

基幹物理学 II: 量子力学序論

野村 清英

九州大学 理学部物理

June 2, 2015

量子力学

- ▶ 量子力学：電子，原子や光（電磁波）を扱う学問、
- ▶ 太陽電池，超伝導，レーザーなどに応用。

量子力学

- ▶ 量子力学：電子，原子や光（電磁波）を扱う学問、
- ▶ 太陽電池，超伝導，レーザーなどに応用。
- ▶ 量子力学：「粒子と波動の2重性」

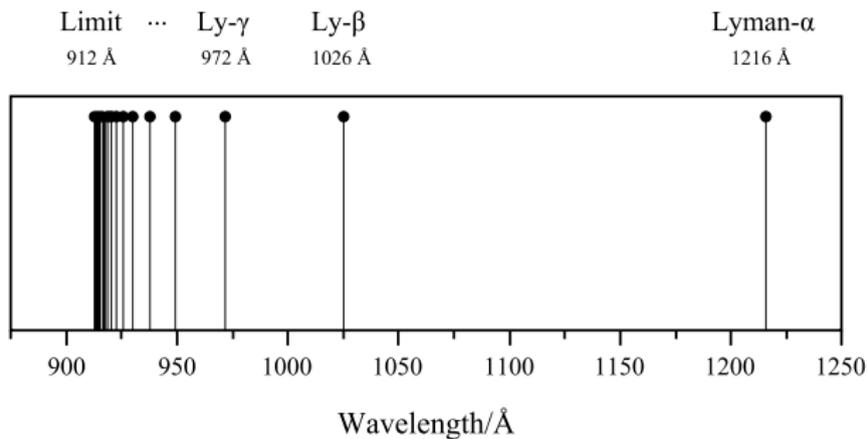
量子力学

- ▶ 量子力学：電子，原子や光（電磁波）を扱う学問、
- ▶ 太陽電池，超伝導，レーザーなどに応用。
- ▶ 量子力学：「粒子と波動の2重性」
 - ▶ 光（電磁波）
 - ▶ 波動性
干渉，回折，偏光
 - ▶ 粒子性
光電効果，コンプトン効果

量子力学

- ▶ 量子力学：電子，原子や光（電磁波）を扱う学問、
- ▶ 太陽電池，超伝導，レーザーなどに応用。
- ▶ 量子力学：「粒子と波動の2重性」
 - ▶ 光（電磁波）
 - ▶ 波動性
干渉，回折，偏光
 - ▶ 粒子性
光電効果，コンプトン効果
 - ▶ 電子
 - ▶ 粒子性
素電荷（ミリカンの実験），比電荷
 - ▶ 波動性
デイビッドソン-ガーマーの実験，菊池

水素原子のスペクトル：ライマン系列



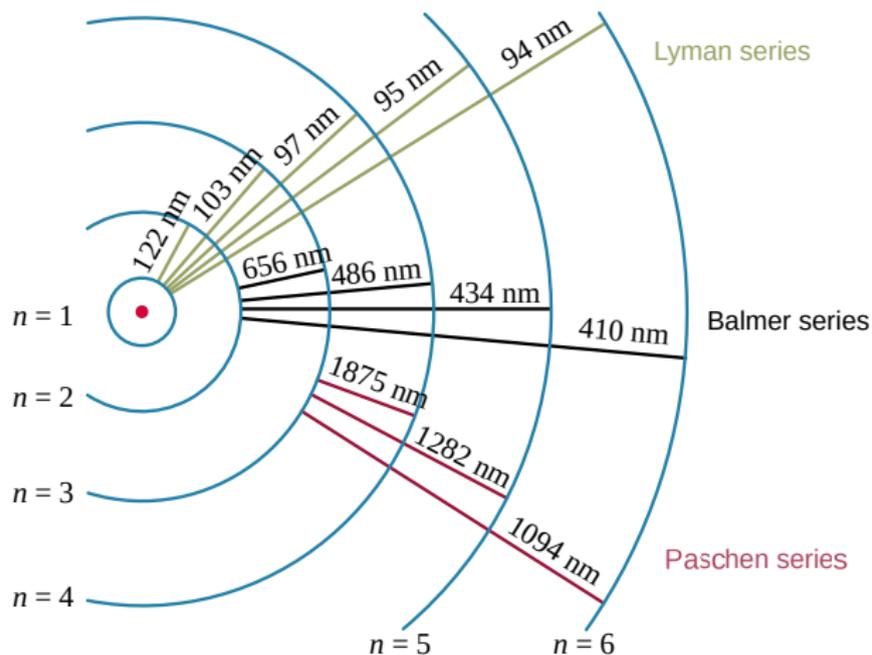
水素原子のスペクトル系列 (紫外線)

水素原子のスペクトル：バルマー系列



可視光 (一部紫外線) での水素原子のスペクトル系列

水素原子のスペクトル:軌道



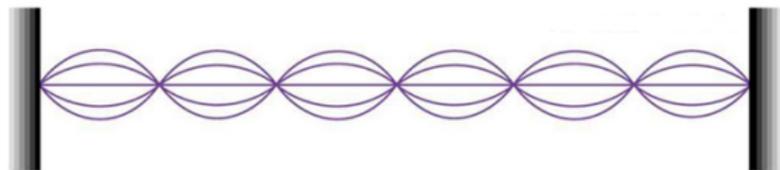
水素原子のスペクトル: Rydberg の公式

水素原子の線スペクトルは以下の公式にまとめられる
Rydberg の公式 :

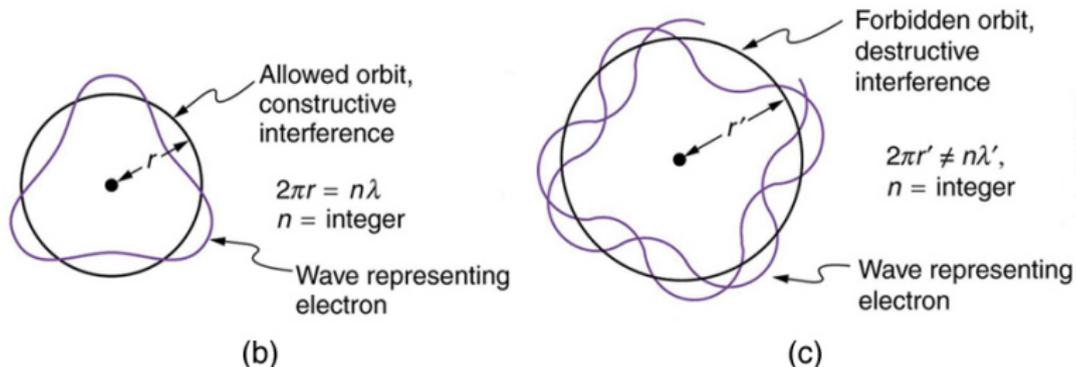
$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (1)$$

(λ : 波長 , m, n : 正の整数)

Bohr の量子化条件



(a)



円軌道に de Broglie 波を当てはめると導出できる。

Bohr の量子化条件

de Broglie 波の波長： λ

円周の長さが波長の整数倍となる条件は

$$2\pi r = n\lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

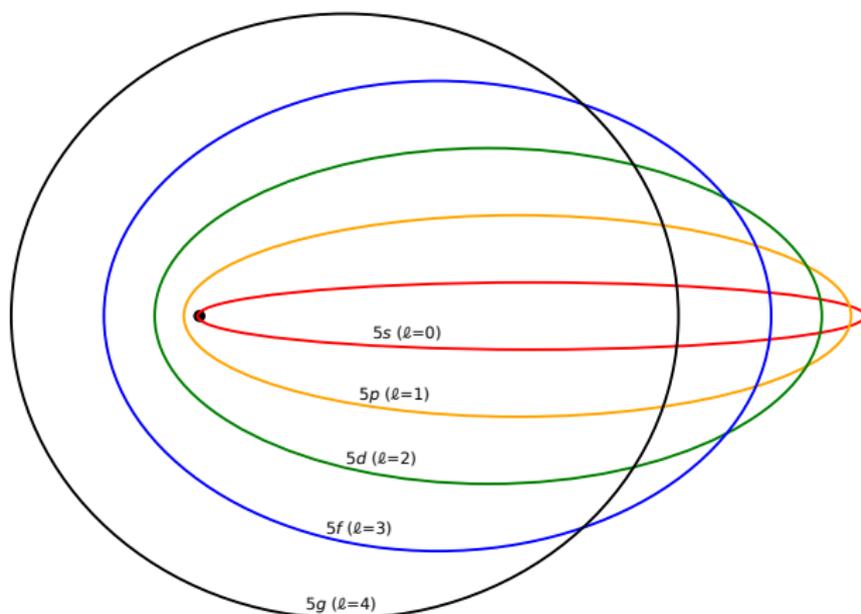
これに $\lambda = h/p$ を代入すると

$$2\pi pr = nh \quad (pr = n\hbar; \hbar = h/2\pi) \quad (3)$$

すなわち、電子の角運動量 pr は \hbar の整数倍 (Bohr の量子化条件) .

Bohr-Sommerfeld の量子化条件

円軌道から，楕円軌道を含む様に拡張



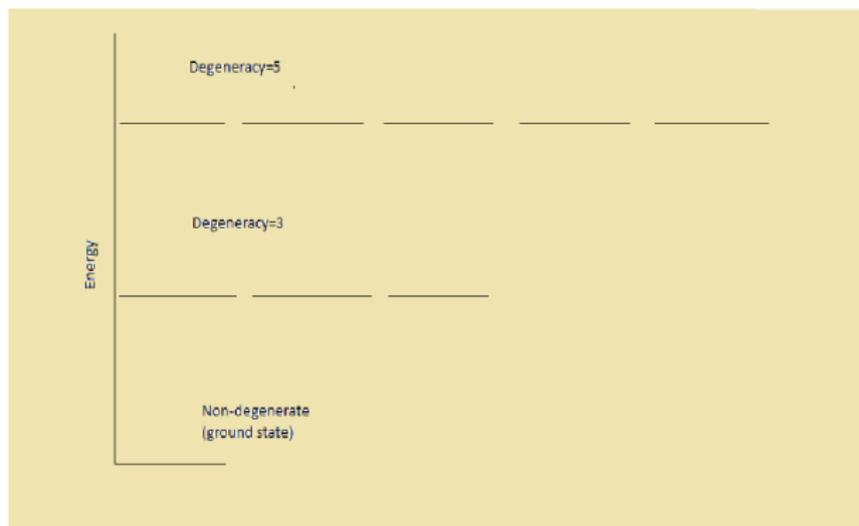
Bohr-Sommerfeld の量子化条件

解析力学を使うと

$$\oint pdq = nh \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (4)$$

スペクトルの縮退度など説明

スペクトルの縮退



スペクトルの縮退:ゼーマン効果

Zeemann 効果 : (縮退している) 線スペクトルが磁場で分裂

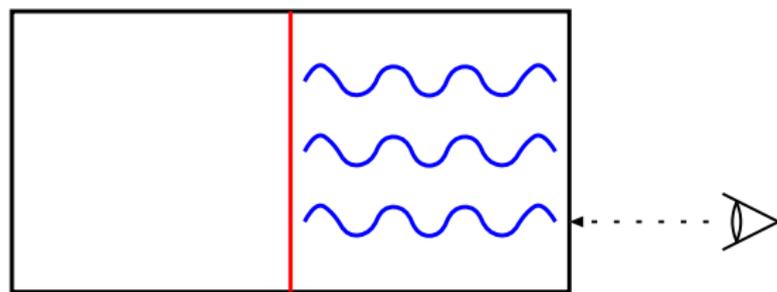


Figure: ナトリウム原子の D 線に対するゼーマン効果 ; 上図 : 磁場なし , 下図 : 磁場あり

粒子、波動、確率、観測

- ▶ 箱の中の1つの光子 観測すると右側に光子1つ (50%)

○



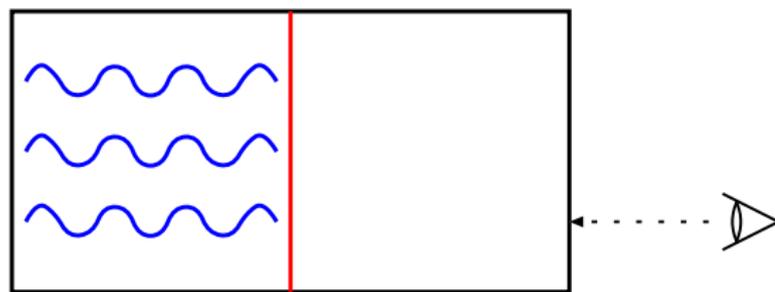
(c)

○

粒子、波動、確率、観測

- ▶ 箱の中の1つの光子 観測すると右側に光子なし (50%)

○



(d)

○

確率解釈とアインシュタインの反発

- ▶ ボルン： 確率解釈 (1926)

確率解釈とアインシュタインの反発

- ▶ ボルン： 確率解釈 (1926)
- ▶ アインシュタイン： 「神はサイコロをふらない」 “ Der Alte würfelt nicht. “

確率解釈とアインシュタインの反発

- ▶ ボルン： 確率解釈 (1926)
- ▶ アインシュタイン： 「神はサイコロをふらない」 “ Der Alte würfelt nicht. “
- ▶ ハイゼンベルク： 不確定性関係 (1927), ガンマ線顕微鏡 (思考実験)

確率解釈とアインシュタインの反発

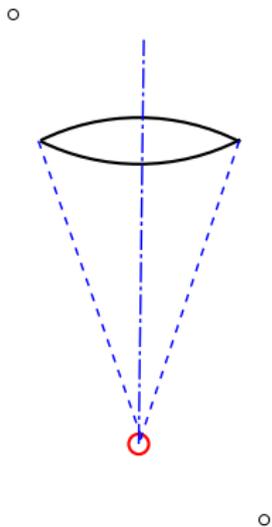
- ▶ ボルン： 確率解釈 (1926)
- ▶ アインシュタイン： 「神はサイコロをふらない」 “ Der Alte würfelt nicht. “
- ▶ ハイゼンベルク： 不確定性関係 (1927), ガンマ線顕微鏡 (思考実験)
- ▶ しかし、アインシュタインは確率解釈に納得できなかった

確率解釈とアインシュタインの反発

- ▶ ボルン： 確率解釈 (1926)
- ▶ アインシュタイン： 「神はサイコロをふらない」 “ Der Alte würfelt nicht. “
- ▶ ハイゼンベルク： 不確定性関係 (1927), ガンマ線顕微鏡 (思考実験)
- ▶ しかし、アインシュタインは確率解釈に納得できなかった
- ▶ アインシュタイン対ボーアの論争

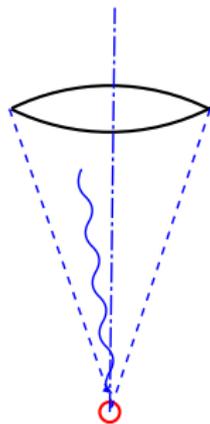
測定、ゆらぎ、確率

ガンマ線顕微鏡で電子を見る



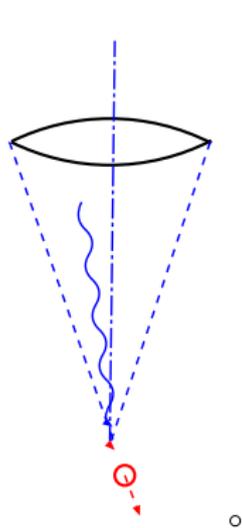
測定、ゆらぎ、確率

ガンマ線顕微鏡で電子を見る



測定、ゆらぎ、確率

ガンマ線顕微鏡で電子を見る



測定により，電子の状態が乱される．

測定、ゆらぎ、確率

- ▶ もっと詳しくは，光 (電磁波) は波動であるが，同時に粒子としての性質を持ち，その運動量 p は

$$p = h/\lambda$$

(λ は光の波長)

- ▶ 位置の測定精度を上げようとして光の波長を短くすると，光子の運動量が大きくなり，光子が電子を跳ね飛ばして電子の運動量が揺らぐ．
- ▶ まとめると

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$$

Δx : 位置の誤差 ; Δp : 運動量の誤差
ハイゼンベルクの不確定性関係

不確定性関係と巨視的量子現象

不確定性関係 \Rightarrow 粒子の零点振動

ミクロな現象だけでなく、マクロ（巨視的）な現象にも

不確定性関係と巨視的量子現象

不確定性関係 \Rightarrow 粒子の零点振動

ミクロな現象だけでなく、マクロ（巨視的）な現象にも

- ▶ ボーズ-アインシュタイン凝縮 (BEC)
 - ▶ 超流動（液体ヘリウム 4 の粘性なしの流れ）,
 - ▶ 超伝導（電気抵抗 0）
 - ▶ レーザー冷却した原子の系

不確定性関係と巨視的量子現象

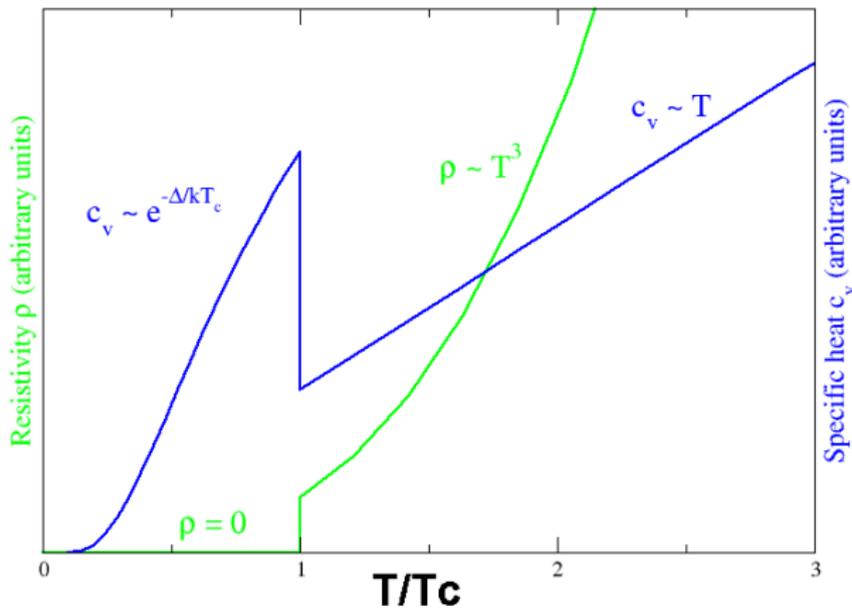
不確定性関係 == 粒子の零点振動

ミクロな現象だけでなく、マクロ（巨視的）な現象にも

- ▶ ボーズーアインシュタイン凝縮 (BEC)
 - ▶ 超流動（液体ヘリウム 4 の粘性なしの流れ）,
 - ▶ 超伝導（電気抵抗 0）
 - ▶ レーザー冷却した原子の系
- ▶ フェルミ縮退
 - ▶ 金属電子（電気伝導，熱伝導）
 - ▶ 白色矮星
 - ▶ 中性子星（さらにクーパー対の BEC で超伝導も）

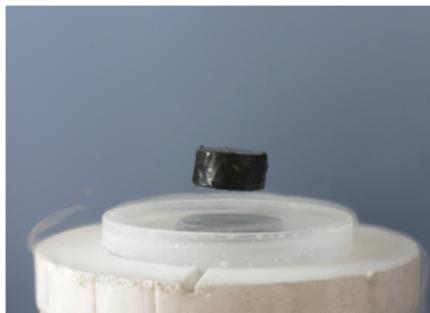
巨視的量子現象- 超伝導

比熱と電気抵抗の温度変化



巨視的量子現象- 超伝導

マイスナー効果



磁気浮上の動画

巨視的量子現象- 超伝導

マイスナー効果の動画

自然放射，誘導放射

アインシュタイン (1916,7) 「放射の量子論」

原子が不連続なスペクトル (エネルギー準位)

基底状態 (最低エネルギー) と励起状態

- ▶ 光を吸収，基底状態 \rightarrow 励起状態
- ▶ 逆に 励起状態 \rightarrow 基底状態
 - ▶ 自然放射
 - ▶ 誘導放射

入射した光子の刺激で励起状態 \rightarrow 基底状態 .

初め 1 個あった光子が 2 個 (同じエネルギー，運動量)

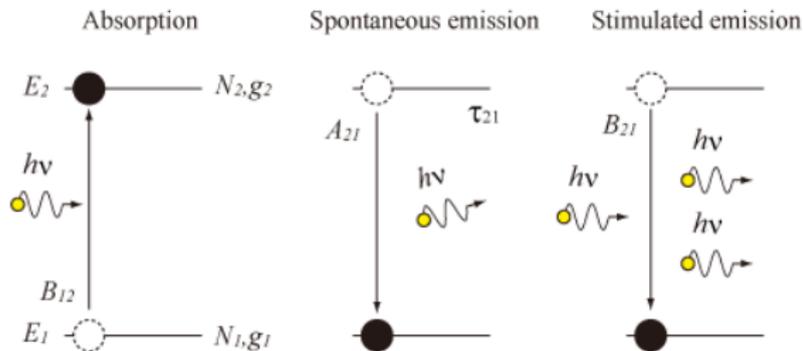
自然放射，誘導放射

アインシュタイン (1916,7) 「放射の量子論」
原子が不連続なスペクトル (エネルギー準位)
基底状態 (最低エネルギー) と励起状態

- ▶ 光を吸収，基底状態 → 励起状態
- ▶ 逆に 励起状態 → 基底状態
 - ▶ 自然放射
 - ▶ 誘導放射

入射した光子の刺激で励起状態 → 基底状態 .

初め 1 個あった光子が 2 個 (同じエネルギー，運動量)



自然放射，誘導放射

- ▶ 1917 年

プランクの公式と辻褃を合わせるには，吸収と自然放射だけでなく誘導放射が必要（アインシュタインの B 係数）。

自然放射，誘導放射

- ▶ 1917 年
プランクの公式と辻褃を合わせるには，吸収と自然放射だけでなく誘導放射が必要（アインシュタインの B 係数）。
- ▶ 1928 年
Rudolf W. Ladenburg は誘導放出および負の吸収という現象が存在することを確認した。

自然放射，誘導放射

- ▶ 1917 年
プランクの公式と辻褃を合わせるには，吸収と自然放射だけでなく誘導放射が必要（アインシュタインの B 係数）。
- ▶ 1928 年
Rudolf W. Ladenburg は誘導放出および負の吸収という現象が存在することを確認した。
- ▶ 1939 年
Valentin A. Fabrikant は誘導放出を使って「短い」波長を増幅できる可能性を预言した

自然放射，誘導放射

- ▶ 1917 年
プランクの公式と辻褄を合わせるには，吸収と自然放射だけでなく誘導放射が必要（アインシュタインの B 係数）。
- ▶ 1928 年
Rudolf W. Ladenburg は誘導放出および負の吸収という現象が存在することを確認した。
- ▶ 1939 年
Valentin A. Fabrikant は誘導放出を使って「短い」波長を増幅できる可能性を予言した
- ▶ 1947 年
ウィリス・ラムと R. C. Retherford は水素スペクトルに明らかな誘導放出を発見し、誘導放出について世界初のデモンストレーション

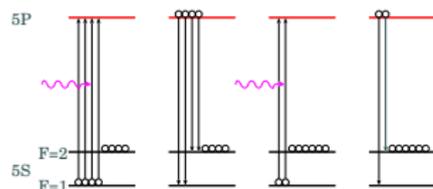
自然放射，誘導放射

- ▶ 1917 年
プランクの公式と辻褃を合わせるには，吸収と自然放射だけでなく誘導放射が必要（アインシュタインの B 係数）。
- ▶ 1928 年
Rudolf W. Ladenburg は誘導放出および負の吸収という現象が存在することを確認した。
- ▶ 1939 年
Valentin A. Fabrikant は誘導放出を使って「短い」波長を増幅できる可能性を予言した
- ▶ 1947 年
ウィリス・ラムと R. C. Retherford は水素スペクトルに明らかな誘導放出を発見し、誘導放出について世界初のデモンストラーション
- ▶ 1950 年
アルフレッド・カストレル（1966 年ノーベル物理学賞受賞）は光ポンピング法を提案し、数年後に Brossel、Winter と共に実験で確認

誘導放射とレーザー

反転分布 (励起状態の方が数が多い) → 誘導放射の連鎖反応, 増幅 → レーザー

▶ 光ポンピング



ルビーレーザー, YAG レーザー

▶ 半導体レーザー

半導体の pn 接合領域の両端から電子と正孔を加え、再結合で光子放出

▶ 放電による励起

炭酸ガスレーザー, ヘリウムネオンレーザー

EPR の逆説

- ▶ 1935 年、アインシュタイン、ポドロフスキー、ローゼン (EPR) は、量子力学に対する逆説を提案。
- ▶ 粒子を直接測定する → 相互作用で揺らぎ → 不確定性

EPR の逆説

- ▶ 1935 年、アインシュタイン、ポドロフスキー、ローゼン (EPR) は、量子力学に対する逆説を提案。
- ▶ 粒子を直接測定する → 相互作用で揺らぎ → 不確定性
- ▶ 間接測定
双子の粒子

EPR の逆説

- ▶ 1935 年、アインシュタイン、ポドロフスキー、ローゼン (EPR) は、量子力学に対する逆説を提案。
- ▶ 粒子を直接測定する → 相互作用で揺らぎ → 不確定性
- ▶ 間接測定
双子の粒子 → 片方を測定

EPR の逆説

- ▶ 1935 年、アインシュタイン、ポドロフスキー、ローゼン (EPR) は、量子力学に対する逆説を提案。
- ▶ 粒子を直接測定する → 相互作用で揺らぎ → 不確定性
- ▶ 間接測定
双子の粒子 → 片方を測定 → もう片方の状態がわかる。

EPR の逆説

- ▶ 1935 年、アインシュタイン、ポドロフスキー、ローゼン (EPR) は、量子力学に対する逆説を提案。
- ▶ 粒子を直接測定する → 相互作用で揺らぎ → 不確定性
- ▶ 間接測定
双子の粒子 → 片方を測定 → もう片方の状態がわかる。
- ▶ 特殊相対論と矛盾?
- ▶ 量子力学は不十分?
隠れた変数?(ブラウン運動との連想?)

EPR 測定 – 双子粒子

- ▶ EPR の思考実験 双子粒子の発生

-

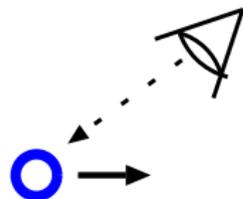


-

EPR 測定 – 双子粒子

- ▶ EPR の思考実験 十分遠くになってから片方を観測

○



○

EPR 測定 – 実験

- ▶ ボームの提案 (1951)
EPR の「思考実験」をもっとわかりやすいものに、スピン・シングレット使う
- ▶ ベルの不等式 (1964)
隠れた変数の有無の判定条件
- ▶ アスぺの実験 (1982)
カルシウム原子の励起状態のカスケード崩壊
ベルの不等式の破れ → 量子絡み合い
- ▶ ザイフの実験 (2000)

EPR 測定 – 応用

- ▶ 量子テレポーテーションの理論
ベネット (1993)
EPR 対を 2 つ用意し、片方で観測して古典的に情報送るとも
う一方で元の量子状態再生できる
- ▶ 量子テレポーテーションの実験
インスブルック大学、ローマ大学 (1997)
カリフォルニア工科大学 (1998)
- ▶ 原子の量子テレポーテーション
インスブルック大学 (2004) : カルシウム原子
米国立標準技術研究所 (2004) : ベリリウム原子
- ▶ 盗聴、偽造のできない通信 ?!
- ▶ 重力波アンテナ

量子力学の解釈

- ▶ コペンハーゲン解釈 ← 意識を前提？
- ▶ 多世界解釈：エヴァレット (1957)
- ▶ デコヒーレンス理論