

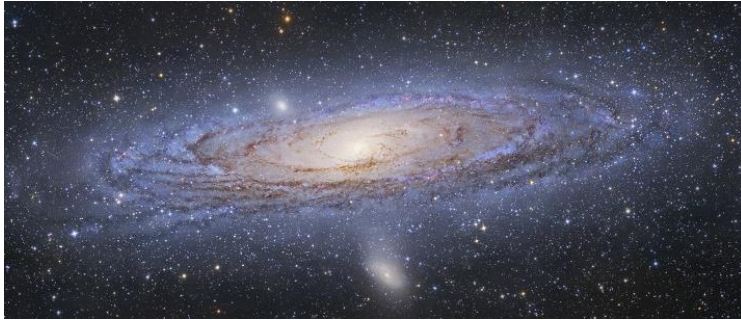
마찰력의 원천적 이해: 제5원소

김용현

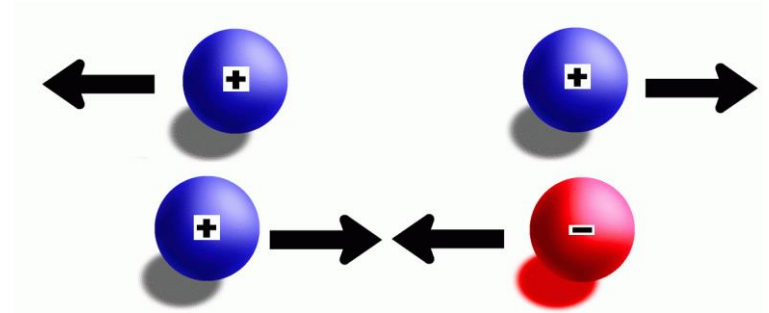
나노과학기술대학원

자연계에 존재하는 4대 힘

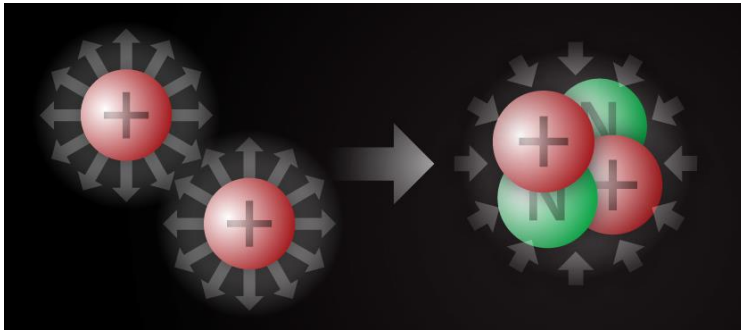
- 중력



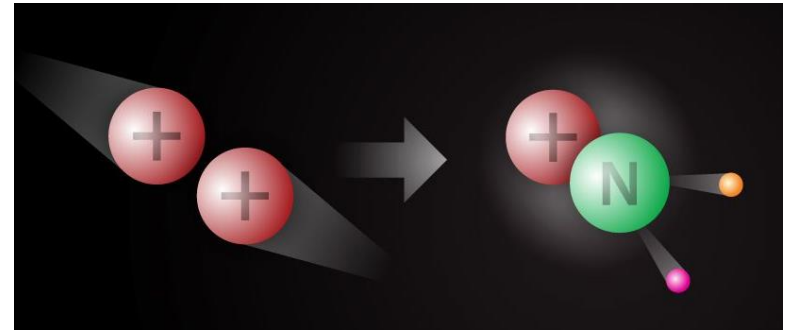
- 전자기력



- 강력



- 약력



그럼 마찰력은 무엇인가

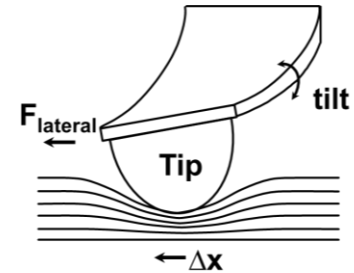
- 마찰현상, 마찰전기- 수천년의 역사를 가지고 있지만, 기초원리 알려져 있지 않음



- 전자기력의 한 형태?
 - 접촉면에서 두 물체의 접촉력을 제거하는데 드는 에너지
 - 중력, 핵력에서는 마찰력이 없을까?
- 입자들의 에너지 소실 과정에서 나타나는 힘?
 - 입자들의 kinetic theory로 설명 가능
 - 예; 빛방출의 저항력 ($\mathbf{F}=-b\mathbf{v}$), 전기 저항 ($\rho = m^*/(ne^2\tau)$), 입자가속기 빛방출 (radiation friction)
- 1) 마찰력 = Phonon 산란? 2) 마찰전기는 왜? 3) 제5원소?

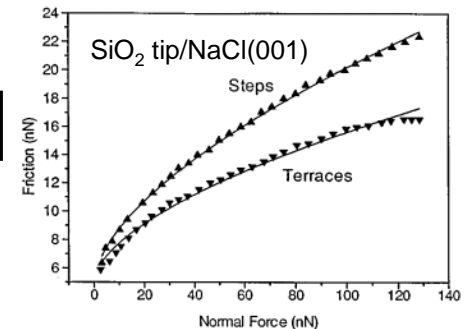
마찰력에 대한 일반적 연구와 문제점

- Amontons의 법칙 (거시적 관점): 15-19th
 - $F_f = \mu N$ (μ : 마찰계수, N : Normal force)
 - 접촉면적과 상관없음



- Bowden-Tabor (미시적 관점): 20th
 - Tribology: Friction Force Microscopy (FFM)
 - $F_f = \tau A_{real}$ (τ : Shear strength, A_{real} : 접촉면적)

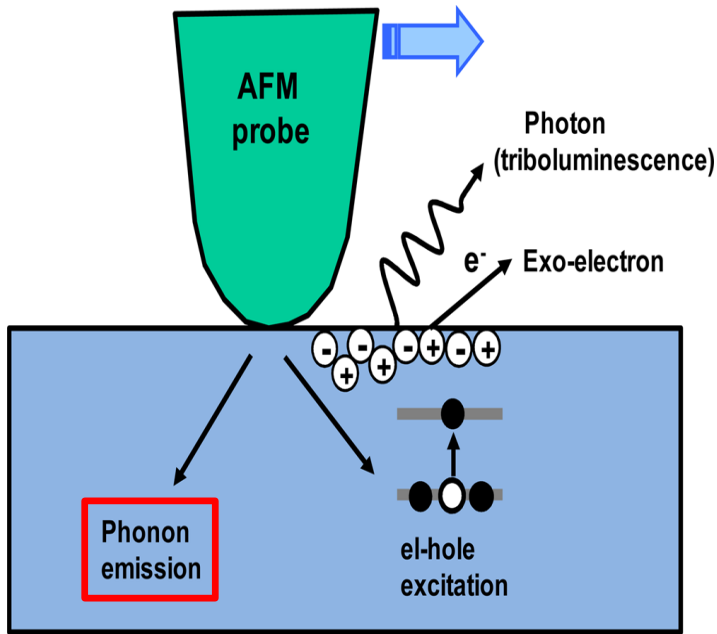
- 거시세계와 미시세계의 연결고리 찾기
 - $A_{real} = (\mu/\tau)N$, but from FFM, $A_{real} = N^{2/3}$
 - 이유를 모름



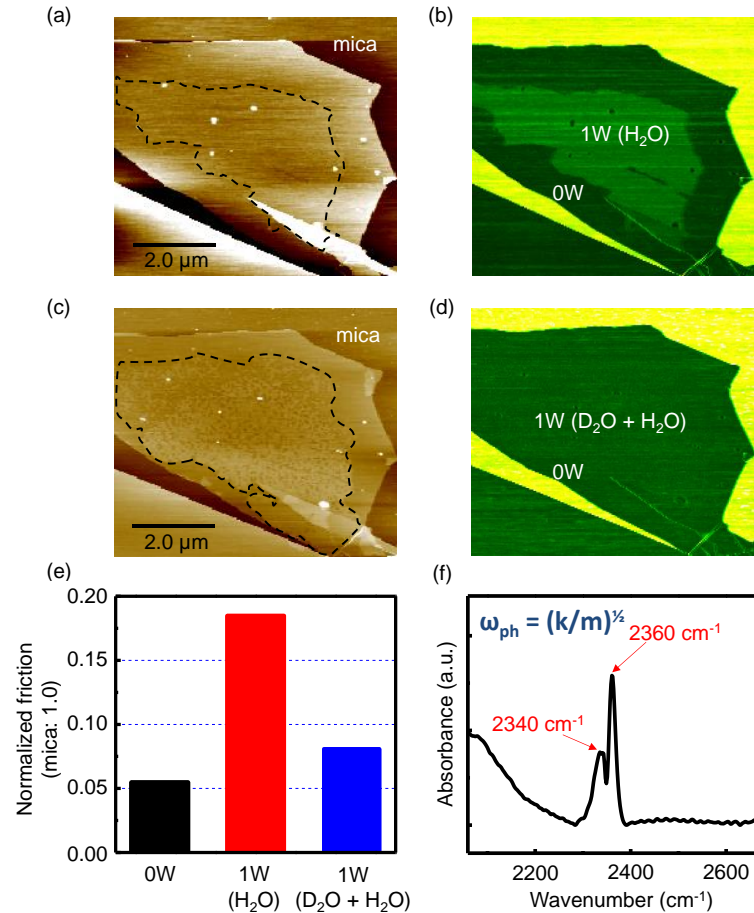
J. Vac. Sci. Technol. B 14, 1285 (1996)

포논에 의한 마찰력

J. Y. Park Group (EWS, KAIST)



J. Y. Park and M. Salmeron, Chem. Rev. 114, 677 (2014)



탐침의 운동에너지가 기판의 포논에너지로 전달되어 사라지는 과정에 마찰력이 관여하는 것으로 알려짐.

계면에서의 포논 전도 및 산란 특성

- 란다우어 수송: 결맞음 열전도 $\kappa(T) = \int_0^\infty \frac{\hbar\omega}{4\pi^2} \text{Tr}(\omega) \frac{\partial f_B(\omega, T)}{\partial T} d\omega$



: Non-equilibrium Green Function approach for phonon transmission

- 마찰력의 경우 Shear 포논 모드의 투과확률과 전도 특성 중요
- 볼츠만 산란: 비결맞음 열전도 Li *et al.*, Comp. Phys. Comm. 185, 1747 (2014)
 - Fourier's law: $j = -\kappa \nabla T$
 - Thermal current density: $j = \sum_p \int f_\lambda \hbar \omega_\lambda v_\lambda \frac{dq}{(2\pi)^3}$
 - Boltzmann transport equation: $\frac{\partial f_\lambda}{\partial t} + v \cdot \nabla f_\lambda = \left(\frac{\partial f_\lambda}{\partial t} \right)_{scattering}$
- 두 이론을 잘 결합시켜야 마찰현상을 이해할 수 있음.

어떤 주제를 연구할 것인가

- 마찰력과 포논의 상관관계 규명 (단기)
- 마찰전기는 왜 발생하는가? (단기)
- Amontons 법칙은 왜 발생하는가? (중기)
- 마찰력, 유체의 저항력, 전기 저항, Radiation 저항 등을 통합할 수 있는 이론은 있는가? (장기)
- 마찰력은 자연계에 존재하는 다섯번째 근본적인 힘인가? (장기)

현대과학이 탄생한지 100여년이 지났지만 아직도 마찰력에 대한 원천적인 이해가 이루어지지 않았음.

경청해 주셔서 감사합니다.