

TENSIÓN SUPERFICIAL

I. INTRODUCCIÓN

Suele definirse una fase como cualquier parte homogénea de un sistema, rodeada por una frontera y mecánicamente separable de las otras partes del sistema. Se cumple que las propiedades de un sistema en equilibrio tienen el mismo valor en cada punto de una misma fase. También se cumple que las fuerzas de las interacciones intermoleculares sobre una molécula dada son de igual magnitud en cualquier dirección, por lo que la fuerza resultante es cero. Estas fuerzas son de carácter electrostático, del tipo de las fuerzas de van der Waals, interacciones ion-ion, ion-dipolo y dipolo-dipolo, entre otras.

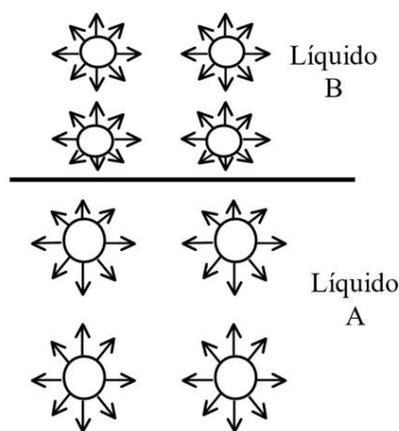


Figura 1. Esquema de la situación de las moléculas en una interfase líquido-líquido con respecto a las moléculas alejadas de la interfase

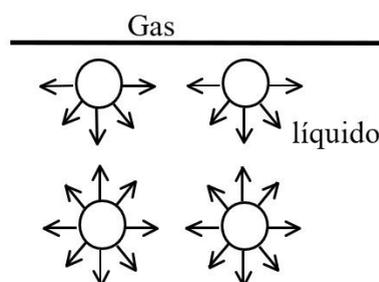


Figura 2. Esquema de la situación de las moléculas en la interfase sólido-gas con respecto a las moléculas en el seno de un líquido

Cuando se tienen dos fases en contacto, se origina una zona de separación entre ambas que se denomina interfase.

Como las moléculas en esta zona se ven afectadas por interacciones con moléculas de la fase vecina, el balance de fuerzas sobre éstas no conduce a una resultante cero, y la situación energética de estas moléculas es diferente a la de las moléculas en el seno de la fase en cuestión.

En la Figura 1 se muestran las atracciones de diferente intensidad en las cercanías de la interfase, en el caso particular de una interfase líquido-líquido. En sistemas líquido-gas (Figura 2), las interacciones entre moléculas de líquido y moléculas de gas, pueden considerarse despreciables frente a las interacciones entre moléculas en la fase líquida, por lo que los efectos observados son aún mayores. En sistemas que involucran sólidos, las interacciones entre moléculas de dos fases pueden llegar a presentar fuerzas con magnitudes del orden de las observadas en el enlace covalente.

El espesor de la interfase es pequeño, del orden de 1 nm, por lo que, para una gran cantidad de estudios de sistemas heterogéneos, no es necesario tener en cuenta la variación de propiedades mencionada, y se puede considerar la frontera entre las fases

como una superficie de espesor nulo. Para estas superficies (bidimensionales), la literatura especializada reserva la palabra interfaz, para distinguirla de la zona (tridimensional) que fue definida como interfase.

I.1. Concepto de tensión superficial

De lo tratado en el punto anterior, se puede concluir que para trasladar moléculas desde el seno de una fase hasta una interfase en un sistema heterogéneo se debe aplicar una fuerza. Si se llama Δx a la distancia entre la posición inicial de la molécula y la interfase, la fuerza aplicada se puede relacionar con el trabajo realizado para realizar la traslación según:

$$W = F\Delta x \quad (1)$$

El hecho de llevar moléculas del seno del líquido hasta la superficie (interfase líquidogás), produce un aumento del área (A) de la interfase porque aumenta el número de moléculas en ésta. La tensión superficial (γ) se define como la relación entre el trabajo (W) realizado y el incremento de área interfacial producido (ΔA):

$$\gamma = \frac{W}{\Delta A} \quad (2)$$

Para ilustrar mejor el concepto de tensión superficial, los textos suelen recurrir al siguiente experimento clásico:

Si se tiene una película de un líquido sustentada en un dispositivo formado por un bastidor de alambre con uno de sus extremos móvil (ver Figura 3), se puede aumentar levemente el área de la película (ΔA), desplazando el lado móvil una distancia Δx . El área superficial aumenta a expensas de algunas moléculas del seno del líquido que migran hacia el exterior. Para lograrlo se debe suministrar energía al sistema a expensas del trabajo realizado por la fuerza F responsable del movimiento del alambre móvil.

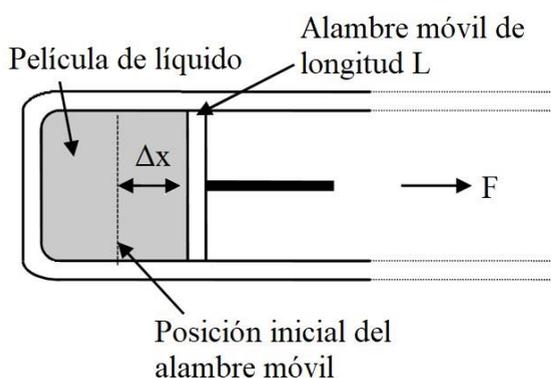


Figura 3

El trabajo realizado está dado por la ecuación 1:

$$W = F\Delta x \quad (1)$$

El incremento del área interfacial, teniendo en cuenta que la película tiene dos caras, viene dado por:

$$\Delta A = 2L\Delta x \quad (3)$$

Teniendo en cuenta la definición de tensión superficial (ec. 2) y las expresiones para W (ec. 1) y ΔA (ec. 3) la tensión superficial queda dada por la ecuación:

$$\gamma = \frac{F}{2L} \quad (4)$$

En el SI, la unidad de la tensión superficial es el newton por metro (N m^{-1}), equivalente a Joule por metro cuadrado (J m^{-2}).

El término tensión superficial se reserva para interfases líquido-gas. En otras interfases se utiliza preferentemente el término tensión interfacial.

1.2. Ecuación de Young - Laplace

Como normalmente el trabajo que hay que realizar para aumentar el área de una superficie interfacial es positivo, el sistema tiende a adoptar una configuración en la que presente un área superficial mínima para realizar el menor trabajo posible. Así, una gota aislada de líquido es esférica, ya que la esfera es la forma tridimensional con menor relación superficie/volumen. Cuando en una interfase curva las fuerzas que producen un aumento de la superficie se igualan con aquellas que se oponen a este aumento se llega a una situación de equilibrio mecánico.

Primero Young y luego Laplace propusieron ecuaciones que describen las condiciones de equilibrio mecánico para una superficie curva entre dos fases. En la Figura 4 se muestra una superficie esférica de radio r que separa dos fases a y b. La relación entre las presiones en cada fase, P^a y P^b , se vincula con la tensión superficial y el radio de la esfera según la ecuación de Young-Laplace:

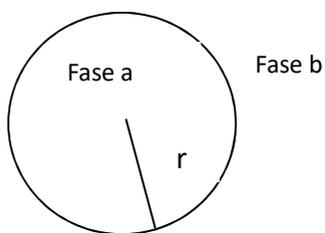


Figura 4

$$P^a - P^b = \frac{2\gamma}{r} \quad (5)$$

Según esta ecuación, las presiones de cada lado de una interfase curva son diferentes; en particular la presión del lado cóncavo es menor que la del lado convexo. Asimismo, se deduce que en superficies planas ($r \rightarrow \infty$) ambas presiones son iguales.

Por último, la tensión superficial y las interacciones interfaciales explican varios fenómenos ampliamente conocidos: la forma del menisco de un líquido, la fuerza que une dos placas mojadas por un líquido, la forma de las gotas de agua o de mercurio sobre una superficie de vidrio, etc.

1.3. Agentes tensoactivos

Existen sustancias que disminuyen la tensión superficial de los líquidos; ellas se conocen como Agentes tensoactivos o sustancias Surfactantes. En el caso de que una de las fases sea agua, las moléculas cuya estructura posea una parte hidrófoba y una parte hidrófila, se ubican en la superficie del agua, con la parte hidrófoba orientada hacia la otra fase y la hidrófila interpuesta entre las moléculas superficiales de agua, con lo que disminuyen las fuerzas intermoleculares del agua y por lo tanto disminuye también la tensión superficial.

La disolución de muy pequeñas cantidades de agentes tensoactivos (menores al 0,5 % en peso) hacen descender marcadamente la tensión superficial del solvente. Las sustancias tensoactivas más utilizadas son los jabones y los detergentes.

Los agentes tensoactivos han encontrado aplicación práctica como agentes humectantes, dispersantes, defloculantes, detergentes, emulsificadores, suspensores y solubilizantes. Cualquier tensoactivo presenta todas estas propiedades en algún grado, pero, en general, domina una de ellas sobre las demás, lo cual hace que se restrinja el empleo de cada agente a una aplicación determinada.

1.4. Concentración micelar crítica

Un ejemplo de tensoactivo es el dodecilsulfato de sodio (SDS). Las propiedades físicas de una disolución de un coloide electrolítico, como el SDS, dependen de su concentración, alterándose de forma brusca cuando ésta alcanza un determinado valor. Esta concentración es conocida como la concentración micelar crítica, o CMC. La explicación de este hecho consiste en que, en concentraciones cercanas a la CMC, los electrolitos de cadena larga (en este caso, el ion dodecilsulfato) empiezan a agregarse. Al unirse en grupos de aproximadamente cien unidades, forman esferas, con las cargas unidas en la periferia y la cadena hidrocarbonada en el interior.

La explicación del fenómeno a nivel molecular se puede resumir diciendo que en la zona de CMC se alcanza el equilibrio entre el anfifilo en su forma de monómero y un agregado multimolecular denominado micela.

Una micela es una estructura formada por agregación de varios monómeros de anfifilo de tal forma en que se satisfacen las interacciones hidrofílicas y el efecto hidrofóbico de tal forma que la micela reduce el área de contacto de las zonas no polares del anfifilo con la fase acuosa mientras que al mismo tiempo permanecen solvatados los grupos hidrofílicos. La CMC se puede medir en una gráfica de cualquier propiedad de la solución en función de su concentración como un cambio evidente en la pendiente, como se muestra en la Figura 5.

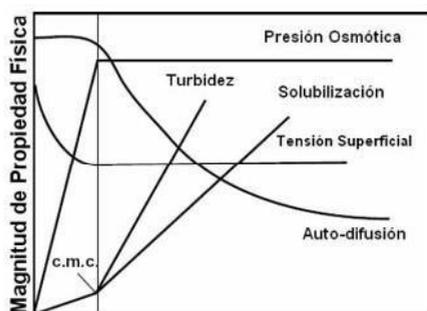


Figura 5

Debajo de la CMC, la adición de surfactante a una solución acuosa causa un incremento en el número de portadores de carga (Na^+ acuoso y $\text{OSO}_3\text{C}_{12}\text{H}_{25}^-$ acuoso) y consecuentemente un incremento en la conductividad. Por encima de la CMC futuras adiciones de surfactante incrementan la concentración micelar mientras que la concentración de monómeros permanece aproximadamente constante (muy cerca de la CMC).

Método conductimétrico

El método conductimétrico consiste en medir la conductividad (σ) de disoluciones que contienen distinta concentración de tensoactivo (TA). La representación de los datos de σ vs. [TA] es una curva cuyas pendientes, antes y después de la CMC, son diferentes. El cambio de pendiente ocurre a la concentración de tensoactivo a la que comienza la

formación de micelas, por lo que la CMC se determina como la intersección de las dos rectas antes y después del cambio.

Debido a que una micela es mucho mayor que un monómero de SDS, ésta se difunde con mayor lentitud a través de la solución y por ende es menos eficiente portador de carga. En la Figura 6 se muestra la gráfica conductividad vs. concentración de surfactante indicando la CMC.

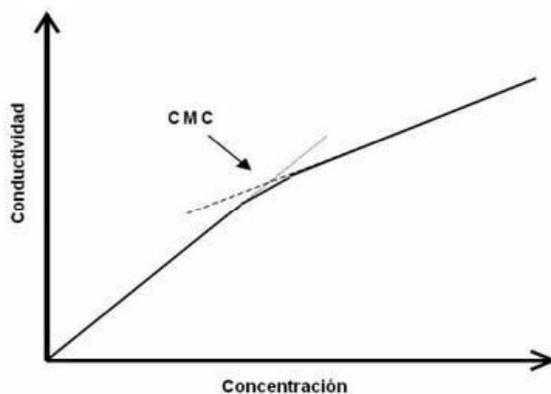


Figura 6

GUÍA DE PRÁCTICO

II. OBJETIVOS DEL PRÁCTICO

Comprender el concepto de tensión superficial.

Estudiar diferentes interfaces líquido-líquido.

Determinar la concentración micelar crítica del SDS.

III. EQUIPOS Y MATERIALES

- Tubos de ensayo con tapa de rosca, conteniendo:
 - Agua y mercurio
 - Agua y hexano
 - Agua e isobutanol
 - Soluciones acuosas de detergente de distinta concentración y mercurio
 - Soluciones acuosas de detergente de distinta concentración e isobutanol
 - Soluciones acuosas de cloruro de sodio de distinta concentración e isobutanol
- Agua destilada
- Solución de dodecilsulfato de sodio (SDS)
- Conductímetro
- Agitador magnético
- Vasos de Bohemia
- Pipetas aforadas de 100, 20 y 5 mL

VI. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

VI.1. Interfase líquido-líquido

1. Observar los tubos que contienen las sustancias puras, anotar las características de cada fase y de la interfase en cuanto a nitidez, turbidez, etc.
2. Agitar los sistemas y observar nuevamente, teniendo en cuenta esta vez el tiempo que demoran las fases en separarse.
3. Explicar lo observado.
4. Establecer relaciones entre sus observaciones y los valores de tensión superficial de las tablas.
5. Proceder igual que en los puntos anteriores, pero con los tubos que contienen las soluciones de detergente o sal.

VI.2. Determinación de la concentración micelar crítica

1. Calibrar el conductímetro con una solución de KCl 0,01 mol L⁻¹.
2. En un vaso de Bohemia, colocado sobre un agitador magnético, agregar 200 mL de agua destilada y medir su conductividad.
3. Agregar 20,00 mL de la disolución de SDS al agua destilada, homogeneizar y medir la conductividad.
4. Realizar el paso anterior 10 veces más, pero agregando 5,00 mL de la disolución de SDS.

VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Realizar un gráfico como el de la Figura 6 y obtener la concentración micelar crítica. Se recomienda ver el video [Gráficos de dispersión en OpenOffice Calc](#), donde se ejemplifica con la ley de Boyle la realización de gráficos en la computadora.



Discutir los valores hallados y compararlos con datos obtenidos de bibliografía.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Castellan G. W.; Fisicoquímica, 2ª. Ed. en español, Addison-Wesley Iberoamericana, EE.UU., 1987.
- Díaz Peña M, Roig Muntaner A; Química Física, Vol. I, 1ª. Ed., Editorial Alhambra, España, 1972.
- Moore W. J.; Fisicoquímica Básica, Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A., México, 1986.
- Cátedra de Física, Curso de Física 103 para Ing. de Alimentos. Práctica 11: Tensión Superficial, Módulo II, 2001.

- Remington J.; Farmacia Tomo I, 19a. Ed., Editorial Médica Panamericana, Argentina, 1998.
- Washburn, E. W.; International critical tables of numerical data, physics, chemistry and technology, McGraw-Hill, Nueva York, 1933.

IX. ANEXO: TABLAS DE TENSIÓN SUPERFICIAL

Fracción másica de SDS (%)	Tensión superficial (mN m ⁻¹)
0,00	72,00
0,01	70,00
0,05	63,70
0,10	55,25
0,12	52,45
0,14	50,20
0,16	47,35
0,18	45,00
0,20	43,60
0,21	42,30
0,22	41,40
0,23	40,40
0,24	39,55
0,25	39,45
0,26	39,40
0,27	39,30
0,28	39,30
0,29	39,30
0,30	39,30

Tensión superficial de soluciones acuosas de SDS de distintas concentraciones, determinadas a 25 °C. Extraído de Samin, 2017.

INTERFACIAL TENSION FOR SOLID-LIQUID AND LIQUID-LIQUID INTERFACES

T. FRASER YOUNG AND WILLIAM D. HARKINS

CONTENTS

	PAGE		PAGE
Solid—liquid.....	436	Effect of H-ion concentration.....	438
Liquid—liquid.....		Metallic liquid—non-metallic liquid.....	438
Water—organic liquid.....	436	Organic liquid—organic liquid.....	439
Aqueous solution—organic liquid.....	437	Effect of pressure.....	439

INTERFACE, SOLID—LIQUID

Free surface energy at the interface solid—liquid

No method has as yet been discovered for the determination of the free interfacial energy between a solid and a liquid. For values calculated from the Ostwald-Freundlich equation, *v.* (5, 25). See further (1, 2, 7, 9, 25, 26, 34).

INTERFACE, LIQUID—LIQUID

Abbreviations; see also p. 433

 γ_i Interfacial tension, cgs. γ Surface tension of organic liquid, cgs. d_p (resp. d_o and d_w) Density of pure organic liquid (resp. the organic phase, and the aqueous phase), g/cm³.

Except where otherwise noted all values recorded below were obtained by the drop-weight method.

Accuracy.—No attempt has been made to estimate accuracy except in cases where independent determinations with different samples are available. The attainable precision by the drop-weight method appears to be about 0.1% at a water interface and 1% at a mercury interface. Other methods have thus far yielded considerably less accurate results.

The interfacial tension at the phase boundary liquid—liquid is in general varied much more by impurities than the surface tension at the liquid—gas interface. It is not yet known how well the drop-weight method applies to the determination of γ_i at the liquid—liquid interface since the corrections were determined under the somewhat different conditions existing at the liquid—gas interface.

Interface, Water—Organic Liquid: C-Table, The C-Arrangement

Formula	Name	γ_i	γ (air)	d_p	d_o	d_w	$t, ^\circ\text{C}$	Lit.
CCl ₄	Carbon tetrachloride*	45.0 ± 1.0	26.66	1.590	1.5846	0.9972	20	(12)
CS ₂	Carbon disulfide.....	48.36	31.38	1.261	1.2596	0.9972	20	(12)
CHBr ₃	Bromoform.....	40.85	41.53	2.8854	2.8818	1.0004	20	(16)
CHCl ₃	Chloroform.....	32.80 ± 0.2	27.13	1.485	1.4831	1.0002	20	(12, 19)
CH ₂ Cl ₂	Methylene chloride.....	28.31	26.52	1.3478	1.3286	1.0018	20	(12)
CH ₂ I ₂	Methylene iodide.....	48.50	50.76	3.3190	3.3180	0.99908	20	(16)
CH ₃ NO ₂	Nitromethane.....	9.66	36.82	1.1385	1.1288	1.0184	20	(12)
C ₂ Cl ₄	Tetrachloroethylene.....	47.48	31.74	1.6216	1.6219	0.99844	20	(16)
C ₂ H ₂ Br ₄	Acetylene tetrabromide.....	38.82	49.67	2.9620	2.9588	0.9986	20	(12)
C ₂ H ₄ Br ₂	Ethylene dibromide*.....	36.54	38.71	2.178	2.1773	0.9991	20	(12)
C ₂ H ₅ Br	Ethyl bromide.....	31.20	24.16	1.441	1.4460	1.0001	20	(12)
C ₂ H ₅ I	Ethyl iodide.....	40.0	29.9				16	(8, 10)
C ₂ H ₆ S	Ethylmercaptan.....	26.12	21.82			0.9982	20	(12)
C ₃ H ₄ Cl ₂ O	1, 1-Dichloroacetone.....	14.43	31.91	1.236		1.0170	20	(12)
C ₃ H ₅ Br ₃	1, 2, 3-Tribromopropane.....	38.50	45.36	2.4171	2.4152	0.99892	20	(16)
C ₃ H ₅ ClO	Chloroacetone.....	7.11	35.27	1.170	1.1581	1.0029	20	(12)
C ₄ H ₇ N	Butyronitrile.....	10.38	28.06	0.79040	0.99426	0.99201	20	(12)
C ₄ H ₈ Cl ₂ S	β, β' -Dichloroethyl sulfide.....	28.36	42.82	1.2732			20	(14)
C ₄ H ₉ Cl	Isobutyl chloride.....	24.43	21.94	0.8754	0.8766	0.9973	20	(12)
C ₄ H ₉ Cl	tert.-Butyl chloride.....	23.75	19.59	0.8422	0.8423	0.9990	20	(12)
C ₄ H ₁₀ O	Isobutyl alcohol.....	2.1			0.8424	0.9834	18	(1.5)
C ₄ H ₁₀ O	Ethyl ether.....	10.70 ± 0.2	17.10		0.7174	0.9868	20	(12)
C ₅ H ₉ N	Isovaleronitrile.....	14.14	26.03	0.79106	0.79294	0.99622	20	(12)
C ₅ H ₁₀	Trimethylethylene.....	36.69	17.26				20	(12)
C ₅ H ₁₀ O	Methyl propyl ketone.....	6.28	24.15	0.8067	0.8125	0.9897	20	(12)
C ₅ H ₁₀ O ₂	Isovaleric acid.....	2.73	25.33	0.9295	0.9457	0.9998	20	(12)
C ₅ H ₁₀ O ₂	Diethyl carbonate.....	12.86	26.31		0.97513	0.99905	20	(12)
C ₅ H ₁₁ Cl	Isoamyl chloride.....	15.44	23.48	0.86962	0.87146	0.9955	20	(12)
C ₅ H ₁₂	Isopentane.....	49.64	13.72	0.6200	0.6198	0.9982	20	(12)
C ₅ H ₁₂ O	Amyl alcohol (inactive mixt.) (I).....	4.9 ± 2.0			0.804		30	(33)
C ₅ H ₁₂ O	Isoamyl alcohol.....	5.0			0.8291	0.9952	18	(1.5)
C ₆ H ₅ Br	Bromobenzene.....	39.82	36.26	1.5016	1.5013	0.99862	20	(16)
C ₆ H ₅ Cl	Chlorobenzene.....	37.41	33.08	1.053	1.1047	0.9972	20	(12)
C ₆ H ₅ I	Iodobenzene.....	45.67	40.35				16.8	(8, 10, 16)
		41.84	39.70	1.8258	1.8255	0.99832	20	
C ₆ H ₅ NO ₂	Nitrobenzene.....	25.66	43.38		1.2012	0.9976	20	(12)
C ₆ H ₆	Benzene*.....	35.00 ± 0.05	28.86		0.8788	0.9980	20	(10, 11, 12, 13, 22)
C ₆ H ₇ N	Aniline.....	5.77	42.58	1.022	1.216	0.9990	20	(12)
C ₆ H ₁₂ O	Cyclohexanol.....	3.92	34.23				16.2	(8, 10)
C ₆ H ₁₂ O	Ethyl propyl ketone.....	13.58	25.39	0.8152	0.8152	0.9964	20	(12)

Formula	Name	γ_i	γ (air)	d_p	d_o	d_w	$t, ^\circ\text{C}$	Lit.
C ₆ H ₁₂ O	Methyl butyl ketone.....	9.73	25.49	0.8124	0.8160	0.9956	20	(12)
C ₆ H ₁₂ O	Methyl <i>tert.</i> -butyl ketone.....	10.81	23.43	0.8055	0.8090	0.9954	20	(12)
C ₆ H ₁₄	<i>n</i> -Hexane*.....	51.10 ± 0.2	18.43	0.6595	0.6597	0.9972	20	(12)
C ₆ H ₁₅ N	Dipropylamine.....	1.66	22.54	0.73853	0.81620	0.98844	20	(12)
C ₇ H ₅ NS	Phenyl isothiocyanate.....	39.04	41.44	1.1326	1.1331	0.99795	20	(16)
C ₇ H ₆ O	Benzaldehyde.....	15.51	40.04	1.0504	1.0445	0.9981	20	(12)
C ₇ H ₇ Br	<i>o</i> -Bromotoluene.....	41.15	35.85	1.4218	1.4318	0.99823	20	(16)
C ₇ H ₇ NO ₂	<i>o</i> -Nitrotoluene.....	27.19	41.46	1.168	1.1599	0.9972	20	(12)
C ₇ H ₇ NO ₂	<i>m</i> -Nitrotoluene.....	27.68	40.99	1.168	1.1547	0.9971	20	(12)
C ₇ H ₈	Toluene.....	36.1					25	(37)
C ₇ H ₈ O	Anisole.....	25.82	35.22	0.99327	0.99270	0.99715	20	(12)
C ₇ H ₈ O	Benzyl alcohol.....	4.75	39.71				22.5	(8, 10)
C ₇ H ₁₄ O ₂	Heptylic acid*.....	7.00 ± 0.5	28.31				20	(11, 12)
C ₇ H ₁₄ O ₂	Ethyl isovalerate.....	18.39	23.68	0.8648	0.8658	0.9971	20	(12)
C ₈ H ₈	Styrene.....	35.48	32.14				19.0	(8, 10)
C ₈ H ₁₀	Ethylbenzene.....	31.35	29.62				17.5	(8, 10)
C ₈ H ₁₀	<i>o</i> -Xylene.....	36.06	29.89	0.87810	0.87806	0.99707	20	(12)
C ₈ H ₁₀	<i>p</i> -Xylene.....	37.77	28.33	0.86444	0.86494	0.99680	20	(12)
C ₈ H ₁₀ O	Phenetole.....	29.40	32.74	0.96474	0.96474	0.99820	20	(12)
C ₈ H ₁₆ O	Methyl hexyl ketone.....	14.09	26.79	0.8192	0.8205	0.9980	20	(12)
C ₈ H ₁₆ O ₂	Caprylic acid.....	8.217	28.82				18.1	(8, 10)
C ₈ H ₁₆ O ₂	Ethyl caproate*.....	19.80 ± 2	25.81		0.8705	0.9978	20	(19)
C ₈ H ₁₈	<i>n</i> -Octane*.....	50.81 ± 0.1	21.77	0.7022	0.7021	0.9971	20	(12)
C ₈ H ₁₈ O	<i>n</i> -Octyl alcohol*.....	8.52 ± 0.2	27.53	0.8252	0.8301	0.9981	20	(12)
C ₈ H ₁₈ O	Methylhexyl carbinol.....	9.42 ± 0.2	26.52	0.8211	0.8257	0.9974	20	(12)
C ₈ H ₁₉ N	Diisobutylamine.....	10.28	22.05	0.74428	0.74763	0.99680	20	(12)
C ₉ H ₁₂	Mesitylene.....	38.70	28.51	0.86124	0.86140	0.99717	20	(12)
C ₉ H ₁₈ O ₂	Isoamyl butyrate.....	23.00	25.19	0.86272	0.86280	0.99672	20	(12)
C ₁₀ H ₇ Br	α -Bromonaphthalene.....	42.07	44.59	1.4836	1.4739	0.99828	20	(16)
C ₁₀ H ₇ Cl	α -Chloronaphthalene.....	40.74	41.80	1.1706	1.1700	0.9982	20	(16)
C ₁₀ H ₁₄	<i>p</i> -Cymene.....	34.61	28.09	0.85618	0.85630	0.99702	20	(12)
		39.41	28.75				13.50	(8, 10)
C ₁₀ H ₂₂	Diisoamyl.....	46.80	22.24	0.72216	0.72253	0.99696	20	(12)
C ₁₀ H ₂₃ N	Diisoamylamine.....	13.51			0.77628	0.99815	20	(19)
C ₁₁ H ₁₂ O ₂	Ethyl cinnamate.....	21.36	38.42				19.5	(8, 10)
C ₁₁ H ₁₄ O ₂	Ethyl hydrocinnamate.....	20.19	35.08				21.5	(8, 10)
C ₁₁ H ₂₀ O ₂	Undecylenic acid.....	10.14	30.64	0.90604	0.90762	0.99610	25	(12)
C ₁₁ H ₂₂ O ₂	Ethyl nonylate.....	23.88	28.04				20	(12)
C ₁₂ H ₁₄ O ₄	Diethyl phthalate.....	16.27	37.34				20.5	(8, 10)
C ₁₈ H ₃₄ O ₂	Oleic acid.....	15.59 ± 0.2	32.50				20	(10, 12*)
		15.68†	32.50	0.8910	0.8908	0.9982	20	
C ₁₈ H ₃₄ O ₃	Ricinoleic acid.....	14.25	35.81				16	(8, 10)
C ₂₀ H ₃₈ O ₂	Ethyl oleate†.....	21.34			0.87601		20	(19)

* Between 10 and 40°C, the γ_i temperature coefficients of the following liquids are approximately constant: d_{γ_i}/dt for CCl₄ = -0.098; for C₂H₄Br₂ = -0.108; for C₆H₆ = -0.058; for C₈H₁₄ = -0.026; for C₇H₁₄O₂ = -0.037; for C₈H₁₈ = -0.048; for C₈H₁₈O = +0.039; for *sec.*-C₈H₁₈O = +0.041 (11). For ethyl caproate and heptaldehyde, v . (11).

† The oleic acid and water were mixed with each other but were not mutually saturated (12).

‡ A sample of Kahlbaum's ethyl oleate gave γ_i = 18.7 at 20°, but contained an amount of free acid equivalent to 1.65% oleic acid.

Interface, Aqueous Solution—Organic Liquid

CCl ₄ ; 22 ± 2°C (28)				CHCl ₃ ; 22 ± 2°C (28)			
Salt	C*	$\Delta\gamma_i$ †	Method	Salt	C*	$\Delta\gamma_i$ †	Method
FeCl ₃	0.1	0.9	I	FeCl ₃	0.1	2.9	I
	1.0	-0.1	I		1.0	3.5	I
MgSO ₄	0.1	-1.2	I	MgSO ₄	0.1	3.2	I
	1.0	-2.4	I		1.0	2.6	I
CaCl ₂	0.1	0.4	I	CaCl ₂	0.1	2.5	I
	1.0	2.3	I		1.0	2.6	I
NaCl.....	0.1	1.0	I	NaCl.....	0.1	2.8	I
	1.0	2.3	I		1.0	3.6	I
NaBr.....	0.1	0.5	II	NaBr.....	0.1	1.1	II
	1.0	0.8	II		1.0	0.0	II
KCl.....	0.1	0.5	I	KCl.....	0.1	3.0	I
	1.0	2.1	I		1.0	4.0	I
	0.1	0.1	II		0.1	1.6	II
	1.0	1.5	II		1.0	1.8	II

Also γ_i for aqueous H₂SO₄, and for mixtures of KCl and KCNS in water.

* C = M/L_s. † ± 2.

Salt	M/ l _s	Δγ _i ±2	Method
C ₄ H ₁₀ O, Ethyl ether; 22 ± 2° (28)			
H ₂ SO ₄	0.2	0.2	II
	2.0	0.4	II
FeCl ₃	0.1	0.7	II
	1.0	1.2	II
MgSO ₄	0.1	0.8	II
	1.0	1.6	II
CaCl ₂	0.1	0.8	II
	1.0	2.2	II
NaCl.....	0.1	0.2	I
	0.5	0.8	I
	1.0	1.0	I
NaBr.....	0.1	0.2	II
	1.0	1.5	II
KCl.....	0.1	0.7	I
		0.4	II
	1.0	1.4	I
		1.7	II
KBr.....	0.1	0.3	II
	1.0	1.4	II
KI.....	0.1	-0.7	II
	1.0	-1.5	II
K ₂ SO ₄	0.1	0.3	II
	1.0	1.3	II
KCNS.....	0.1	-0.6	II
	1.0	-1.8	II

C₆H₅NO₂, Nitrobenzene;
22 ± 2° (28)

H ₂ SO ₄	0.1	0.2	II
	0.2	0.1	II
	0.5	0.1	II
	1.0	-0.1	II
	2.0	-0.4	II
FeCl ₃	0.1	0.6	I
	1.0	0.9	I
MgSO ₄	0.1	0.4	I
	1.0	0.4	I
CaCl ₂	0.1	0.5	I
	1.0	1.1	I
NaCl.....	0.1	0.0	I
	1.0	1.9	I
NaBr.....	0.1	0.0	II
	1.0	0.3	II
KCl.....	0.1	0.7	I
	1.0	1.7	I
	0.1	0.2	II
	1.0	0.8	II
KBr.....	0.1	0.3	II
	1.0	0.2	II
KI.....	0.1	0.1	II
	1.0	-1.6	II

C₈H₁₆O, Caprylic alcohol

For the pure alcohol, $\gamma = 26.35$, relative viscosity = 3.126,
 $d_4^{25} = 0.82026$, 25° (4)

Solution	Wt. %	γ _i
Water.....	0.0	9.80
Sucrose.....	30.0	10.88
Dextrin.....	10.0	3.85
Starch.....	1.0	10.17
Gum arabic.....	10.0	9.24

Salt	M/ l _s	Δγ _i ±2	Method
C ₆ H ₅ NO ₂ —(Continued)			
K ₂ SO ₄	0.1	1.1	I
	1.0	1.1	I
	0.1	0.1	II
KCNS.....	1.0	0.2	II
	0.1	-0.3	II
	1.0	3.1	II
C ₂ H ₅ Cl ₂ O ₂ , Chloral- hydrate..	0.5*	-0.9	I
	1.0*	-2.9	I
	2.0*	-4.0	I

* Wt. %.

C₄H₈Cl₂S, β, β'-Dichloroethyl
sulfide; 20°C; $d_4^{20} = 1.2732$ (I)
(14). Phases not mutually
saturated.

	d _w	γ _i
Vapor.....		42.82
Water.....	0.9982	28.36
0.1N HCl.....	1.0001	28.90
0.1N NaOH.....	1.0032	12.78
0.1N Na ₂ CO ₃	1.0025	18.82

C₅H₁₁NO₃, Isoamyl nitrate
against 0.177N KCl (II) (12)

γ _i	γ	d _p
30.80	27.18	0.99710
d _o	d _w	t
0.99745	1.0059	20

C₆H₆, Benzene
1% aq. soln. chloral hydrate
at 22 ± 2° (I), Δγ_i = -3.6
(28).

Aq. soln. of NaCl at 25 ±
0.01°C (II) (16.5)

M/l _s	Δγ _i ± 0.2
0.3	0.63
0.5	0.86
1.0	1.56
3.0	4.04
5.0	6.59

Aq. solutions of acids: acetic
(18); butyric (17.5).
Dimethylaniline + benzene
or heptane, against water (31).

Interfacial tensions and dis-
tributions for the two-phase
system, butyric acid + hexane
+ H₂O (18).

C ₁₈ H ₃₄ O ₂ , Oleic acid against 0.116N HCl (II) (12)				
γ _i	d _p	d _o	d _w	t
15.99	0.8910	0.8908	1.0006	20

Benzene against aqueous soap solutions (II); sodium oleate (13);
effects of oleic acid and of NaOH (22); see further final index under
Soaps.

Effect of Hydrogen Ion Concentration on Tension at the Interface
Aqueous Phase—Organic Phase

Inorganic acids and bases at concentrations up to 0.2 normal
have only a very slight effect (> ca. 1%) upon the interfacial
tension at the phase boundary benzene—aqueous solution, and
have in general a marked effect at low concentrations only in case
they react with the organic phase. Thus with esters the presence
of a base in the aqueous phase accelerates the hydrolysis. For
example, the interfacial tension, ethyl oleate—water, is lowered
very rapidly as the concentration of strong base in the aqueous
phase is increased, since the rapidity at which sodium oleate is
produced at the surface increases with the concentration of the
base. Since the chemical composition of the interfacial region
changes in such a case with the time, no equilibrium values can be
obtained, but in many cases somewhat definite values are obtained
provided the liquids are left in contact only about one-half hour.

For numerical data see the literature cited below: Ethyl oleate
(19); ethyl caproate (19); chloropicrin (20); diisoamylamine (19);
sec.-octyl alcohol (19); dichloroethyl sulfide (14); benzene (13).

For aqueous solutions buffered by borate or phosphate against
benzene solutions of organic acids and esters, v. (23).

Interfacial Tensions of Liquid Metals against Non-metallic
Liquid Phases

γ_i (resp. γ_{Hg}, γ_l) = interfacial tension, resp. surface tension of
Hg, resp. surface tension of the second liquid.

MERCURY AGAINST A PURE LIQUID

H ₂ O, Water (II) (17)				C ₄ H ₁₀ O.—(Continued)			
γ _i	γ _l	γ _{Hg}	t, °C	γ _i	γ _l	γ _{Hg}	t, °C
375	72.8		20	342.7	22.7	476	20
CS ₂ , Carbon disulfide (II) (17)				341.0	22.0	474	30
	336	31.4	20	340.2	21.3	471	40
CH ₂ Cl ₂ , Methylene chloride (II) (15)				339.3	20.5	469	50
	342.5	26.5	20	C ₅ H ₁₂ O, Iso(?)—amyl alcohol (III) (3)			
CH ₃ I, Methyl iodide (II) (15)				γ _i	γ _l		t, °C
	304	35.0	20	261.6			25
C ₂ H ₄ Br ₂ , Ethylene bromide (II) (15)				C ₆ H ₅ NO ₂ , Nitrobenzene (II) (15)			
	326	38.7	20	350.5	43.4		20
C ₂ H ₄ Cl ₂ , 1, 1-Dichloroethane (II) (15)				C ₆ H ₆ , Benzene (II) (17)			
	337	25.7	20	γ _i	γ _l	γ _{Hg}	t, °C
C ₂ H ₅ NO ₂ , Nitroethane (II) (17)				361.3	30.4	478	10
	378	34.9	20	357.2	28.9	476	20
C ₂ H ₆ O, Ethyl alcohol (II) (15)				353.7	27.6	474	30
	364	22.4	20	351.4	26.3	471	40
C ₃ H ₈ O, n-Propyl alcohol (II) (17)				349.8	24.9	469	50
	348.8	23.6	467	348.8	23.6	467	60
C ₄ H ₁₀ O, Ethyl ether (II) (17)				C ₆ H ₇ N, Aniline (II) (17)			
	379	21.8	20	γ _i	γ _l		t, °C
C ₄ H ₁₀ O, Isobutyl alcohol (II) (17)				341	42.6		20
	γ _i	γ _l	γ _{Hg}	t, °C	C ₆ H ₁₄ , n-Hexane (II) (17)		
349.1	24.3	480	0	378	18.4		20
345.6	23.5	478	10	C ₇ H ₈ , Toluene (II) (17)			
				359	29.0		20
				C ₈ H ₁₀ , o-Xylene (II) (17)			
				359	29.0		20

