle 1954 yılında termodinamik sıcaklık birimi Kelvin'in tek tanımı olarak kabul edilen suyun üçlü noktası (Şekil 1 ve Şekil 2), bu bölgede, kalibrasyon noktası olarak buz noktasının yerine kabul edildi. Çinkonun donma noktası da sülfürün kaynama noktası yerine tercih edildi.

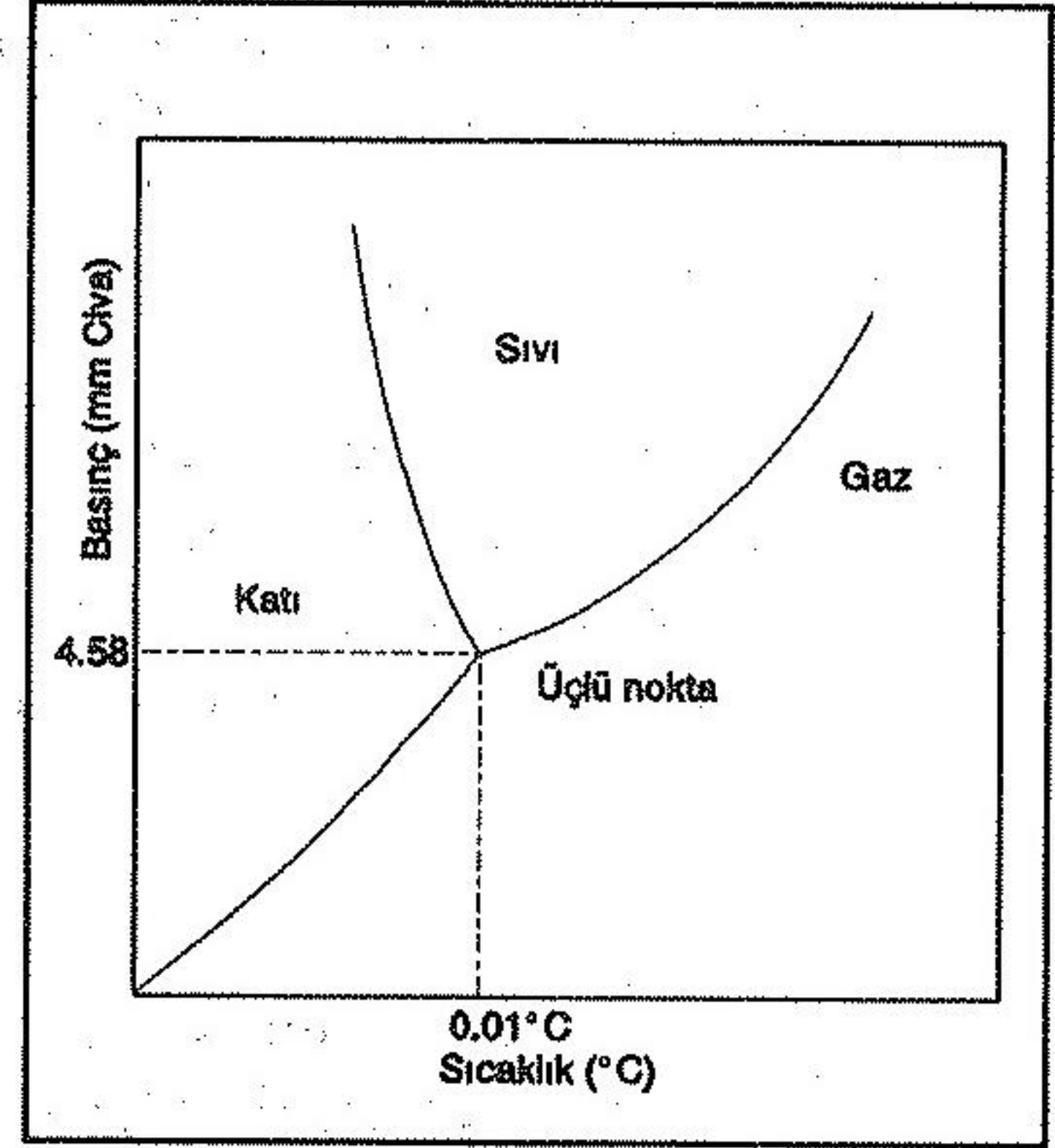
v. IPTS-68

1968 yılında, Uluslararası Pratik Sıcaklık Ölçeği, Comite International des Poids et

Mesures tarafından resmen ilan edildi. Burada ölçülen değerlerin termodinamik değerlerine yaklaştıran pek çok rakamsal değişiklikler yapıldı. Ölçeğin alt limiti 13.81K'e uzatıldı ve altı tane yeni sabit nokta ölçeğe katıldı. Hesaplamalarda kullanılan sabitlerde de değişiklikler yapıldı.



Şekil 1 Suyun üçlü noktası kesiti



Şekil 2 Suyun üçlü noktası faz diyagramı

4. ITS-90

ITS-90, CIPM tarafından CGPM 1987'nin yedinci maddesine koyulan istek üzerine 1989 yılında kabul edildi ve 1990 Ocak ayından itibaren yürürlük kazandı. ITS-90 Ölçeğini detaylarıyla anlatmadan önce kısaca özetlersek;

* 0.65K ve 5K arasında ^3He ve ^4He 'ün gaz-basıncı ve sıcaklık ilişkileri kullanılarak tanımlanır.

* 3.0K ve neonun üçlü noktası (24.5561K) sıcaklık aralığında deneysel olarak gerçekleştirilebilen ve belli sayısal değerler verilen üç sabit noktada kalibre edilmiş helyum gaz termometre ve özel interpolasyon denklemleri kullanılarak tanımlanır.

* Dengedeki hidrojenin üçlü noktası (13.8033K) ve gümüşün donma noktası(1234.93K) sıcaklık aralığında ITS-90, belirli sabit noktalarda kalibre edilmiş platin direnç termometreleri ve özel interpolasyon denklemleri kullanılarak tanımlanmıştır.

* Gümüşün donma noktasının üstündeki sıcaklıklarda ise ITS-90 tanımlayıcı sabit nokta ve Planck radyasyon kanunu kullanılarak tanımlanır.

Sıcaklık Birimleri

1990 Uluslararası Sıcaklık Ölçeği (ITS-90) hem uluslararası Kelvin sıcaklık ölçeğini (T_{90}) hem de uluslararası derece Celcius sıcaklık ölçeğini (t_{90}) tanımlar ve ikisi arasındaki ilişki T ve t arasındaki ilişkinin aynısıdır.

$$t_{90}/^{\circ}\text{C} = T_{90}/\text{K} - 273.15$$

ITS-90 ölçeği T_{90} sıcaklığının tanımlandığı birkaç sıcaklık bölgesi ve alt sıcaklık bölgelerinden oluşur. Bu sıcaklık bölgelerinin bir kısmı bazı bölgelerde çakışır. Farklı bölgelerde farklı eşitlikler kullanıldığı için, bu eşitlikler böyle çakışmalar olunca eşit bir şekilde ele alınır.

0.65K - 5.0K Helyum-buhar basıncı sıcaklık eşitlikleri

Bu sıcaklık aralığında T_{90} , ^3He ve ^4He 'ün p buhar basıncı ve aşağıdaki eşitlik kullanılarak elde edilir.

$$T_{90}/\text{K} = A_0 + \sum_{i=1}^9 A_i [(\ln(p/Pa) - B)/C]^i \quad (1)$$

A_0 , A_i , B ve C katsayıları, 0.65K-3.2K ölçeğinde ^3He için ve 1.25K-2.1768K (λ noktası) aralığında ve 2.1768K-5K aralığında ^4He için verilmiştir.

3.0K - Neonun üçlü noktası (24.5561K): Gaz termometresi

Bu sıcaklık aralığında T_{90} üç farklı sıcaklıkta kalibre edilmiş ^3He veya ^4He sabit hacim tipi gaz termometresi kullanılarak tanımlanır. Sözü edilen üç farklı sıcaklık, neonun üçlü noktası (24.5561K), dengedeki hidrojenin üçlü noktası (13.8033K) ve 3K-5K arasında ^3He ve ^4He gaz basınç termometresi tarafından bir üstteki paragrafta anlatıldığı gibi tanımlıdır.

4.2K - Neonun üçlü noktası (24.5561K): ^4He termometrik gaz olarak kullanılarak

Bu aralıkta T_{90} şu eşitlikle tanımlanır:

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

p gaz termometresinin basıncı ve a , b , c katsayıları bir önceki paragrafta verilen üç farklı sabit noktada ölçümler sonucunda elde edilen katsayılardır.

3.0K - Neonun üçlü noktası (24.5561K): ^3He veya ^4He termometrik gaz olarak kullanılarak

4.2K'den daha düşük sıcaklıklar için kullanılan ^3He veya ^4He gaz termometresi için, bu sıcaklık aralığında T_{90} aşağıdaki eşitlikle tanımlanır.

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

p gaz termometresinin basıncı ve a, b, c tanımlayıcı üç farklı sıcaklıkta ölçümler sonunda elde edilen katsayılarıdır. N/V , N gaz miktarı ve V haznenin hacmi olmak üzere, gaz yoğunluğudur. x kullanılan izotopa göre 3 veya 4 değerini alır.

**Dengedeki hidrojenin üçlü noktası (13.8033K) - Gümüşün donma noktası (1234.93K):
Platin direnç termometresi**

Bu sıcaklık aralığında T_{90} belirleyici belli bir takım sabit noktalar, bu noktalarda kalibre edilmiş platin direnç termometreleri ve ara sıcaklıklarda özel referans interpolasyon fonksiyonları ve sapma fonksiyonları kullanılarak tanımlanır. Hiçbir platin direnç termometresi bu verilen 13.8033K-234.93K sıcaklık aralığında yüksek doğrulukla kullanılamaz. O yüzden bu sıcaklık aralığı belli bir takım alt sıcaklık aralıklarına bölünmüştür. Bir termometrenin bu geniş sıcaklık aralığının alt sıcaklık aralıklarından hangisinde veya hangilerinde kullanılacağı termometrenin yapım şekline bağlıdır.

Sıcaklıklar $R(T_{90})$ direncinin suyun üçlü noktasındaki direncine $R(273.16K)$ oranı olarak belirlenir. Bu oran $W(T_{90})$ olarak gösterilir.

$$W(T_{90}) = R(T_{90})/R(273.16K) \quad (4)$$

Platin direnç termometresi saf, gerilmesiz platinden yapılır. ITS-90 şartlarını sağlaması için

$$W(302.9146K) \geq 1.11807 \quad (5)$$

$$W(234.3156K) \leq 0.844235$$

Gümüşün donma noktası sıcaklığına kadar kullanılacak termometreler ayrıca

$$W(1234.93K) \geq 4.2844 \quad (6)$$

eşitsizliğini de sağlamalıdır.

Herbir termometrik sıcaklık aralığında T_{90} uygun referans fonksiyonlarından ve sapma fonksiyonlarından $W(T_{90}) - W_r(T_{90})$ elde edilir. Belirleyici sabit noktalarda bu sapmalar termometrenin doğrudan kalibrasyonundan elde edilir. Ara sıcaklıklarda ise, uygun sapma fonksiyonları kullanılır.

i. 13.8033K-273.16K sıcaklık aralığında aşağıdaki referans fonksiyonuyla tanımlanmıştır.

$$\ln[W_r(T_{90})] = A_0 \sum_{i=1}^{12} A_i \left[\frac{\ln(T_{90}/273.16K) + 1.5}{1.5} \right]^i \quad (7)$$

Yukarıdaki eşitliğe 0.1mK belirsizlikle yaklaşan ters eşitlik ise

$$T_{90}/273.16K = B_0 + \sum_{i=1}^{15} B_i \left[\frac{W_r(T_{90})^{1/6} - 0.65}{0.35} \right]^i \quad (8)$$

A_0 , A_i , B_0 ve B_i ITS-90 tarafından tablo olarak verilir.

ii. 0°C - 961.78°C sıcaklık aralığında aşağıdaki referans fonksiyonu tanımlanmıştır.

$$W_r(T_{90}) = C_0 + \sum_{i=1}^9 C_i \left[\frac{T_{90}/K - 754.15}{481} \right]^i \quad (9)$$

Yukarıdaki eşitliğe 0.13mK belirsizlikle yaklaşan ters eşitlik ise

$$T_{90}/K - 273.15 = D_0 + \sum_{i=1}^9 D_i \left[\frac{W_r(T_{90}) - 2.64}{1.64} \right]^i \quad (10)$$

C_0 , C_i , D_0 ve D_i ITS-90 tarafından tablo olarak verilir.

Bu sıcaklık aralığında termometre bütün sıcaklık aralığında kalibre edilebildiği gibi, en düşük kalibrasyon noktası 0°C olmak üzere, en yüksek sıcaklık noktası olarak 29.7646°C , 156.5985°C , 231.928°C , 419.527°C , 660.323°C noktalarında da daha az kalibrasyon noktası kullanılarak da kalibre edilebilir.

iii. Termometre 231.3156K - 29.7646°C aralığında bu noktalarda ve suyun üçlü noktasında kalibre edilebilir. Referans fonksiyonları 7, 8, 9, 10 bu aralığı kapsamalıdır.

Dengedeki hidrojenin üçlü noktası (13.8033K)-suyun üçlü noktası (273.16K) aralığı

Bu aralıkta termometre dengedeki hidrojenin (13.8033K), neonun (24.5461K), oksijenin (54.3584K), argonun (83.8058K), civanın (234.3156K) ve suyun üçlü noktası (273.16K) ile artı 17.0K ve 20.3K gibi yakın iki noktada daha kalibre edilir. Bu son iki nokta ya gaz termometresi kullanarak (bu durumda bu iki sıcaklık 16.9K - 17.1K ve 20.2K - 20.4K arasında bulunmalıdır), ya da dengedeki hidrojenin buhar basınç eşitliği kullanarak (bu durumda bu iki sıcaklık 17.025K - 17.045K ve 20.26K - 20.28K arasında bulunmalıdır) aşağıdaki eşitlikler kullanılarak belirlenir.

$$\begin{aligned} T_{90}/K - 17.035 &= (p/\text{kPa} - 33.3213)/13.32 \\ T_{90}/K - 20.27 &= (p/\text{kPa} - 101.292)/30 \end{aligned} \quad (11)$$

ve sapma fonksiyonu

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2 + \sum_{i=1}^5 c_i [\ln W(T_{90})]^{i+n} \quad (12)$$

şeklindedir. a, b, c_i katsayıları tanımlayıcı sabit noktalarda yapılan ölçümlerden elde edilir.

Eğer kalibrasyon argonun üçlü noktası (83.8058K) ve suyun üçlü noktası arasında gerçekleştirilirse, sapma fonksiyonu

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1] \ln W(T_{90}) \quad (13)$$

kullanılır. a,b katsayıları, tanımlayıcı sabit noktalarda yapılan ölçümlerden elde edilir.

0°C Gümüşün donma noktası (961.78°C)

Termometre suyun üçlü noktasında (0.01°C) ile kalayın (231.928°C), çinkonun (419.527°C), alüminyumun (660.323°C) ve gümüşün (961.78°C) donma noktalarında kalibre edilir. Sapma fonksiyonu

$$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2 + c[W(T_{90}) - 1]^3 + d[W(T_{90}) - W(660.323^\circ\text{C})]^2 \quad (14)$$

Alüminyumun donma noktasının altındaki sıcaklıklarda $d=0$ dir. a, b ve c katsayıları kalay, çinko ve alüminyumun donma noktalarında ölçülen W_r değerinden sapmalar, yukarıdaki sapma fonksiyonuna konularak elde edilir. Alüminyumun donma noktasının üstünde a, b ve c katsayıları için yukarıda bulunan değerler saklanır ve d katsayısı alüminyumun donma noktasında W_r değerinden sapma ölçülerek bulunur.

Civanın üçlü noktası (-38.8344°C)-Galyumun ergime noktası (29.7646°C)

Termometre civanın üçlü noktası (-38.8344°C), suyun üçlü noktası (0.01°C) ve galyumun ergime noktasında (29.7646°C) kalibre edilir. Eşitlik 14 ile verilen sapma fonksiyonu kullanılarak a ve b katsayıları bulunur. $c=d=0$ olarak alınır.

Gümüşün donma noktasının (961.78 °C) üstünde: Planck Radyasyon Kanunu

Gümüşün donma noktasının üstünde T_{90} sıcaklığını aşağıdaki eşitlik tanımlar:

$$\frac{L_\lambda(T_{90})}{L_\lambda[T_{90}(X)]} = \frac{\exp(c_2[\lambda T_{90}(X)]^{-1}) - 1}{\exp(c_2[\lambda T_{90}]^{-1}) - 1} \quad (15)$$

$T_{90}(X)$, gümüşün $_{90}(\text{Ag})=1234.93\text{K}$ veya altının $_{90}(\text{Au})=1337.33\text{K}$ veya bakırın $_{90}(\text{Cu})=1357.77\text{K}$ donma noktalarından herhangi biri olabilir. $L_\lambda(T_{90})$ ve $L_\lambda[T_{90}(X)]$ siyah cismin vakumda, λ dalgaboyunda ve T_{90} ile $T_{90}(X)$ sıcaklıklarındaki ışınımının spektral yoğunluğudur, $c_2=0.014388\text{Km}$ dir.

ITS-90 ölçeğinde belirlenen sabit noktalar Şekil 3'de, ITS-90 sabit noktalarıyla beraber bu noktaların gerçekleştirildiği maddeler, maddenin hangi durumu için geçerli olduğu ve bu noktaların referans (W_r) değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. ITS-90 Skalasını oluşturan sabit noktalar.

Numara	Sıcaklık		Madde ¹	Durum ²	W _r (T ₉₀)
	T ₉₀ /K	t ₉₀ /°C			
1	3 - 5	-270.15 -268.15	He	vp	
2	13.8033	-259.3467	e-H ₂	tp	0.001 19007
3	≈ 17.035	≈ -	e-H ₂	vp	(0.002 296 46) ³
	256.15		(veya He)	(veya gp)	
4			e-H ₂	vp	(0.004 235 36) ³
	≈ 20.27	≈ -252.88	(veya He)	(veya gp)	
5			Ne	tp	0.008 449 74
6	24.5561	-248.5939	O ₂	tp	0.091 718 04
7	54.3584	-218.7916	Ar	tp	0.215 859 75
8	83.8058	-189.3442	Hg	tp	0.844 142 11
9	234.3156	-38.8344	H ₂ O	tp	1.000 000 00
10	273.16	0.01	Ga	mp	1.118 138 89
11	302.9146	29.7646	In	fp	1.609 801 85
12	429.7485	156.5985	Sn	fp	1.892 797 68
13	505.078	231.928	Zn	fp	2.568 917 30
14	692.677	419.527	Al	fp	3.376 008 60
15	933.473	660.323	Ag	fp	4.286 420 53
16	1234.93	961.78	Au	fp	
17	1337.33	1064.18	Cu	fp	
	1357.77	1084.62			

5. Planck radyasyon kanunu kullanılarak UME'de yapılan yüksek sıcaklık ölçümleri

UME'de Planck radyasyon kanunu esasına dayalı sıcaklık ölçümlerinin OMA (Optical Multichannel Analyser) kullanılarak yapılabilme olasılığı araştırılmaktadır. Bu amaçla, UME'de bulunan PR-650 OMA sistemi kullanılır. Bu cihaz, ışık kaynağından gelen ışığı, dalga boylarına ayırarak bir dedektör array sistemi üzerine düşürür. Yani kaynağın siyah cisim spektrumunu alır. Ölçülen bu spektrum teorik siyah cisim spektrumu ile eşleştirilerek, kaynağın sıcaklığı bulunur.

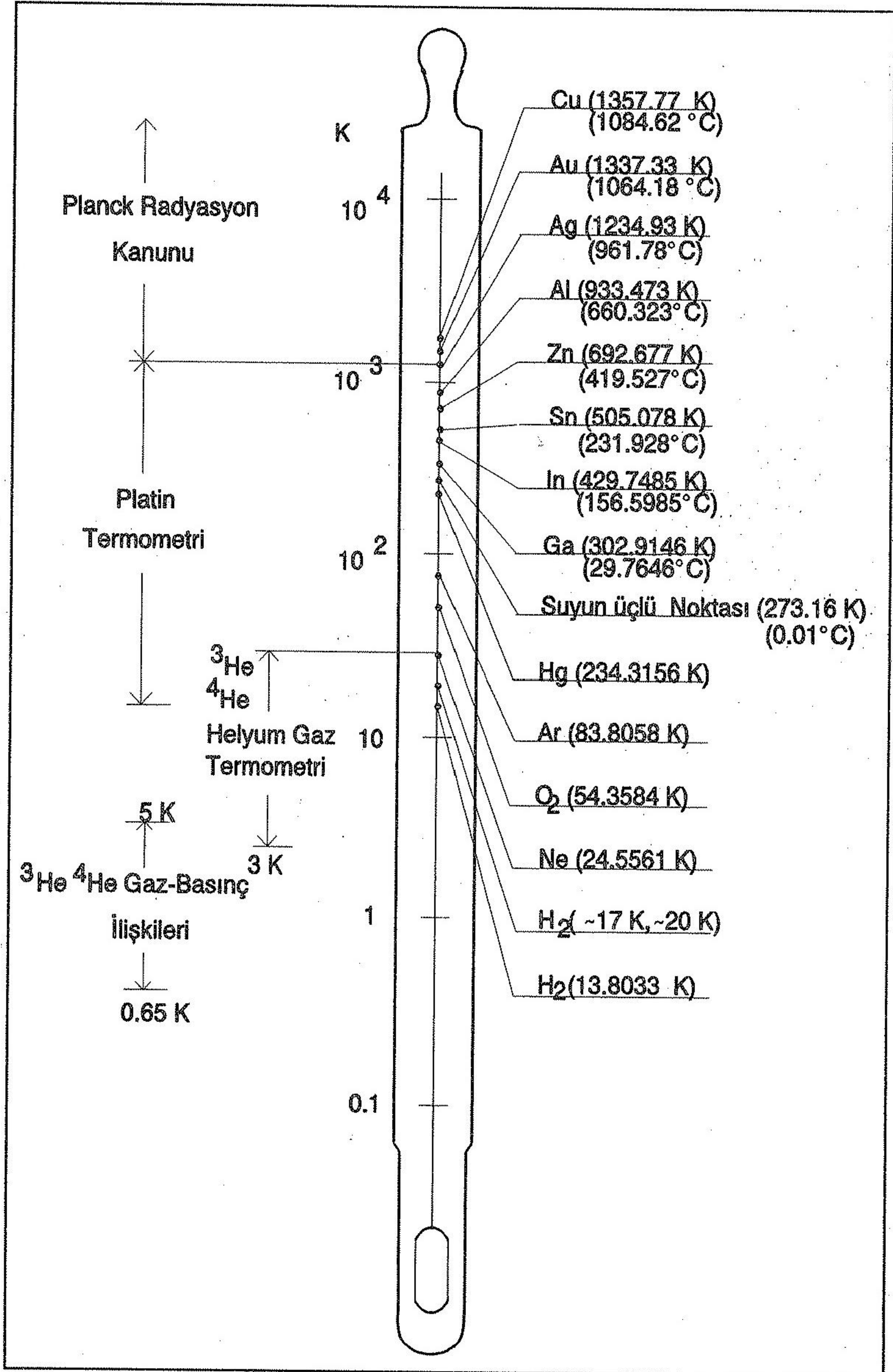
PR-650 OMA ile alınan ölçümler Şekil 3'te gösterilmiştir. Burada bir yüksek sıcaklık fırınının siyah cisim spektrumuna bakılarak sıcaklığı bulunmuştur.

Şekil 5'de ise siyah cisim ışımalarının duyarlılığı gösterilmiştir.

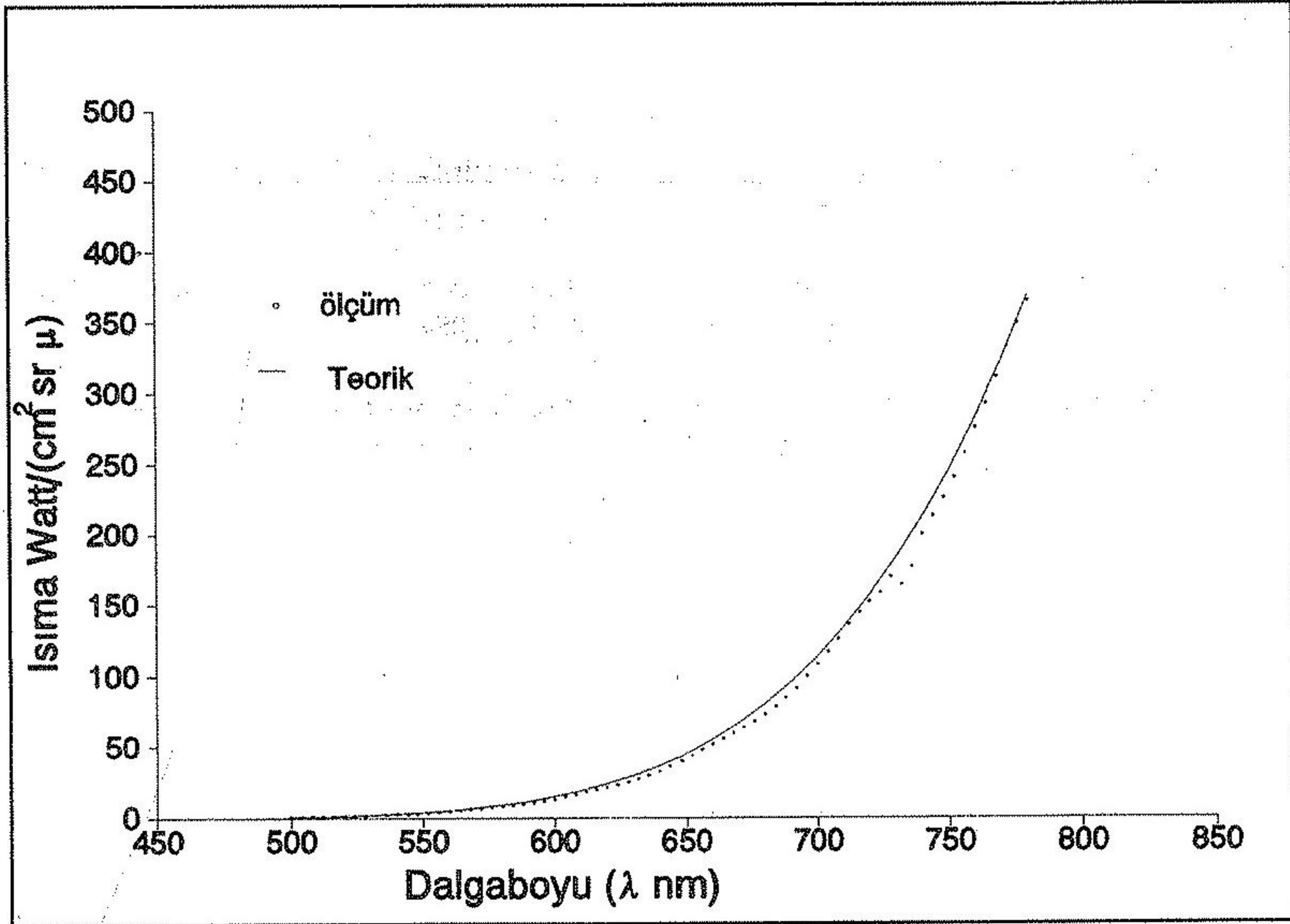
¹ Helyum dışındaki tüm maddeler doğal isotopik kompozisyonundadır. e-H₂ denge yoğunluktaki ortho- ve para-moleküler şeklindeki hidrojenidir.

² vp: Buhar basınç noktası, tp: Üçlü nokta (maddenin katı, sıvı ve gaz hallerinin dengeli durumunda bulunduğu sıcaklık), gp: Gaz termometresi noktası, mp,fp: Ergime noktası, donma noktası (101 325 Pa daki maddenin katı ve sıvı hallerinin dengede bulunduğu sıcaklık)

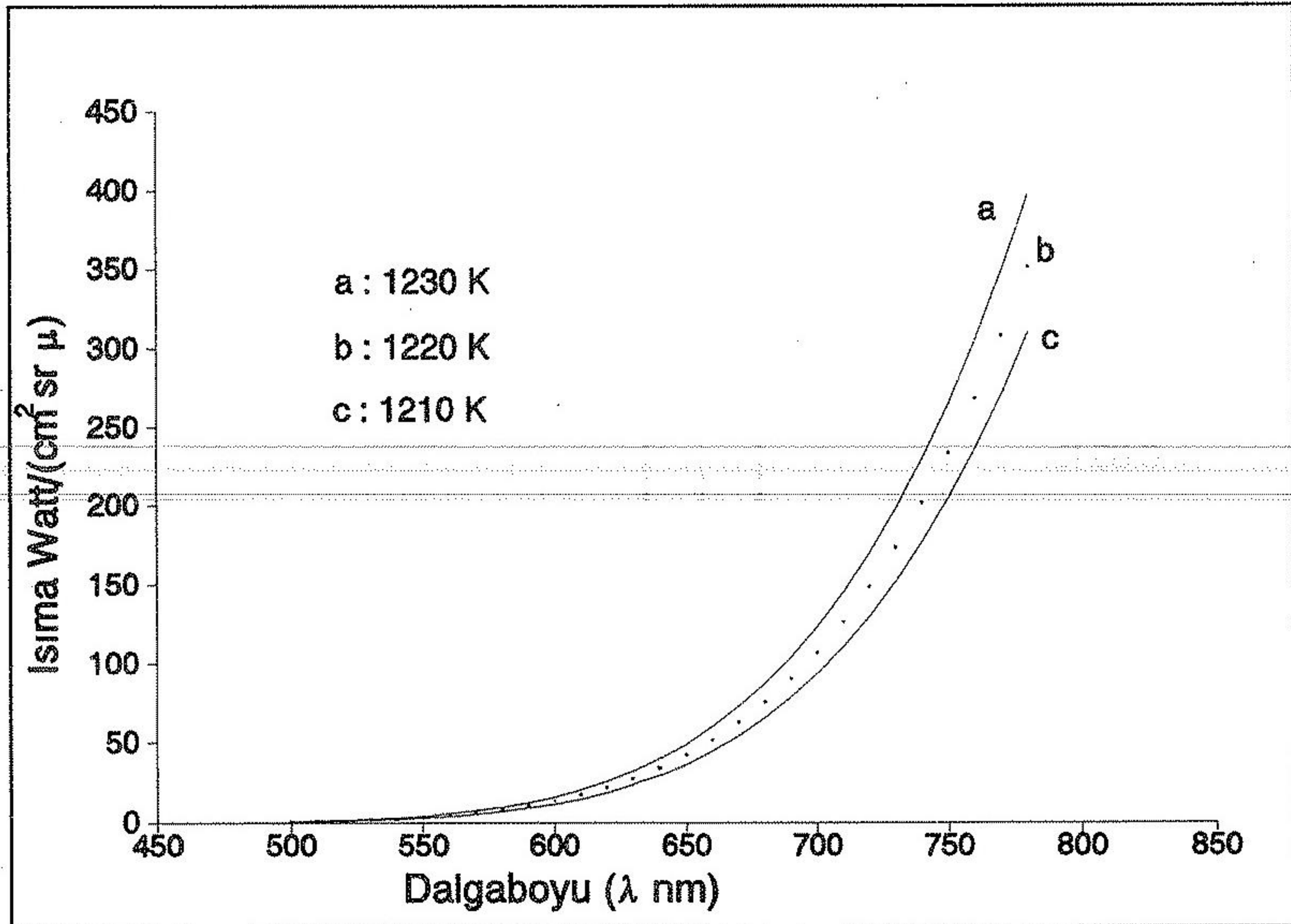
³ 3 no'lu sabit noktaya ait değer, T₉₀=17.035 K ve 4 no'lu sabit noktaya ait değer T₉₀=20.27 K de hesaplanmıştır



Şekil 3 Uluslararası Sıcaklık Ölçeği ITS-90



Şekil 4. OMA ile alınmış bir fırının ısıma verilerinin (... çizgi) Siyah cisim spektrumuna uydurularak (1224K) sıcaklığının bulunması (— çizgi).



Şekil 5 Siyah cisim spektrumuyla sıcaklık ölçümlerinin duyarlılığı

Kaynaklar

1. Benedict Robert P. **Fundamental of Temperature, Pressure, and Flow Measurements, John Wiley & sons New york, 1984**
2. Preston-Thomas, H. **The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), Metrologia 27, 3-10 and 107, 1990**
3. Preston Thomas, H., Quinn, T.J., **Supplementarty information for the international tempereture scale of 1990, Bureau International des Poids et Measures**