



清華大學

Tsinghua University

Academic Figure Investigation

Meet Prof. Lars Onsager:

A lifetime of symmetry & structure

Yunfan Huang

2023.11.12





Overview of Lars Onsager (1903-1976)

✓ Plenty of awards and prizes

1953 Rumford Gold, AAAS
1958 Lorentz Medal, RNAS
1962 Lewis/Kirkwood/Gibbs Medal, ACS
1964 T. W. Richard Medal, ACS
1964 J. W. Gibbs Lecturer, AMS

1965 P. W. Debye Award, ACS

1966 Belfer Award in Pure Science, UYeshiva

1968 Nobel Prize in Chemistry

1968 President's National Medal Science

*“for the discovery of the **reciprocal relations** bearing his name, which are fundamental for the thermodynamics of irreversible processes”*

✓ Plenty of honorary degrees

1934-1940 Assistant Professor, Yale University
1935 Ph.D., Yale University
1954 D.Sc., Harvard University
1960 Dr. technicae, Norges Tekniske Hogskole
1962 D.Sc., Brown University

1962 Dr. Naturwissenschaften, RWTH, Aachen
1968 D.Sc., The University of Chicago
1969 D.Cs., Ohio State University
1970 Sc.D., Cambridge University
1971 D.Cs., Oxford University

Why & how?



*At scientific meetings and conferences,
he could **always be counted on** to give:*

*penetrating insights, 洞察力
hints of some new result, 线索卡
incisive critiques. 锐评*

[1] H. Longuet-Higgins and M. E. Fisher, *Journal of Statistical Physics* **78**, 605 (1995).

[2] P. J. Wojtowicz, *Ferroelectrics* **15**, 1 (1977).

[3] J. G. Kirkwood, *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences* **82**, 298 (1953).



Contents

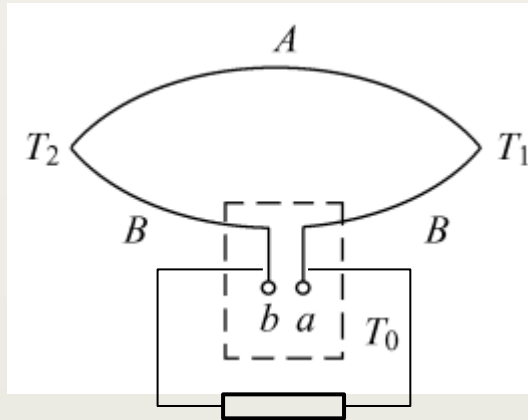
- Background: before/after Onsager discovered Reciprocal Relations
- Academic CV
- Achievements
- Takeaways
- Anecdotes

Astonishing multi-phys convergence (I)

- Thermal effect of electron transport in thermo-electric materials



Seebeck



Seebeck effect (1821): $\Delta T \rightarrow \Delta E$

$$S = \frac{E_a - E_b}{T_1 - T_2}$$

S : Seebeck coefficient

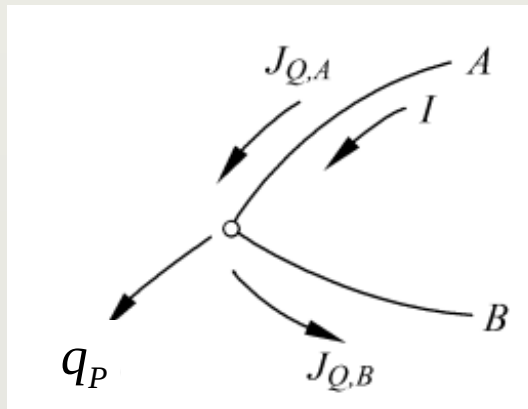
$\Delta_{ab}E$: electromotive force

$$\varphi_a - \varphi_b = E_b - E_a$$

$\Delta_{ab}\varphi$: electric potential difference (voltage)



Peltier



Peltier effect (1834): $I_e \rightarrow q_P$

$$\Pi_{AB} = \left(\frac{q_P}{I_e} \right)_{\Delta T=0}$$

Π_{AB} : Peltier coefficient

$$q_P := J_{Q,A} - J_{Q,B} = I_e (S_A - S_B) T =: I_e S_{A-B} T$$

$$\left(\frac{J_{Q,i} / T}{I_e} \right)_{\Delta T=0} = S$$

Used for prediction and measurement

[1] 陈宏芳. 高等工程热力学. (北京, 清华大学出版社, 2000)

[2] N. W. Ashcroft, N. D. Mermin. *Solid State Physics*. (Harcourt, New York, 1976)



Astonishing multi-phys convergence (II)

- Thermal effect of mass transfer (chemE “3 trans + 1 react”)

Type	Heat transfer	Mass transfer
Potential	T	X_A
Flow rate	$\mathbf{q}$	$\mathbf{J}_A^*$
Requiring gradient of	temperature	concentration fraction
Constitutive equation	$\mathbf{q} = -k \nabla T$	$\mathbf{J}_A^* = -CD_{AB} \nabla X_A$
	Fourier's law	Fick's law
Transport coefficient	thermal conductivity k	binary diffusivity D_{AB}

$$T\sigma = \mathbf{j}_1 \mathbf{X}_1 + \mathbf{j}_2 \mathbf{X}_2 + \mathbf{j}_q \mathbf{X}_u$$

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{F}_i - T \nabla \left(\frac{\mu_i}{T} \right), i = 1, 2$$

$$\mathbf{X}_u = -\frac{\nabla T}{T}$$

$$\mathbf{j}_1 = L_{11}(\mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_2) + L_{1u} \mathbf{X}_u$$

$$\mathbf{j}_q = L_{u1}(\mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_2) + L_{uu} \mathbf{X}_u$$

Soret effect (1893): $\Delta T \rightarrow \Delta x_A$

Dufuor effect (1872): $\Delta x_A \rightarrow \Delta T$

$$L_{1u} = L_{u1}$$

Used for measurement

$$\text{Maxwell-Stefan eqn.} \quad \mathbf{J}_A^* = -C\hat{D}_{AB} X_A \frac{\nabla \mu_A}{k_B T} \Leftrightarrow x_A x_B (\mathbf{v}_A - \mathbf{v}_B) = -\hat{D}_{AB} x_A \nabla \ln a_A$$

[1] R. B. Bird, et al, *Transport Phenomena*, 2nd ed. (Wiley, New York, 2002)

[2] J. A. Wesselingh, R. Krishna. *Mass Transfer in Multicomponent Mixtures*. (Delft University Press, Delft, 2006)

[3] 王涛. *高等化工传递原理*. (北京, 科学出版社, 2020)

[4] 陈宏芳. *高等工程热力学*. (北京, 清华大学出版社, 2000)

Milestone: “Triumph of atomism”



H. van't Hoff
Nobel Prize in
Chemistry (1901)

S. Arrhenius
Nobel Prize in
Chemistry (1903)

➤ Microscopic picture of diffusion and electrolyte

- van't Hoff, **1880s**: Principle of mobile equilibrium

Theory of osmotic pressure in dilute solution

- Arrhenius, **1884**: Electrolytic theory of electrolyte dissociation
- Einstein, **1905**: Atomic theory of Brownian motion (**1827**)

✓ **Macroscopic** measurable quantities ↔ **microscopic** modelling parameters

Particle suspension $\overline{x^2(t)} = 2Dt \longrightarrow \frac{1}{6\pi\eta r_p} = \frac{D}{RT / N_A}$ “Stokes-Einstein relation”

Molecular solution $\frac{\eta^*}{\eta} = 1 + \frac{\rho N_A}{M} \frac{4}{3} \pi r_m^3 \longleftrightarrow \frac{1}{6\pi\eta r_m} = \frac{D}{RT / N_A}$

Nobel Prize in Physics (1921)
Albert Einstein (1904)

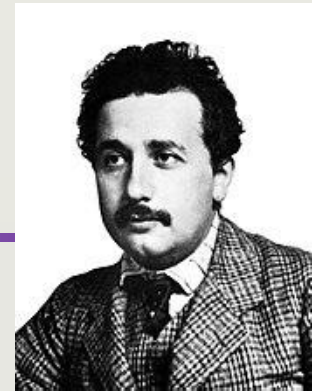
- Perrin, **1908**: Experimental verification of N_A

*“for his work on the **discontinuous structure of matter**, and especially for his discovery of **sedimentation equilibrium**. ”*

[1] Einstein, Albert (1905). Annalen der Physik. **322** (8): 549–560 (2006). (Translated)

[2] Penrose, R. (2005). **Einstein’s Miraculous Year: Five Papers That Changed the Face of Physics** (J. Stachel, T. Lipscombe, A. Calaprice, & S. Elworthy, Eds.).

[3] G. D. Patterson. Les Atomes: a landmark book in chemistry. *Foundations of Chemistry* **12**, 223–233 (2010)





Onsager's Reciprocal Relations (1931)

- Irreversible processes in electrolyte solutions (1931, 28 yrs old)

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{F}_i - \nabla \mu_i, i = 1, 2$$

$$\mathbf{j}_1 = L_{11}\mathbf{X}_1 + L_{12}\mathbf{X}_2 \rightarrow L_{12} = L_{21}$$

$$\mathbf{j}_2 = L_{21}\mathbf{X}_1 + L_{22}\mathbf{X}_2$$

Reciprocal relations?

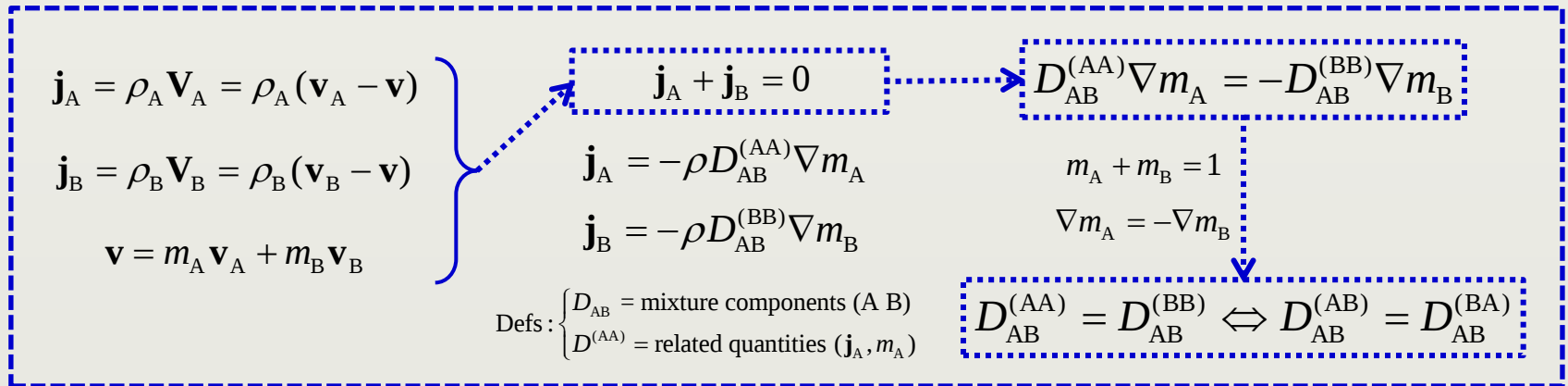
$$\mathbf{X}_i = \mathbf{F}_i - \nabla \mu_i, i = 1, 2, 3$$

$$\mathbf{j}_1 = L_{11}(\mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_3) + L_{12}(\mathbf{X}_2 - \mathbf{X}_3) \rightarrow L_{12} = L_{21}$$

$$\mathbf{j}_2 = L_{21}(\mathbf{X}_1 - \mathbf{X}_3) + L_{22}(\mathbf{X}_2 - \mathbf{X}_3)$$

Used for prediction

$$\mathbf{j}_3 = -\mathbf{j}_1 - \mathbf{j}_2$$



Maxwell-Stefan eqn. $\mathbf{J}_A^* = -C \hat{D}_{AB} x_A \frac{\nabla \mu_A}{k_B T} \Leftrightarrow x_A x_B (\mathbf{v}_A - \mathbf{v}_B) = -\hat{D}_{AB} x_A \nabla \ln a_A$

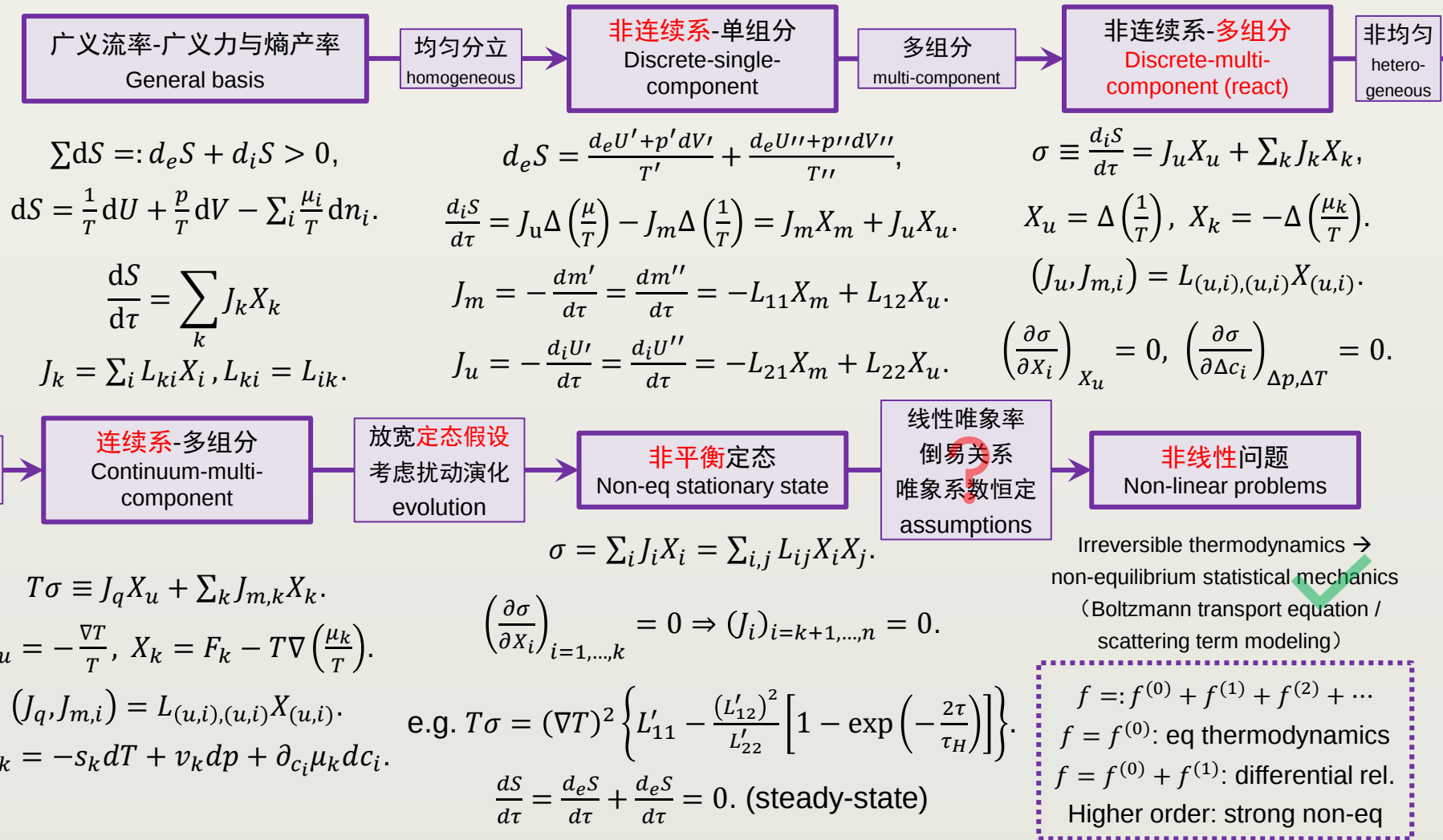
[1] L. Onsager and R. M. Fuoss, *The Journal of Physical Chemistry* **36**, 2689 (1931).

[2] L. Onsager, *Physical Review* **37**, 405 (1931); L. Onsager, *Physical Review* **38**, 2265 (1931).

[3] V. G. Levich. *Physico-chemical Hydrodynamics*. (Wiley, Russia, 1959)



Extension: entropy production rate



[1] 陈宏芳. 高等工程热力学. (北京, 清华大学出版社, 2000)

[2] I. Prigogine. *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes (Third Edition)*. (Wiley, New York, 1967)

[3] I. Prigogine. *Non-equilibrium Statistical Mechanics*. (Dover, New York, 1962)



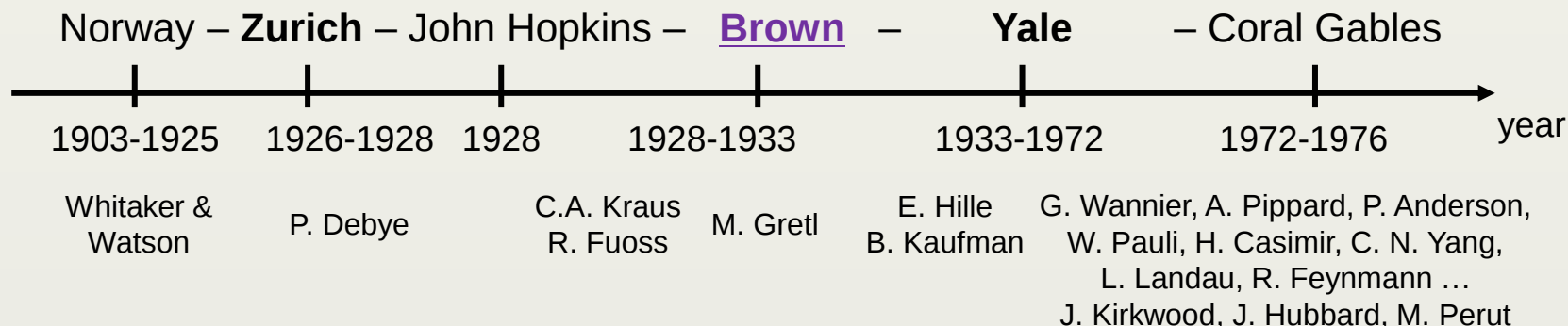
Contents

- Background
- Academic CV: from Zurich/Brown to Yale
- Achievements: symmetry & structure; electrolyte solutions
- Takeaways
- Anecdotes

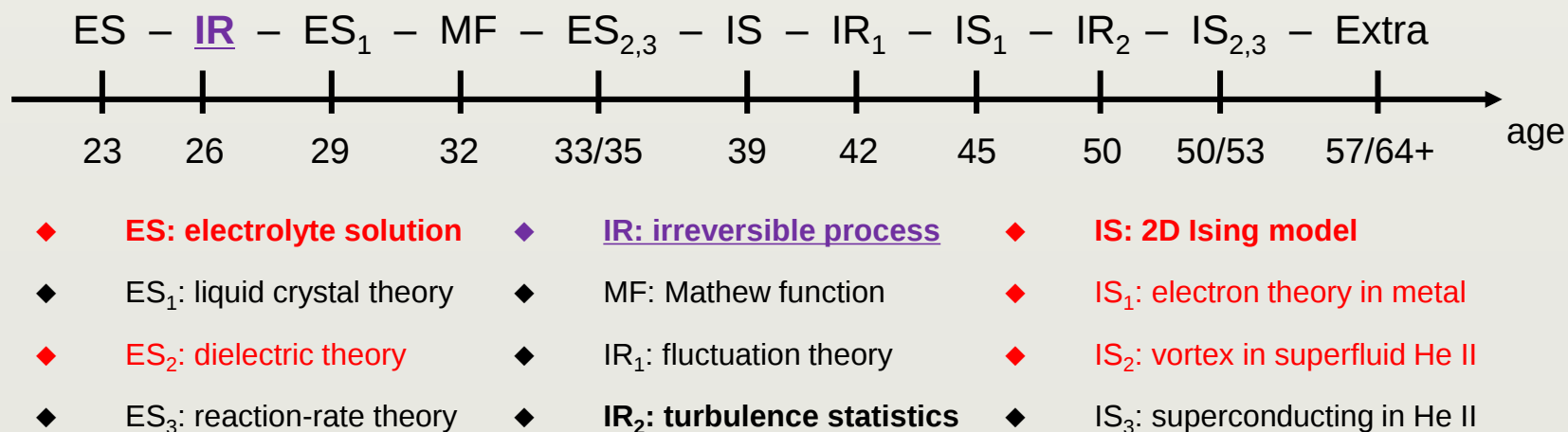


Academic CV & achievements

➤ Academic CV: from Zurich/Brown to Yale



➤ Achievements: symmetry & structure



◆ **ES: electrolyte solution**

◆ ES₁: liquid crystal theory

◆ **ES₂: dielectric theory**

◆ ES₃: reaction-rate theory

◆ **IR: irreversible process**

◆ MF: Mathew function

◆ IR₁: fluctuation theory

◆ **IR₂: turbulence statistics**

◆ **IS: 2D Ising model**

◆ **IS₁: electron theory in metal**

◆ **IS₂: vortex in superfluid He II**

◆ IS₃: superconducting in He II

◆ Extra: ice's electrical theory, radiochemistry, **molecular biology (life in the early days)**

Example: Zur Theorie der Elektrolyte

390 Onsager, Zur Theorie der Elektrolyte. I. Physik. Zeitschr. XXVII, 1926.

Ionic atmosphere around an ion with effective radius of b

extrapolierten Wanderungsgeschwindigkeit des Ions berechnen. Die Ionenatmosphäre beginnt

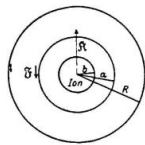


Fig. 1.

in einem gewissen Abstand vom Ion; wir bezeichnen denselben mit a , und nehmen entsprechend der zweiten Näherung von Debye und Hückel, indem wir den endlichen Ionen-durchmesser berücksichtigen, für die Ladungsdichte den Wert

$$-\frac{e_1}{4\pi} \frac{e^{-\kappa r}}{1 + \kappa a} \frac{1}{r^2}$$

Zur Theorie der Elektrolyte. I.

Von Lars Onsager.

§ 1. Einleitung. Debye und Hückel haben vor einiger Zeit den Einfluß der inter-ionischen Kräfte auf die thermodynamischen Eigenschaften sowie auf die Leitfähigkeit von Elektrolyten theoretisch berechnet¹⁾.

Die Theorie der thermodynamischen Eigenschaften leistet nun gewissermaßen mehr als diejenige der Leitfähigkeit. Es wird nämlich z. B. für die Abhängigkeit der osmotischen Koeffizienten von der Konzentration der für hinreichend verdünnte Lösungen gültige Ausdruck:

$$g = 1 - \alpha \sqrt{c} \quad (1)$$

abgeleitet, wobei im Koeffizienten α außer Tem-

$$\Lambda = \Lambda_0 (1 - \alpha \sqrt{c})$$

$$f_1 = 1 - h \sqrt{c} \quad (2)$$

1) Diese Zeitschrift 24, 185, 305, 1925.

Die Gleichungen von Stokes lauten nun, wenn v = Geschwindigkeit, p = Druck, η = Viskosität der Flüssigkeit:

$$\eta \text{ rot rot } v = - \text{grad } p + \bar{\sigma} \quad (4)$$

Wir dürfen immer das Stromsystem zerlegen:

$$v = v_1 + v_2$$

derart, daß v_1 dem Fall

$$\begin{cases} \bar{R}_1 = \bar{R} \\ \bar{v}_1 = 0 \end{cases}$$

v_2 dem Fall

$$\begin{cases} \bar{R}_2 = 0 \\ \bar{v}_2 = \bar{v} \end{cases}$$

entsprechen. Eine solche Zerlegung ist dann zulässig, wenn die Gleichungen mehr mit hinreichender Genauigkeit beschreiben, sofern nur Gesetz gilt.

Was wir letzten Endes suchen, ist nur die Geschwindigkeit des Ions. Wir kümmern uns deshalb nicht um die Einzelheiten im Stromsystem v_1 , sondern stellen einfach die Kraft $\bar{R}$ dem Ion die Geschwindigkeit

$$V_1 = \frac{\bar{R}}{\eta}$$

erteilt, und suchen weiter den Einfluß des Kräftesystems $\bar{\sigma}$ zur Geschwindigkeit des Ions liefert.

Dafür zerlegen wir die Ionenatmosphäre in dünne konzentrische Kugelschalen, und untersuchen das Stromsystem $\bar{d}\bar{v}$, das von den zwischen den Abständen r und $r + dr$ vom Ion angreifenden Kräften herrührt. Wir gelangen sofort zum Ziel, wenn wir die Resultate von Stokes über die Bewegung der Kugeln ziehen. Nach Stokes bewegt sich eine Kugel vom Radius r unter der Kraft $\bar{P}$ mit der Geschwindigkeit

$$\frac{\bar{P}}{6\pi\eta r}$$

durch die Flüssigkeit. Die pro Flächeneinheit der Kugeloberfläche wirkende Kraft, die sich aus Druck und Viskositätskraft zusammensetzt, ist dabei gleichmäßig über die Kugeloberfläche verteilt, und für alle Teile derselben der Bewegungsrichtung parallel und entgegen-gesetzt gerichtet¹⁾.

1) Vgl. Lamb, Hydrodynamics, Dritte Ausgabe S. 552.

Superposition principle of different types of forces on the ion: electrostatic & electrophoretic

External force (e.g. electric force)

Stokes force to balance the electrophoretic force

start from P. Debye's work

254

Physik. Zeitschr. XXVII, 1926. Onsager, Zur Theorie der Elektrolyte. I.

391

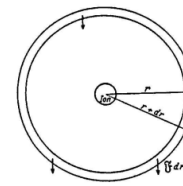


Fig. 2.

Es ist eben eine solche Kräfteverteilung, die uns bei dem obigen Problem begegnet. Die Kräfte sind parallel gerichtet und gleichmäßig verteilt, und betragen pro Flächeneinheit

$$\bar{\sigma} dr = -A \frac{e^{-\kappa r}}{r} dr.$$

Solve the velocity field layer-by-layer

Es sich das Innere der Kugel. Der Einfluß des betrachteten Ions auf die Bewegung der Kugel wird. Es ist dabei ganz gleichgültig, ob das Ion innerhalb der Kugel, oder außerhalb derselben, sich befindet. Das auch bei der Annahme von einem Mechanismus innerhalb der Kugel. Es ist nur notwendig, daß die Kräfte, die auf die Kugel einwirken, dieselben der gewöhnlichen hydrodynamischen Gesetze gelten.

Der Gesamtbeitrag der Kräfte, die in der Kugelschale angreifen, ist gleich

$$4\pi r^2 \bar{\sigma} dr.$$

Diese Kraft erteilt der eingeschlossenen Flüssigkeitskugel, somit auch dem Ion, die Geschwindigkeit:

$$dV_2 = \frac{4\pi r^2 \bar{\sigma} dr}{6\pi\eta r} = \frac{2r \bar{\sigma} dr}{3\eta} \quad (5)$$

Integration over radius direction

$$V_2 = \int_{r=a}^{\infty} dV_2 = - \int_{r=a}^{\infty} \frac{2}{3\eta} A e^{-\kappa r} dr = - \frac{2}{3\eta} A \frac{1}{\kappa} e^{-\kappa a}$$



oder mit Rücksicht auf (3):

$$V_2 = - \frac{e_1}{6\pi\eta} \frac{\kappa}{1 + \kappa a}.$$

§ 4. Erweiterung der Voraussetzungen. Wir lassen jetzt die Annahme von unbeschränkter Gültigkeit der hydrodynamischen Gesetze fallen, und fordern nur, daß außerhalb des Abstandes R von der Ionenatmosphäre die in der Debye-Hückel'schen Theorie gültigen Gesetze streng gelten sollen. Der Anteil, der in der Ionenatmosphäre angreifenden Kräfte liefern, ist immer noch mit Hilfe von (5) zu berechnen. Es ergibt sich sofort dafür:

$$V_2 = \int_{r=a}^{\infty} dV_2 = - \frac{2}{3\eta} A \frac{1}{\kappa} e^{-\kappa a} = - \frac{e_1}{6\pi\eta} \frac{e^{-\kappa a}}{1 + \kappa a} \quad (8)$$

Für hinreichend kleine κ können wir die Glieder höherer Ordnung vernachlässigen, so daß man erhält:

$$V_2 \approx - \frac{e_1}{6\pi\eta} \kappa. \quad (9)$$

Für die innerhalb des Abstandes R angreifenden Kräfte läßt sich zeigen, daß ihr Gesamtbeitrag bei kleinen Konzentrationen proportional κ^2 ist, da:

$$\int_a^R 4\pi r^2 A \frac{e^{-\kappa r}}{r} dr \approx \int_a^R 4\pi r A e^{-\kappa r} dr = 4\pi A \int_a^R e^{-\kappa r} dr = \frac{4\pi A}{\kappa} (e^{-\kappa a} - e^{-\kappa R}) \approx \frac{4\pi A}{\kappa} e^{-\kappa a} \kappa^2$$

Beim Übergang von der Ionenatmosphäre tritt ein Proportionalitätsfaktor κ^2 ein, der bei kleinen Konzentrationen vernachlässigt werden kann. Daraus schließen wir, daß der Beitrag der Kräfte innerhalb der Ionenatmosphäre zur Geschwindigkeit des Ions bei kleinen Konzentrationen vernachlässigt werden kann. Dann dürfen wir die Konzentrationen neben V_1 vernachlässigen, und erhalten für die Geschwindigkeit des Ions in erster Näherung:

$$V \approx V_1 \approx - \frac{e_1}{6\pi\eta} \kappa. \quad (10)$$

Wir erhalten somit für die Geschwindigkeit des Ions in erster Näherung:

$$V = V_1 + V_2 = \frac{\bar{R}}{\eta} - \frac{e_1 \kappa}{6\pi\eta} \quad (11)$$

1) Die Formel (11) ist nicht neu; man erhält dieselbe ohne weiteres aus derjenigen von Debye und Hückel, wenn man den „elektrophoretischen Radius“ dieser Autoren mit dem nach Stokes aus der Beweglichkeit der Ionen berechneten Radius identifiziert. Man vergleiche E. Hückel, „Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften“ III, 267 (1924), Fußnote.

Discussion on effect of hydrodynamic radius R

Total velocity, including electrophoresis & electromigration

Example: the Motion of Ions

12 December 1969, Volume 166, Number 3911

SCIENCE

The Motion of Ions: Principles and Concepts

Lars Onsager

"Anomalies" of strong electrolytes from the ideal additive behavior:
Electrical conductivity,
Freezing point depression,
Electromotive force

**This article is the lecture
he delivered in Sweden,
when he received the
Nobel Prize in chemistry.**

pletely dissociated and the properties of a solution would be additive, not just over molecules, but even over the constituent ions. At higher concentrations, admittedly, one would have to allow for combination to form molecules or compound ions according to the mass-action law, as suggested by Ostwald (2). Nernst developed appropriate simple theories for the diffusion of electrolytes and for the variation of an electrode potential with the concentration of the ion discharged.

Such was the simple picture presented to me as a freshman chemist in 1920. In spite of some idealization it sufficed for a great many purposes; it eased many tasks no end and we were eternally grateful for that. However, very soon the journals rather than the textbooks taught me about numerous observations which did not quite fit into the picture and of tentative explanations of the discrepancies.

Whether the experimenters studied the electrical conductivities or the equilibrium properties like freezing point depression and electromotive forces, significant deviations from the ideal additive behavior persisted to much lower concentrations than had been predicted according to the mass-action law from the measurements performed on more concentrated solutions. These phenomena became known as the "anomalies" of strong electrolytes. In many ways the anomalies displayed conspicuous regularities; if one compared salts of the same valence type like NaCl and KNO₃, the differences were typically small even at concentrations as high as 0.1 mole/liter. Suspicion centered on the long-range electrostatic forces between the ions.

Debye and Hückel finally succeeded in predicting the effects of the electro-

Copyright © 1969 by the Nobel Foundation.
The author, Wilford Gibbs Professor of Chemistry at Yale University, New Haven, Connecticut, delivered the lecture in Stockholm, Sweden, January 1969, when he received the Nobel Prize in Chemistry. It is published here with the permission of the Nobel Foundation and is included in the complete volume of *Lars Onsager's Nobel Prize Lectures* published by the Elsevier Publishing Company, Amsterdam and New York.

1359

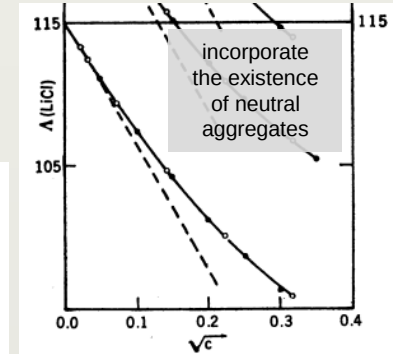
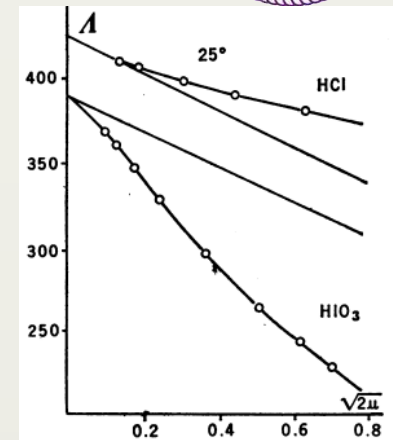
$$k_j = -\nabla\mu_j - e_j\nabla\phi$$

$$J_j = \sum L_{ji}k_i, \quad k_j = \sum R_{ji}J_i$$

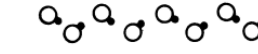
$$R_{ij} = R_{ji}$$

$$R(J, J) = \sum R_{ji}J_jJ_i$$

- Dilute dissociated species (l)
- Reciprocal relations
- Undissociated species (l)
- Electrolytic conduction (s)



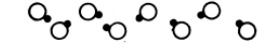
Chain of -OH



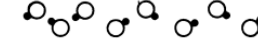
Chain of -CO₂H



Positive bonding defect



Negative bonding defect



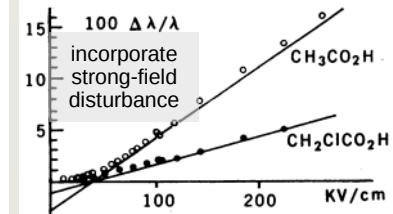
Positive ionic ("onium") defect



Cation with one solvating chain



Fig. 9. H-bond chains and electrically active defects.



L. Onsager, *Science* 166, 1359 (1969).

【L. Onsager's Nobel prize lecture】

Style: specific problem & generalized insight

page12



Contents

- Background
- Academic CV
- Achievements
- Takeaways: direct – transit – encrypt
- Anecdotes: a brilliant scientist with colorful personalities



Takeaway: direct – transit – encrypt

专注: immersion

沉浸于学术研究
聚焦具体科学问题



- ✓ 定量理论计算-实验验证结合
 - 电解质溶液, 电离平衡
 - 倒易关系, 同位素分离



- ✓ 坚实数学基础下的持续创新
 - 倒易关系/统计/“灵感-尝试”
 - 伊辛模型/矩阵/“迭代-坚持”



- ✓ 从简单例子求解找一般规律
 - 倒易关系^[2]/复杂输运共性
 - 伊辛模型/高维矩阵计算

精明: “sharp cookie”

“拿锤子找钉子” →
“在啃硬骨头中锻造武器”



- ✓ 前沿学科视野-敏锐学术嗅觉
 - 电解质溶液^[2]/对称性
 - 伊辛模型/长程关联



- ✓ 准确判断何时应转换状态
 - 时而像老鹰翱翔/抖落掉羽毛
 - 时而像蠕虫挖洞/咀嚼腐殖质



- ✓ 某领域创新性不足便转向
 - 冰的电学性质 (57)
 - 生物膜与大分子 (64)

洞察: cryptogram

回归开普勒-伽利略时代
似的“加密对话”



- ✓ 学术趣闻
 - “screening effect”
 - “physical terms”
 - “talking in riddles”
 - 亚稳态-甘油工厂



- ✓ 学术联系
 - 湍流统计 (JQ Lin/SJ Lu)^[3]
 - 伊辛模型 (Yang/Landau)^[4]
 - 液氦超流 (Feynmann)^[4]

[1] H. Longuet-Higgins and M. E. Fisher, *Journal of Statistical Physics* **78**, 605 (1995); P. J. Wojtowicz, *Ferroelectrics* **15**, 1 (1977).

[2] E. T. Jaynes, *Annual Review of Physical Chemistry* **31**, 579 (1980); U. M. B. Marconi, *et al.*, *Physics reports* **461**, 111 (2008).

[3] G. L. Eyink and K. R. Sreenivasan, *Reviews of Modern Physics* **78**, 87 (2006). 13

[4] 杨振宁, *自然杂志*, **723** (1989); J. D. Reppy, *Annual Review of Condensed Matter Physics*, **1** (2022).



Anecdotes: colorful personalities

➤ Teaching

- ❑ “Sadistical mechanics”, “Advanced Norwegian I/II”; “study for keeps”

➤ Communication

- ❑ AP before PhD, story of “spinor”; “drop the level on stage at a time”

➤ “Duets”

- ❑ P. Debye; C. A. Kraus, New Boy, RA w Nobel Prize; J. Kirkwood, B Kaufman

➤ Critiques

- ❑ “need sterilizing”, blackboard “X” or erasing, 3D Ising problem

➤ Interests

- ❑ Norse mythology, gardening, encyclopedia; paleontology; swimming

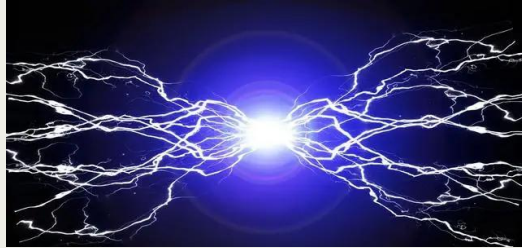
[1] H. Longuet-Higgins and M. E. Fisher, *Journal of Statistical Physics* **78**, 605 (1995).

[2] P. J. Wojtowicz, *Ferroelectrics* **15**, 1 (1977).



Thank you

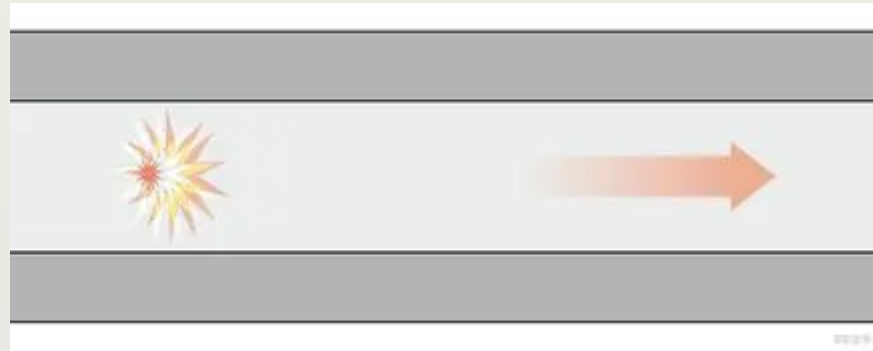
Appendix: dissipation in electron transport



electron “friction”

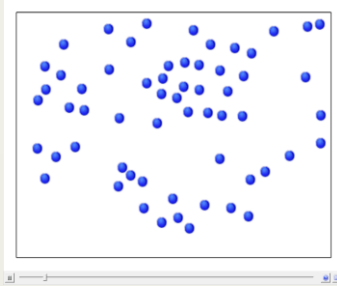


Electrical energy
dissipates into heat



Ohmic dissipation function $W = R_t I^2 = UI$

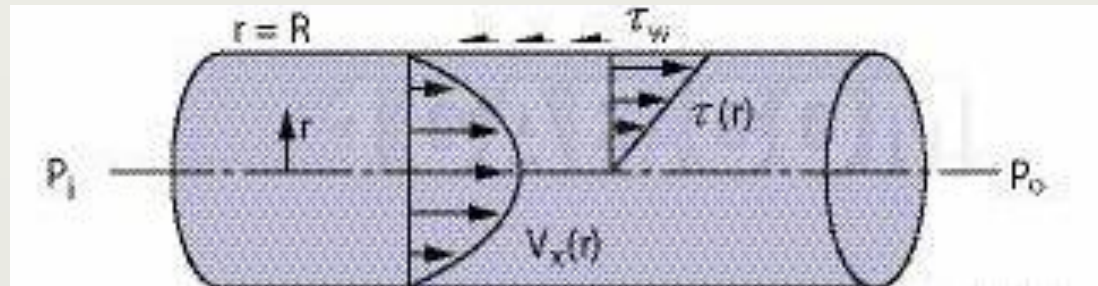
Appendix: dissipation in fluid flow



molecule “friction”



Mechanical energy
dissipates into heat

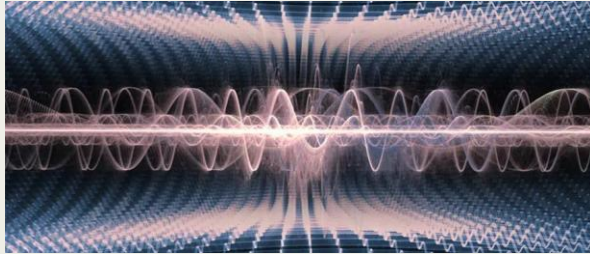


Viscous dissipation function $\psi = \int \mu \left(\frac{du}{dr} \right)^2 dA \sim (\bar{u})^2 \bar{\mu}$

$$\bar{u} = -\frac{R^2}{8\mu} \frac{dp}{dr} \quad \bar{\mu} = \frac{12}{3} \frac{\mu}{R}$$

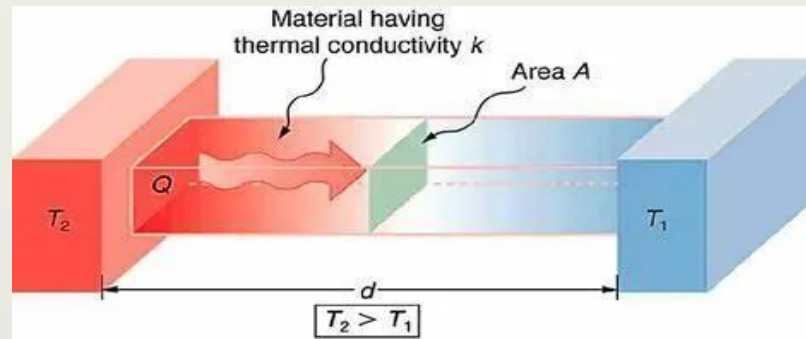
(Refer to Prof. Wang' slides)

Appendix: dissipation in heat transfer



Heat dissipates into what?

phonon “friction”



- “Heat dissipation function”
- Every spontaneous transport needs costs (no free lunch)
 - Are there other candidates than the concept of entropy?

(Refer to Prof. Wang’ slides)