

Magneto-Optical Trap : trapping neutral atoms

Mina Son

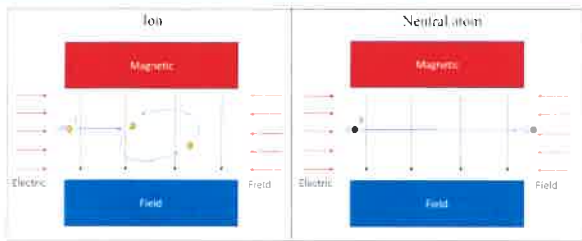
Advisor : Geol Moon

Problem of trapping neutral atom

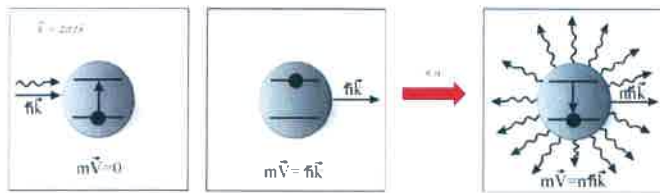
- Slow atom's velocity
- Low kinetic energy
- Reduced collisional perturbation
- Long interaction time
- Large number and high density of atoms

➔ Semi-classic or quantum optics, coherent phenomena, cold collision of atoms, high precision frequency standards

Doppler cooling and Optical Molasses

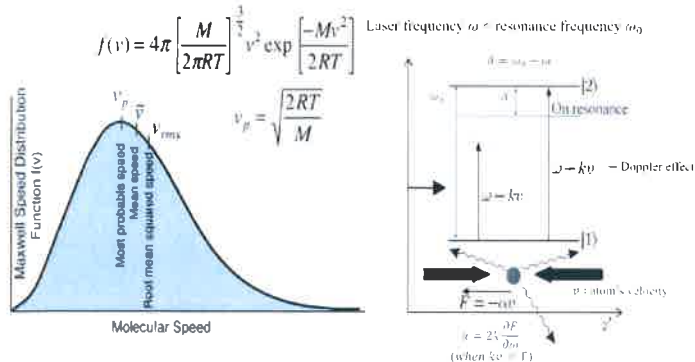


- Transfer of momentum between photon and atom



Isotropic spontaneous emission → Random direction : no net change of momentum (average out)

Total force follows incoming photon



1D Optical Molasses

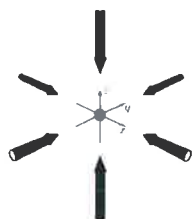
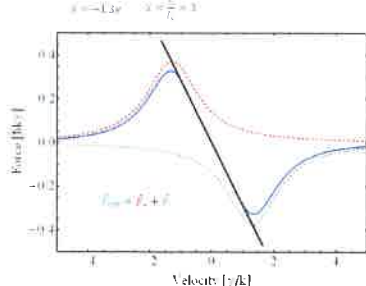
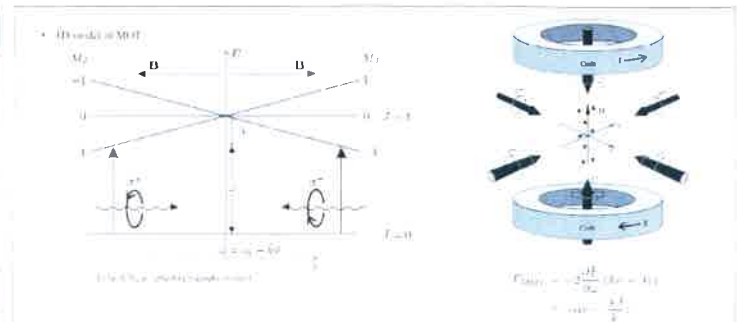
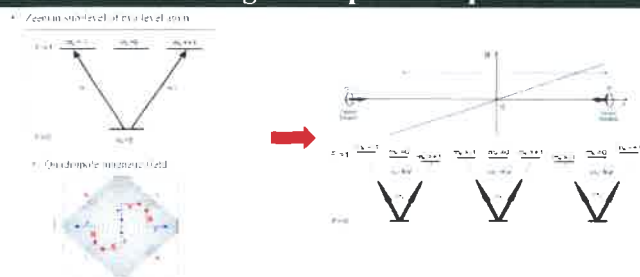


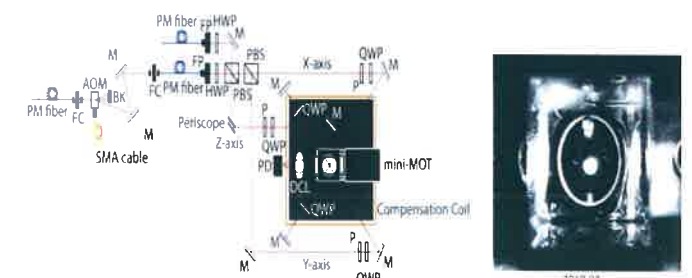
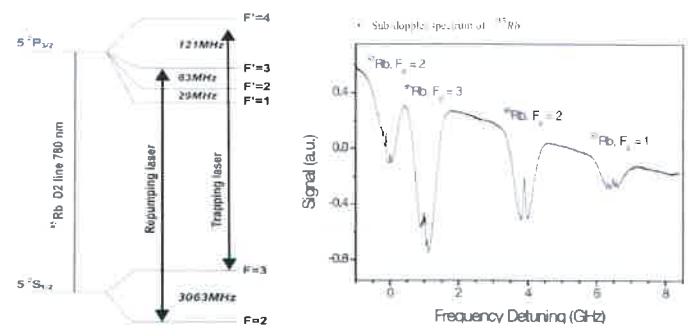
Figure 1: Direction of damping force. Atoms feels like in a viscous fluid - molasses.



Magneto-Optical trap



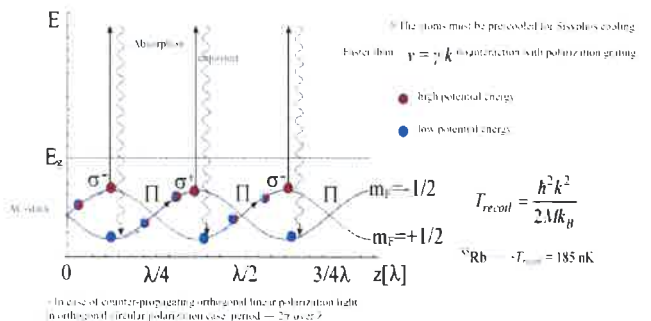
Realization of the MOT



PM fiber: polarization-maintaining fiber, FC: fiber collimator, AOM: acousto-optic modulator, BK: block, M: mirror, FP: fiber port, HWP: half-wave plate, QWP: quarter-wave plate, P: polarizer, PD: photodiode, DCL: double convex lens

Typically τ of atom $10^{-2} \sim 10^{-3}$ s
Temperature: 100 nK scale
Depending on trap parameter

Sub-doppler cooling : Sisyphos cooling



Summary

- Development way to trap neutral atom (make cold atom)
- Optical pressure
- Doppler cooling and Optical molasses
- Magneto-Optical Trap
- Sisyphos cooling (Polarization grating cooling)

Reference

- Foot C.J. Atomic physics (Oxford, 2005)
- Magneto-optical Trap: Fundamentals and Realization, K. Kowalski, V. Cao Long, Dinh Xuan, M. Glodz, B. Nguyen Huu, J. Szont, CMST SI(2) 115-129 (2010)
- Modulation transfer spectroscopy in atomic rubidium, D. J. McCarron, S. A. King and S. L. Cornish, Department of Physics, Durham University, Durham, DH1 3LE, UK Measurement Science and Technology in May 2008
- Sae Mulli (The Korean Physical Society), Volume 35, Number 1, 2006, 274, pp. 163-168



XPS study of van der Waals Antiferromagnet $\text{Co}_{1/3}\text{TaS}_2$

Dayeong Shin, Chaehyeon Park, Prof. Han-Jin Noh

Introduction

XPS(X-ray photoelectron spectroscopy)

XPS is a spectroscopic tool that allows X-rays to be incident on a sample to measure the kinetic energy of photoelectrons emitted out of the sample by photoelectric effect. By measuring the binding energy and the spectral weight of the electron core-level states in the sample, element-specific oxidation number and quantitative ratio of the elements in the sample can be experimentally determined.



Vacuum

Space filled with gas below atmospheric pressure (1 atmosphere). A space with a molecular density of less than $2.5 \times 10^{15} \text{ mol/cm}^3$.

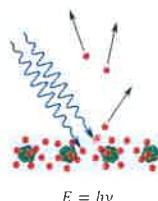
Ultra high vacuum, UHV : below 10^{-9} torr

It takes long enough for molecules to form monolayers on the inner surface of the vacuum container with significantly reduced molecular density. Space-related research, material research, surface analysis, accelerator, nuclear fusion research.

Basic Theory

The photoelectric effect

The photoelectric effect is a phenomenon in which a substance (particle) such as metal is trapped by light, and electrons are released. Electrons in metals are bound by the (+) charge and electrical force of the nucleus. Here, when light is illuminated above the threshold frequency, the photon collides with the electron. In other words, it can be said that electrons colliding with photons protrude from metal. In metals, electrons are emitted at the Fermi level.



Fermi Level

- The highest energy level an electron can have at 0 K
- Energy level with $\frac{1}{2}$ probability of electron presence at any temperature T

Fermi-Dirac distribution function

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_F)/kT}}$$

E_F : Fermi energy, k : Boltzmann constant, T : Kelvin temperature

Principle of XPS



$$E_B = h\nu - e\phi_{sp} - E_K$$

E_B = Binding Energy, $h\nu$ = Energy of X-ray, $e\phi_{sp}$ = Work function of spectrometer, E_K = Kinetic Energy of Photoelectron

Why is the experiment conducted in a vacuum?

Since the surface of the material is sensitive, the experiment must be conducted in a high vacuum to obtain high reliability results. Experiment in a vacuum by clearing the surface of the sample.

Experiment



1. After mounting the sample on a sample plate, put the sample in the load lock.



2. Move the sample into the preparation chamber, cleave it, then transfer it into the main analysis chamber.



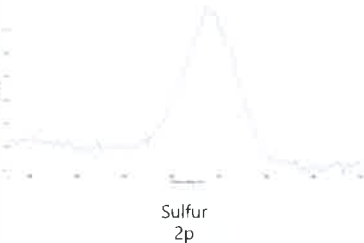
3. Move the sample to a measuring position where it can be measured with an X-ray gun and electron energy analyzer.

** measuring position
X : 4.5
Y : 6.75
Z : 6.2
θ : 100°

4. Turn on the x-ray gun in order, measure it, and check the results.



Result



Sulfur 2p

2p _{1/2} Binding Energy (eV)		Line Positions (eV)	
Compound Type	2p _{1/2}	2p _{1/2}	2p _{3/2}
Sulfide	162.5	162.5	162.5
Sulfate	161.5	161.5	161.5
SF ₆	161.5	161.5	161.5
S ₂	161.5	161.5	161.5
Sulfuric	161.5	161.5	161.5
Monosulfur	161.5	161.5	161.5
Sulfuric	161.5	161.5	161.5

Guidebook's a theoretical value



Tantalum 4f

4f _{7/2} Binding Energy (eV)		Line Positions (eV)	
Compound Type	4f _{7/2}	4f _{7/2}	4f _{5/2}
Ta	20.2	20.2	20.2
Ta ₂ O ₅	20.2	20.2	20.2
Ta ₂ O ₃	20.2	20.2	20.2
Ta ₂ O ₂	20.2	20.2	20.2
Ta ₂ O	20.2	20.2	20.2
Ta ₂ O ₄	20.2	20.2	20.2
Ta ₂ O ₃	20.2	20.2	20.2
Ta ₂ O ₂	20.2	20.2	20.2
Ta ₂ O	20.2	20.2	20.2

Guidebook's a theoretical value

Conclusion

X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) is a surface-sensitive quantitative spectroscopic technique based on the photoelectric effect that can identify the elements that exist within a material (elemental composition) or are covering its surface, as well as their chemical state, and the overall electronic structure and density of the electronic states in the material. At first, we tried to check the presence state of Cobalt in the $\text{Co}_{1/3}\text{TaS}_2$ sample and oxidation number of Cobalt through XPS, but the peak related to Cobalt could not be measured. Cobalt ions on the cleaved surface are changed to a situation attached to the TaS_2 surface, and the inserted Cobalt ions are not strongly bonded but weakly adsorbed, so they seem to diffuse away little by little by collision with other molecules in a vacuum. The pick was not observed well in the experiment. It was measured several times by slightly changing the position and alignment angle of the sample according to the X-ray gun and the analyzer, but it was difficult to measure many valid peaks. The measured peaks were Tantalum 4f and Sulfur 2p, and the presence and the valency of Tantalum and Sulfur were confirmed in the measurement.

CALCULATING ISING MODELS AND FINDING CRITICAL POINTS USING MONTE CARLO METHODS

What makes a magnet a magnet?

오현수, 조겸인
지도교수: 고아라 교수님

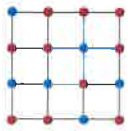
이론적 배경

- '무엇이 자석을 자석으로 만드는가?'에 대한 가장 단순한 모형으로는 1925년 이징이 연구하여 발표한 이징 모형이 있다.
- 2D 이징 모형은 1944년 Onsager가 연구하여 발표했지만 큰 격자 구조에 대해서는 정석적으로 계산하는데 한계가 있다.
- 이 연구에서는 2008년 Jacques Kotze가 발표한 Introduction to Monte Carlo methods for an Ising Model of a Ferromagnet 논문을 참조하여 이징 모형 프로그래밍에 대해 학습해 보았다.
- 논문과 다르게 현재 많이 사용되고 있는 Python 프로그래밍 언어를 이용하여 2D 이징 모형에 대해 프로그래밍 해보았고, 추가적으로 직관적으로 알 수 있도록 그림을 추가해 보았다.

연구 목적

- 작고 유한한 크기의 2D 이징 모형에 대해 직접 계산해보고 일반화시켜 프로그래밍 해보자
- 이징 모형을 계산하는 통계학적인 방법 중 하나인, Monte Carlo 기법을 적용한 이징 모형에 대해 실시간으로 볼 수 있도록 그림형태로 표현해 보자
- Monte Carlo 기법을 이용하여 이징 모형을 계산해주는 프로그램을 만들어 보고, 각 상태들에 대해 E, M, C, X의 평균값들을 그래프로 표현해 보자.
- Cumulant를 이용하여 Transition Point(전이점)를 계산해 보자.

A. 유한한 격자 크기 이징 모형 직접 계산하기



1. 격자 구조의 교차점에 스핀이 하나씩 존재
2. 각 스핀은 스핀 UP과 DOWN 두 상태를 가질 수 있다
3. 각각의 스핀들은 가장 가까운 이웃 스핀과 상호작용을 한다
4. 이터 물질의 특성을 나타내는 것을 통해 상호 작용 한다
 $J > 0$: 서로 평행한 방향 정렬 선호 ($\uparrow\uparrow, \downarrow\downarrow$)
 $J < 0$: 서로 반대 방향 정렬 선호 ($\uparrow\downarrow, \downarrow\uparrow$)
 $J = 0$: 서로 상호 작용 하지 않는 경우
5. 외부 자기장 B가 있을 때 이징 모형의 Hamiltonian은 아래와 같다.

$$H = -\frac{J}{2} \sum_{i,j} \sum_{\langle i,j \rangle} S_i S_j - \sum_i \mu B S_i$$

$$\mu : \text{Spin g-factor} \quad \mu_B : \text{Bohr magneton}$$
6. 이 격자에서는 외부 자기장이 없을 경우에 대한 이징 모형을 따른다

$$H = -\frac{J}{2} \sum_{i,j} \sum_{\langle i,j \rangle} S_i S_j$$

Fig1. 이징 모형의 규칙들

- 랜덤 한 스핀구조를 갖는 10 x 10 격자 그림을 그려보고, 2D 이징 모형 중 가장 단순한 2x2 모형에 대해 직접 계산해 보고 일반화한 LxL 이징 모형에 대해 $\langle E \rangle$, $\langle M \rangle$, $\langle C \rangle$, $\langle X \rangle$ 를 계산하여 그래프를 그려주는 Python 프로그램을 작성해 보았다.

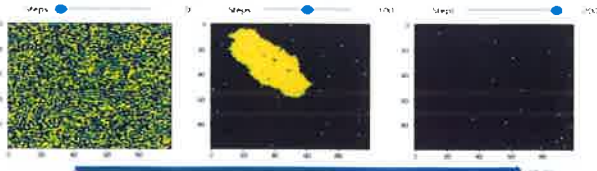


논의 사항

- 2 x 2 이징 모형에 대해서는 상태들의 경우의 수가 16가지, 4 x 4 이징 모형에 대해서는 격자 상태들의 경우의 수가 65536가지, 8 x 8 격자만 되더라도, 2^64 (8 x 8)로 약 1.8 x 10^19가지의 경우의 상태들에 대해 연산이 필요하다. 결국 그 모든 상태들에 대해 Hamiltonian을 계산 후 분배 함수를 계산하는 것은 거의 불가능해지기 때문에 큰 격자의 2D 이징 모형에 대해 계산하기 위해서는 다른 방법이 필요하다.

B. Monte Carlo 기법 이징 모형 변화 관찰

- Monte Carlo 기법을 적용하여 L이 100이상인 L x L 이징 모형에 대해 실시간으로 볼 수 있도록 그림형태로 표현해 보았다.



- (1) 높은 온도에서는 열 때문에 스핀의 방향이 매우 쉽게 바뀌기 때문에 무질서도가 높다.
- (2) 온도가 낮아지기 시작하면 낮은 에너지 상태가 선호되기 때문에 스핀 방향들이 한쪽 방향으로 정렬되려는 경향성을 갖게 된다.
- (3) 온도가 매우 낮아지면 시스템의 상당부분이 정렬 된다.

C. Monte Carlo 기법 이징 모형 결과 비교하기

- Monte Carlo 기법을 적용하여 L=2, 4, 8, 16인 L x L 이징 모형을 계산해 보고, 그래프로 나타내 보았다

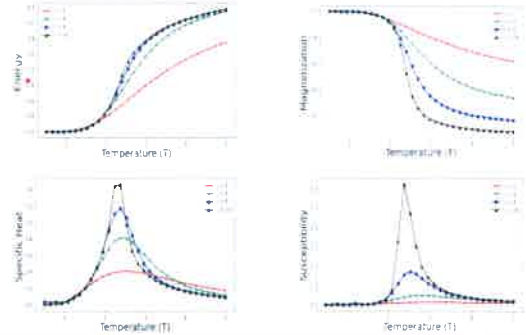


Fig2. Monte Carlo 기법을 적용한 이징 모형 시뮬레이션 결과 그래프

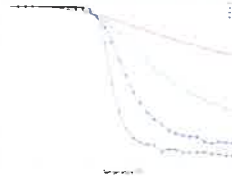
- Fig2와 참조 자료인 Introduction to Monte Carlo methods for an Ising Model of a Ferromagnet 논문 속 그래프들을 보면 논문과 그래프의 모양이 매우 유사함을 알 수 있다.

D. Cumulant를 이용한 전이점을 찾아보자

- 아래의 Cumulant 식을 사용하면 전이점을 찾을 수 있다.

$$U_L = 1 - \frac{\langle M^4 \rangle}{3 \langle M^2 \rangle^2}$$

- 전이점을 계산하여 찾아주는 프로그램을 작성하여 실행해 보았다.



- 위의 그래프를 보면, L=4, 8, 16 그래프는 서로 교점이 있는 반면에, L=2인 그래프만 따로 떨어져 있는 것을 알 수 있다. 때문에 참고 논문에서는 L=2인 경우는 오차가 크다고 판단하여, L=4, 8, 16이 공통으로 지나는 교점의 좌표를 찾았다

- 약 kb T/J = 2.266 - 2.3에서 전이점을 찾을 수 있다. 이 결과값은 정확한 이론 값 $T_c = \frac{2J}{k \ln(1+\sqrt{2})}$ 에서 $\frac{T_c}{J} = \frac{2}{\ln(1+\sqrt{2})}$, 따라서 2.26919값과 0.1% ~ 1.4%의 오차를 갖는다.

논의 사항

- Monte Carlo 기법을 이용하여 이징 모형을 계산하는 많은 논문들이 존재하는데, 논문들마다 Cumulant 식이 다르지만 같은 전이점의 온도 값이 나오는 이유는 무엇일까?

E. 마치며

- 외부 자기장이 없는 강자성체가 어떻게 자석이 되는가에 대한 이징 모형에 의하면, 먼저 격자들의 위치에 따른 입자 간의 상호작용이 같다고 가정하며, 서로 같은 방향으로 스핀이 정렬하면 에너지가 감소함을 이징 모형의 Hamiltonian 식을 통해 알 수 있었다

- 이징 모형의 Hamiltonian 식을 파동함수 Ψ 로 나타낼 수 있지만, 양자역학에서 주 양자수와 계도 양자수를 간단한 기호 n, l 등으로 표기하듯이 이징 모형은 각 입자들이 격자에 고정되어 있다고 가정하므로 스핀에 대한 식으로 간략히 표기할 수 있다는 사실을 알게 되었다.

- Monte Carlo 기법을 적용한 그래프를 살펴보면 $\langle E \rangle$, $\langle M \rangle$, $\langle C \rangle$, $\langle X \rangle$ 등의 물리량들이 시스템 크기 L에 의존한다는 사실을 알 수 있다. 그 중에서 $\langle M \rangle$ 에 대해 자화율에 대한 전개식을 통해 L에 관계없이 일정한 값을 가지도록 만들 수 있는데 이 식이 우리가 연구에서 사용한 Binder Cumulant이다. 하지만 다른 Cumulant 식을 이용해서도 L에 관계없이 일정한 값을 가지도록 만들 수 있다면 동일한 결과를 얻을 수 있다.

참고 자료

- Introduction to Monte Carlo methods for an Ising Model of a Ferromagnet (2008, Jacques Kotze)
- CERN Summer Student Report: Testing Lorentz Invariance Emergence in the Ising Model using Monte Carlo simulations (2017, Maria I. Dias A.)