量子力学を学ぶ

現代技術の基礎にもなりつつあるミクロな世界の力学は量子力学で記述されます。
ニュートン力学は量子力学に現れるプランク定数をゼロとした極限で成立するマクロな世界の力学です。
トランジスタ、ナノテクノロジー、超伝導、化学反応、物質設計の基礎となる量子力学を現代人の基礎知識として広く学ぶべきではないでしょうか？

従来の量子力学教育

数学の言葉を用いて、

$$i\hbar\frac{d\psi}{dt}=H\psi \qquad H=-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2+V(\vec{x})$$

といった形で表現される理論を専門家以外に分かれというのは困難です。
特に複素数で表される波動関数はなかなかイメージできません。

可視化による高校生向け量子力学教材

稲垣知宏、中村純、山根阿樹、伊藤亮平 (広島大)、Bernd Thaller (Graz 大)

FLASH コンテンツ

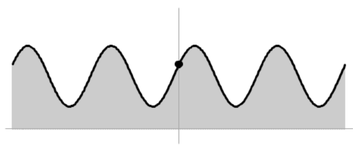
QTムービー

光と電子の振る舞いというのはいささか複雑です。この複雑な振る舞いを数学的にどのように表現するのか？それが問題です。

量子力学によって記述される物理現象を多くの高校生に理解してもらうにはどのようなやり方が適当でしょうか。高等学校の初年度で学習する数学までを前提知識とし、三角関数等は利用することにします。重要なのは用いた数式の物理的な意味です。用いた数式を数値的に処理し、その結果を可視化、アニメーション化、もしくはインタラクティブなコンテンツによって表現することで、容易に数値的な特徴を読み取ることができます。ここでは、基本的な波と粒子の性質について、それを表現する数式とその数値的な特徴を読み取る事から始めていき、量子力学で記述される光と電子の振る舞いの特徴を物理的に理解するための教材作成を目指します。

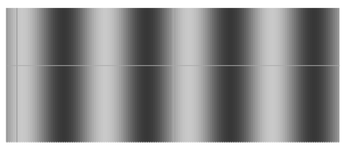
1 次元の波の可視化

波の振幅を線グラフで可視化します。



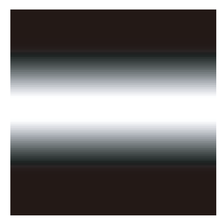
2 次元の波の可視化

波の振幅、もしくは強度をグレーの濃淡で可視化します。



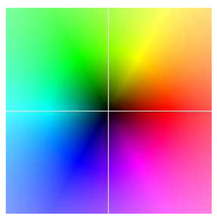
粒子ビームの可視化

粒子数密度、もしくは運動量密度をグレーの濃淡で可視化します。



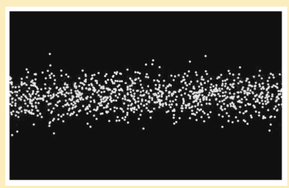
複素数の可視化

粒子ビームの中の粒子の運動は波として記述されます。いつでも、この波は２つの値で記述される２次元の波です。
この波としての性質を可視化するために色を使います。
位相→色合い、大きさ→明度



1 . 波と粒子ビーム

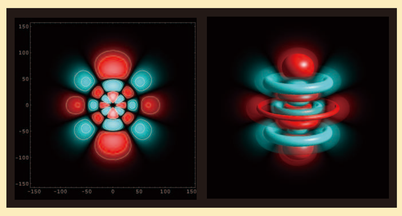
光の流れにおいてはまず波としての性質が、電子のビームにおいてはまず粒子としての性質が現れます！！
今日において、電子だけでなく光子も粒子として記述されますし、その力学的な運動は波の広がりによって記述されます。



1. アニメーションを見てください。図は正弦波を示しています。x軸とy軸の長さのスケールを決めることができますか？
2. アニメーションでは波は平均の高さu_0を中心に振動します。図から平均の高さu_0を求めなさい。
3. 波の速度が波数と角振動数にどのように依存しているかアニメーションを使って調べましょう。波の速度は振幅に依存していますか？黒い点が振動する速度は振幅に依存しますか？波数が負になるとどうなるでしょう？
4. 波の速度を表す公式を求めなさい。
5. グラフにおける黒い点の振動を表す式を求めなさい。波の高さは時間の関数としてどのように記述されますか？

5 . 水素原子

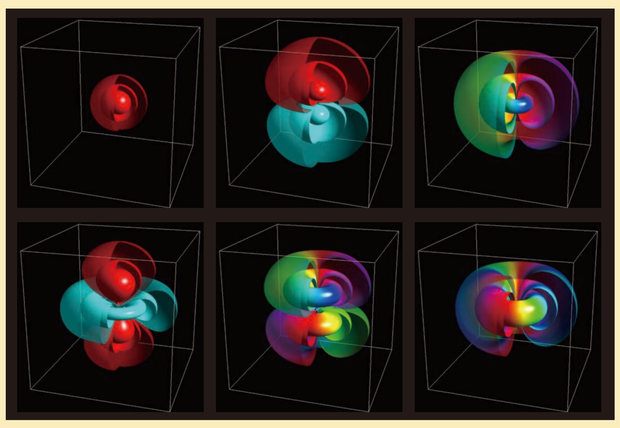
水素原子は原子の中で最も単純なものです。水素原子中での電子の可能な"結合状態"は、波動関数によって表されます。



三次元空間での波動関数の性質の全てを一つの図に示すことはできません。ここでは、複数の方法で波動関数の振る舞いを示すことにします。
上の左側の図は三次元の波動関数の断面図です。補色の関係にある赤と空色は、その断面において波の位相が反対方向になっていることを表しています。等値線上では波動関数の絶対値は一定です。
上の右側の図は三次元中での波動関数の形を表しています。環状の面は強度の等値面です。等値面における波動関数の絶対値は一定です。位相角はこれまでと同様に色によって表されています。

従来の量子力学教育では、波動関数に境界条件を付けてシュレーディンガー方程式を解くための数学的な準備に時間を費やしていました。

下図は、水素原子中の電子が取ることのできる状態の一部です。波動関数がゼロの面は定在波の振動の節です。ここで挙げた例ではゼロの面は球、平面、あるいは双円錐になっています。

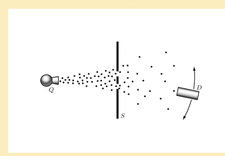


2 . ダブルスリット実験

この実験の目的は、個々のスリットから出てくる二つの波相互の影響（干渉）を見ることです。

波の場合：

粒子ビームの場合：



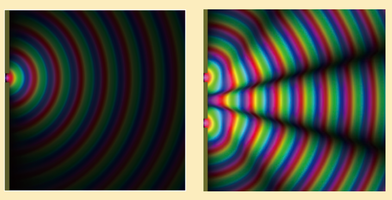
波の場合の波長依存性と粒子の場合の運動量依存性を比べてみましょう。

波はダブルスリットの後ろでも波の山と波の谷の連続した動きとして見ることができます。このような振る舞いは、粒子ビームにおいては決して見ることができないので、言及しておく必要があります。
重要なのは、"強度"の概念をここで取り上げることです。与えられた場所での波の強度は、その場所での振幅の二乗です。光の場合、強度は明度を表します。強度は量子力学的な波でも観測されます。しかし、量子力学的な波の値は原則的に観測することができません。

生徒と一緒にできること：波が打ち消しあう方向の計算。

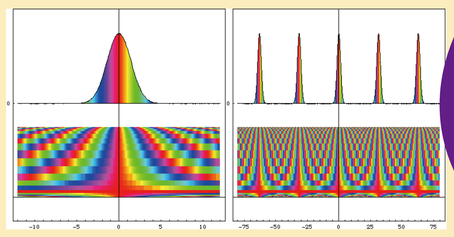
3 . 波と粒子の二重性

同じ光源からの複数の粒子ビームが重なると干渉模様が発生します。これを説明するには、"波ではない"粒子密度を示す量と干渉を発生させる波の性質を持つ量が必要です。



4 . 波束の運動

異なる波長を持つ数多くの平面波の干渉によって、空間的にはっきりと局在化した波の山が発生します。



自習用課題

教師のためのヒント

まとめ

1．高校生向け量子力学教育サイトを構築
　オーストリアの実践例にあるドイツ語コンテンツを翻訳
　ＦＬＡＳＨコンテンツの新規開発
2．数学に頼ることなく現象の本質を理解するために可視化で工夫
　複素数のカラーマップにより波動関数の位相変化に対する物理的な理解

今後の展開

1．実践による効果測定とデータ収集（高大連携、夏季集中講座？）
2．直訳から分かりやすい日本語へ
3．ＱＴムービーからＦＬＡＳＨムービーへの変換
4．ｅラーニングによる自主学習システム
5．他のコースを検討