

数物系サーバー新歓ミニセミナー Stern–Gerlach の実験から始める量子力学

Toshiya Tanaka

富山大学理学部物理学科

April 4, 2022

はじめに

まず、聴衆のみなさんのバックグラウンドをお尋ねします.

1. 新 B1 の方.
 2. 量子力学なんてなにもわからないよ, という方.
 3. ちょっとだけ勉強したことがあるよ, という方.
 4. 量子力学を完全に理解していて, 冷やかしに来た方.
- 1, 2 あたりの方に向けた雑談程度の講演であることはご理解ください.

Introduction

量子力学の教科書の最初の話は、古典論が破綻する実験事実が書かれることが多い。

伝統的な Introduction

- 黒体輻射 [猪木 94, §1.1]
- 光電効果 [猪木 94, §1.2]
- Compton 散乱 [猪木 94, §1.3], [砂川 91, §1.1, (1)]
- Bohr の原子模型 [猪木 94, §1.6], [砂川 91, §1.1, (2)]

歴史的には重要であるが、破綻する古典論は統計力学・相対論など量子力学を習う段階ではしないのが普通。

今回の Introduction

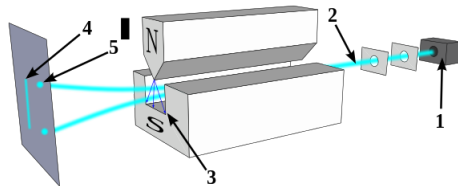
- Stern–Gerlach の実験 [桜井 15], [堀田 21]
- 破綻する古典論は電磁気学

必要な古典論

本講演では、古典ではだめで量子論が必要であるということを感じ覚的に理解することが目的である。そのために必要な古典論の感覚を共有したい。

- 電流は電子の流れであると考える。
- 電流のループがあると磁気モーメント $\vec{\mu}$ が発生する。
- これを z 方向の磁場 $\vec{B} = {}^t(0, 0, B_z)$ の中に入れると、力 $\vec{\nabla}(\vec{\mu} \cdot \vec{B})$ を受ける。
- とにかく、力を受けること、それが内積で与えられることが大事。 fig
- 内積なので、 $\vec{\mu}$ と \vec{B} のなす角 $\theta \in [0, 2\pi)$ による。
- $\theta = 0$ のときに受ける力の大きさを F とすると、 θ の値によって $-F$ から F の力が考えられる。

SGE の装置



SG1 電子発射装置

SG2 電子線

SG3 磁場

SG4 古典論からの予測

SG5 実験結果

Figure 1: SG の実験装置. Wikipedia より拝借.

SGE の結果 1

- 前述した古典論からは、角度 θ に応じて連続的に分布する. (SG4)
- 実際は上下二点のみに等しい強度で現れる. (SG5)

この電子は二種類に分類できて、上の点にゆくものを $|\uparrow\rangle$ 、下の点にゆくものを $|\downarrow\rangle$ と書くことにする。

SGE の結果 2

同じ設定で装置 (SG3) を 90 度傾け、x 方向の測定、y 方向の測定、また、どれでもない斜めの方向の測定を行う。

このとき、結果 1 と同様に測定した方向に二点に分かれる。

最初に z 軸と名付けるのは我々の勝手だから、どの方向を選んでも同じなのは当然のように思うが、古典的に z 方向に決まった磁気モーメントを持っているわけではないということである。

SGE の結果 3

装置を二つ用意して、z 方向の測定を行った後 $|\uparrow\rangle$ だったものに対して、再び z 方向の測定を行うと、 $|\uparrow\rangle$ しか観測できない。 $|\downarrow\rangle$ に関しても同様。

SGE の結果 4

装置を二つ用意して、 z 方向の測定を行った後 $|\uparrow\rangle$ だったものに対して、 x 方向の測定をおこなうことを考える。このとき、電子は x 方向に二点に分かれる。これに名前をつけて、 $|\rightarrow\rangle$, $|\leftarrow\rangle$ と呼ぶことにする。

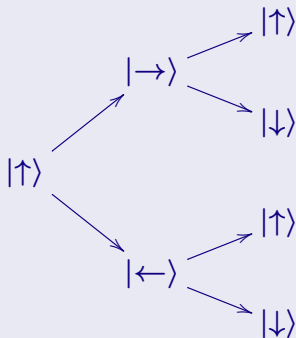
$|\downarrow\rangle$, y 方向に関しても同様。

x 方向の測定と z 方向の測定は関係しないことがわかる。

SGE の結果 5

装置を三つ用意して、 z 方向の測定を行った後 $|\uparrow\rangle$ だったものに対して、 x 方向の測定を行う。この測定で $|\rightarrow\rangle$ だったものに対して再び z 方向の測定を行うと電子は二点に分かれる。

ややこしいので簡単に図にすると次のようになる。



- [砂川 91] 砂川重信. 量子力学. 岩波書店, 1991.
- [桜井 15] 桜井純, Napolitano Jim, 桜井明夫. 現代の量子力学. 物理学叢書 / 小谷正雄 [ほか] 編, No. 109. 吉岡書店, 第 2 版, 2015.
- [猪木 94] 猪木慶治, 川合光. 量子力学. 講談社, 1994.
- [堀田 21] 堀田昌寛. 入門現代の量子力学 : 量子情報・量子測定を中心として. 講談社, 2021.