

# 物理学実験II ブラウン運動

## — 説明会の内容 —

実験の背景

実験の概要

注意事項

安東正樹, 道村唯太, 牛場崇文, 桑原祐也, 小森健太郎

# ブラウン運動研究の歴史

- 1827年 Robert Brown  
花粉から出た微粒子の顕微鏡観察  
微粒子の不規則な運動 → **ブラウン運動**.
- 19世紀後半 水分子の不規則な衝突?  
原子・分子論はまだ仮説段階だった.
- 1905年 Albert Einstein  
**分子運動論** → 液体中の微粒子の運動は観測可能.
- 1908年 Jean Perrin  
コロイド溶液を用いた精密測定で**実験的に検証**.



**原子の実在の証明**：分子運動論、統計力学、  
確率過程の数学の発展の重要な契機。

# 広い意味でのブラウン運動

• 1957年- 久保亮五ら

**揺動散逸定理** → 散逸と熱運動の関係が定式化される。

## ブラウン運動

→ **熱運動に起因する, 巨視的な物理量の不規則な変動.**

### 代表的なもの

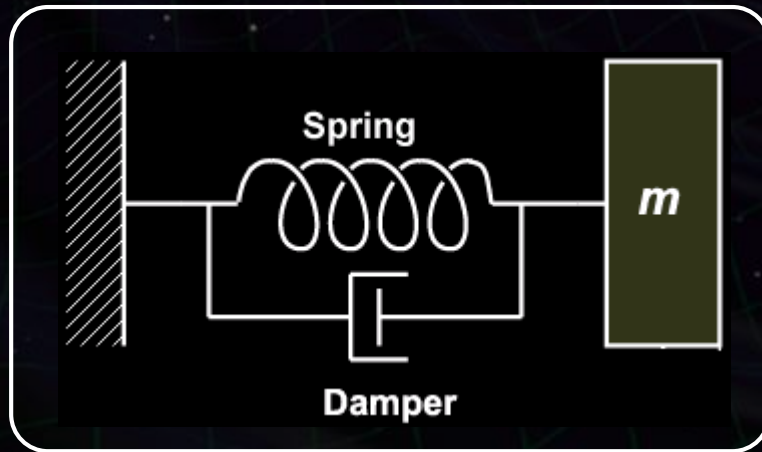
- 調和振動子の熱運動 — 弾性体の熱振動
- 抵抗の熱雑音 (ジョンソン雑音):  
抵抗中の電子の熱運動による雑音

# 揺動散逸定理

## 揺動散逸定理 (Fluctuation-Dissipation Theorem)

弾性体の振動：

減衰のある調和振動子



外界：熱浴

エネルギー  
のやり取り



温度  $T$

エネルギーの散逸 → 外界とやりとりするエネルギーに揺らぎ.



**振動子に加わる熱揺動力**

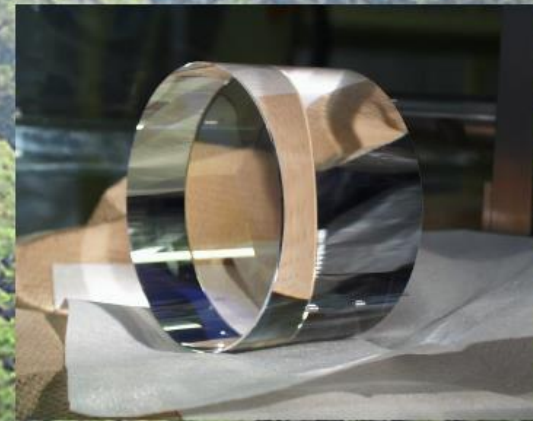
# 熱雑音

## 熱雑音が問題となる実験例 レーザー干渉計重力波検出器

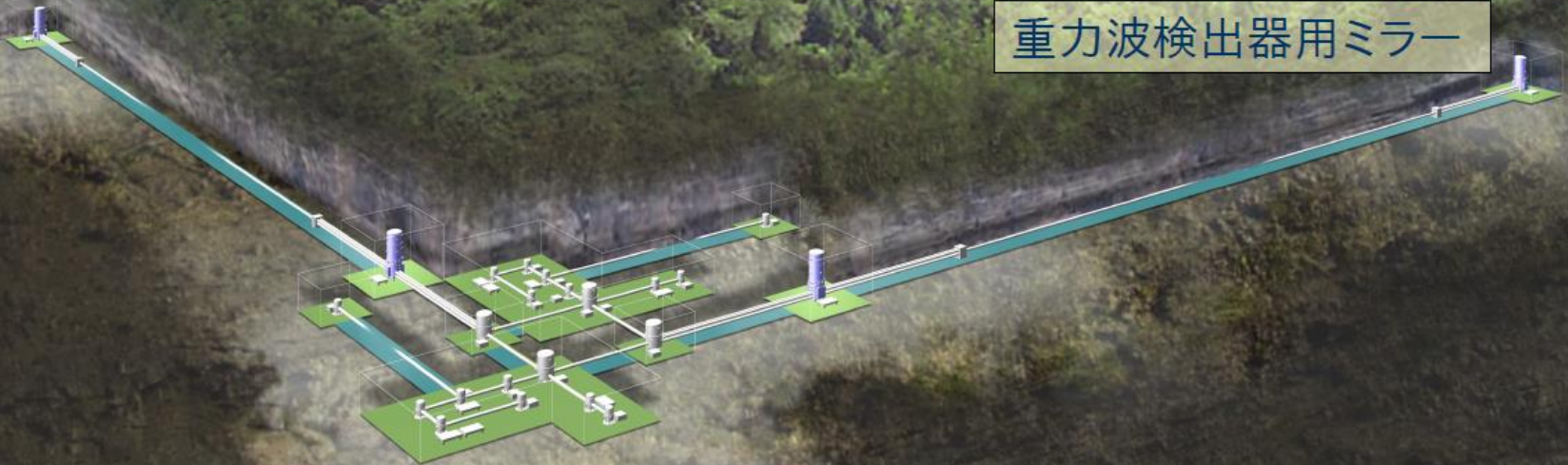
ミラーの各固有振動モードが

$$\frac{1}{2} m \omega_0^2 \overline{x^2(t)} = \frac{1}{2} k_B T$$

のエネルギーをもち熱運動をしている  
(エネルギー等分配則) → 熱雑音



重力波検出器用ミラー



# 本実験の目的

- **本実験の目的:**

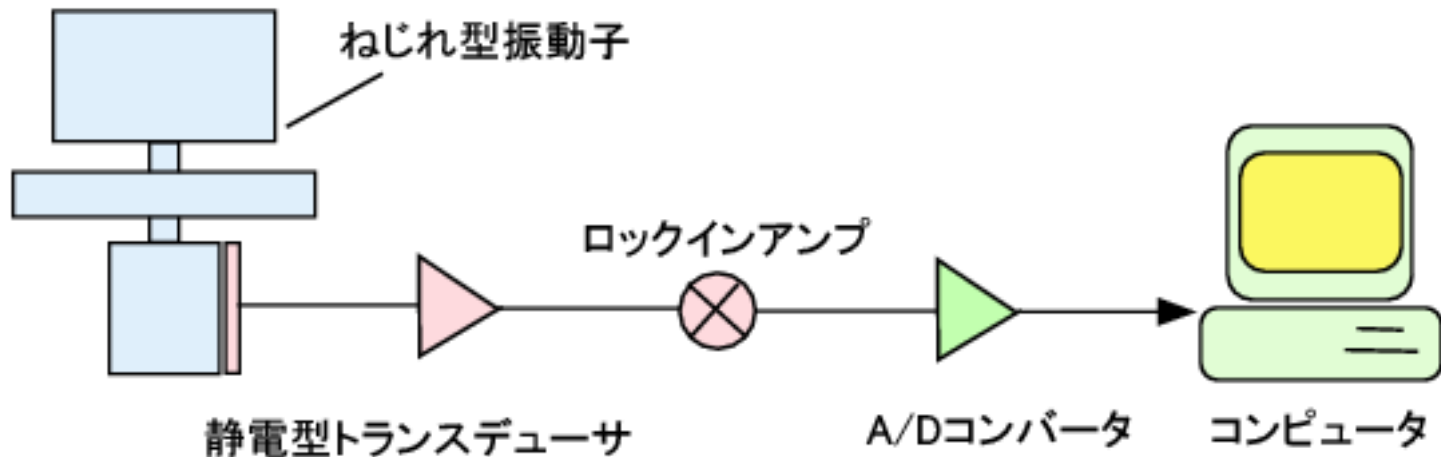
ブラウン運動(熱雑音)の測定を通じて、低雑音計測、データの統計処理の基礎を習得すること。

- **具体的にやること**

弾性体の、 $10^{-14}\text{m}$  程度の微小なねじれ振動を測定し、取得したデータを解析する。

# ブラウン運動の測定

- ねじれ型振動子の熱振動 ( $10^{-14}$  m程度) を測定、解析する.



熱振動

10<sup>-14</sup>m程度の熱振動、  
雑音除去のための真空・防振装置

微小振動検出

振動を電気信号に変換、  
アナログ信号処理

信号の記録・処理

アナログ-デジタル信号変換、  
データの記録・統計解析

# ねじれ型振動子

## •ねじれ型振動子

上下のダンベル状試験マスの  
ねじれ運動を用いる。

- 共振周波数 : 340Hz
- Q値 (共振の鋭さ) :  $3 \times 10^5$

## - 外乱の除去

地面振動:

2重振り子により懸架し防振。

大気・音の影響:

真空槽内に収めて避ける。



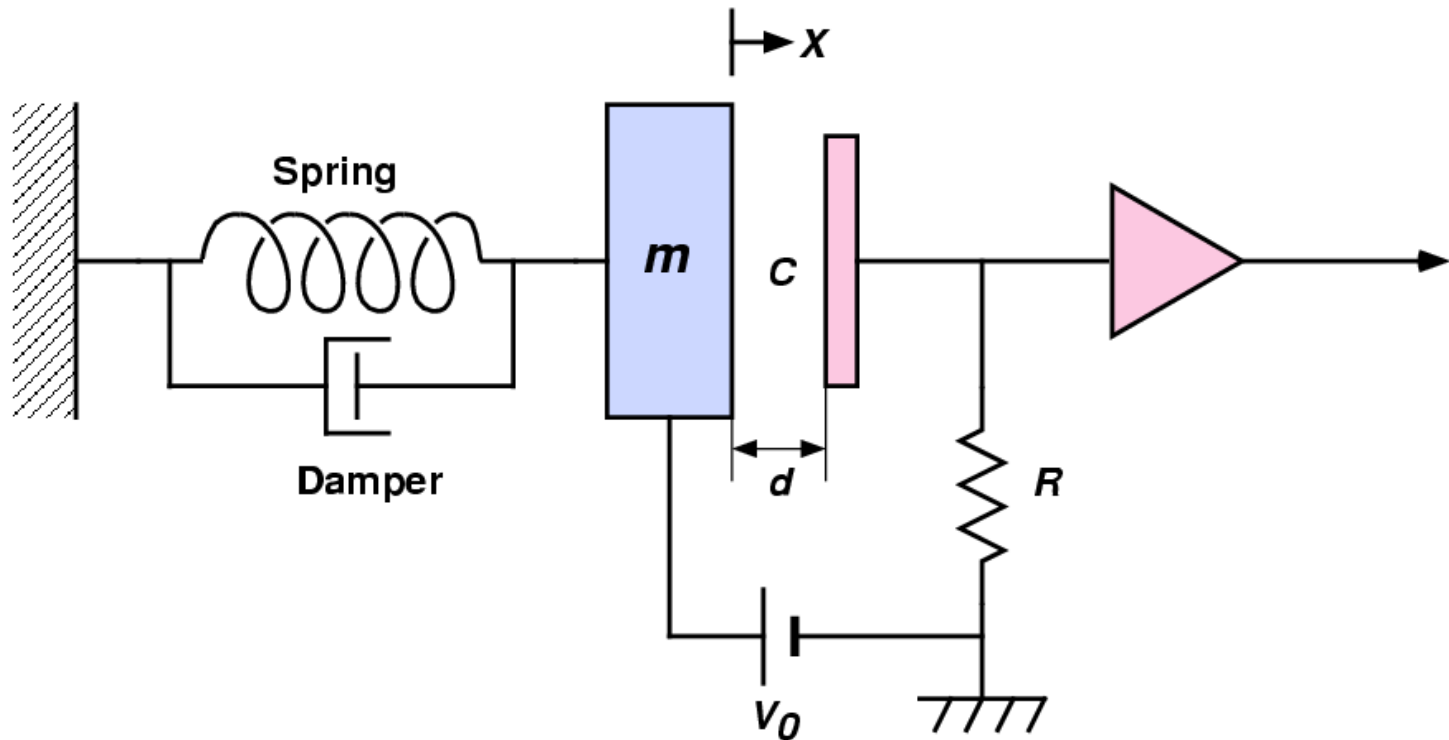


# トランスデューサ

## ・静電型トランスデューサ

微小振動を電気信号に変換

振動 → コンデンサの容量変化として検出.

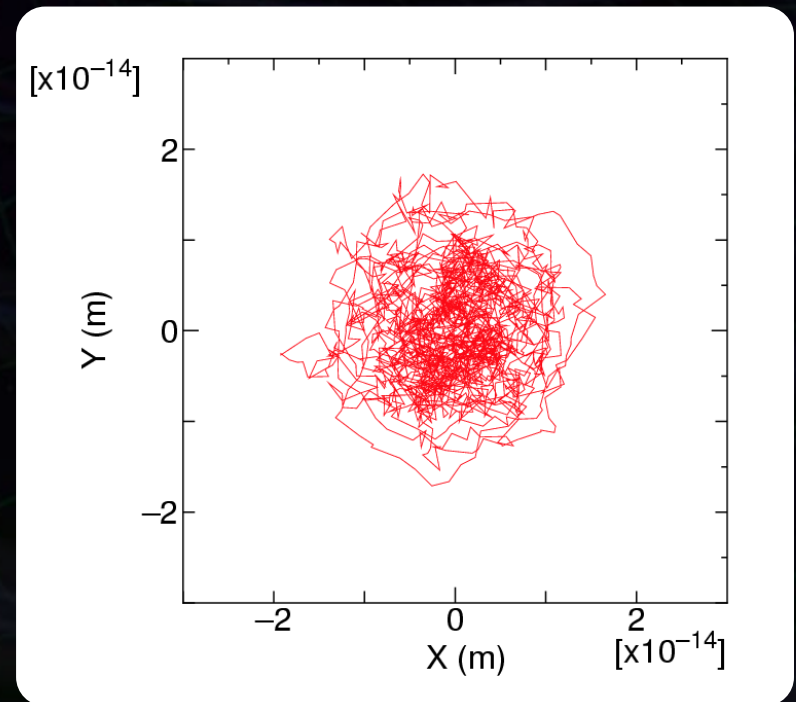


# 信号処理

- **アナログ増幅器** : 信号の増幅・雑音の除去.
- **ロックインアンプ** : 必要な信号 (340Hz付近) のみを取り出す.
- **A/Dコンバータ** : アナログ信号を, デジタル信号に変換・記録.
- **コンピュータ** : 得られた信号を統計処理, 結果を得る



ランダムな運動から  
物理量 (温度) を導く



# 実験の流れ

- 1日目：抵抗の熱雑音の測定。
  - 熱雑音の簡単な例 – 抵抗の熱雑音。
  - アナログ-デジタル変換, コンピュータによる信号処理。
- 2日目：電気-力学結合系の諸特性の測定。
  - 振動子の共振周波数・Q値の測定。
  - トランスデューサの結合による影響（反作用）を知る。
  - 振動子や真空槽の取り扱いを習得。
- 3日目以降：ブラウン運動の測定。
  - ねじれ型振動子のブラウン運動の測定。
  - 測定結果を統計処理し、結果(温度)を求める。

# 注意事項：準備

## ・実験までに

- テキストに目を通す.

\* 実験の趣旨と流れの理解.

\* 実験装置の概要の把握.

\* 効率的な実験.

- 物理学実験 I「真空技術」の復習.

- 物理学実験 I「エレクトロニクス II」の復習.

## ・実験当日

- 関数電卓 (or パソコン)の準備.

- 遅刻しない.

- 積極的に実験を進める.

# 注意事項：レポート

## ・レポートの提出

- 実験終了から二週間以内（遅れた場合は適宜減点）
- レポートの提出が無い場合は0点となる。
- 理学部1号館 603号室・安東まで持参。

## ・レポートの内容

- 必須課題：課題1,3、実験課題2, 6, 7
- 1つ以上の自由課題

自由なテーマでの計算、実験、考察。

必須課題以外の課題、または、自分なりの課題。

- 実験の感想：内容、難易度、改善点などの意見。

# 注意事項：レポート

## ・レポート作成時の注意点

- **長さ**：長ければ良いというわけではない。**要点を簡潔に。**
- **グラフ**：  
計算機出力のグラフは **10個程度を目安に。**  
取ったデータのグラフを羅列するだけでは意味が無い。  
**読む人に何を伝えたいのか熟慮して構成すること。**
- **実験の結果**：  
実験の結果を並べるだけでは意味が無い。  
**どう解釈するのか(考察)、**  
**そこから何が導かれるのか(結論)が重要。**  
**論理的な議論の展開を心がけること。**