

# 第2回サイエンスバトル 「猫に捧げるサイエンス」

谷村省吾の部

「猫と電子はゲージ場を知っている」

2017.05.08

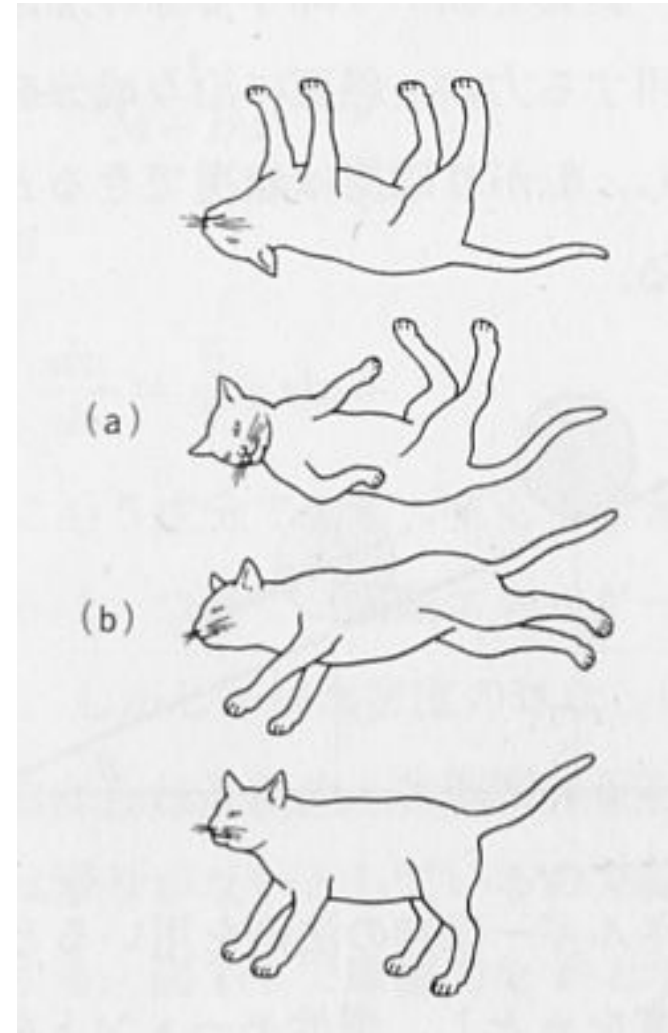
東京都港区西麻布 SuperDeluxe

# 自己紹介：谷村省吾 (たにむら・しょうご)

- 1967年、名古屋生まれ
- 1990年、名古屋大学工学部応用物理学科卒業  
主に物性物理を学んだ。わずかに鉄を含んだ金や銅の電気抵抗の理論が卒業研究のテーマだった。
- 1995年、名古屋大学大学院理学研究科物理学専攻修了  
素粒子論研究室（E研）にいた。猫の宙返りのゲージ理論について修士論文を書いた。
- 東京大学で学振ポスドク。3ヶ月だけの東京暮らし。
- 京都大学助手・講師、大阪市立大学助教授、京都大学准教授を経て、2011年から名古屋大学教授。
- プリマス大学（イギリス）、MIT（アメリカ）、ウズベキスタン大学などを短期訪問。
- 専門分野は、量子基礎論・量子情報科学・力学系理論・微分幾何学と圏論の物理への応用

# 猫の宙返り

猫の脚を天に向けて持ち上げ、そっと手放すと、猫は空中で向きを変えて、脚を地に向けて着地する。



イラスト：戸田盛和 『物理入門コース1 力学』（岩波書店）

猫の宙返りの高速度撮影：ブログ「271828の滑り台Log」より

[http://blog.goo.ne.jp/slide\\_271828/e/166ecb4e532ac8618c77bb5d13c86059](http://blog.goo.ne.jp/slide_271828/e/166ecb4e532ac8618c77bb5d13c86059)

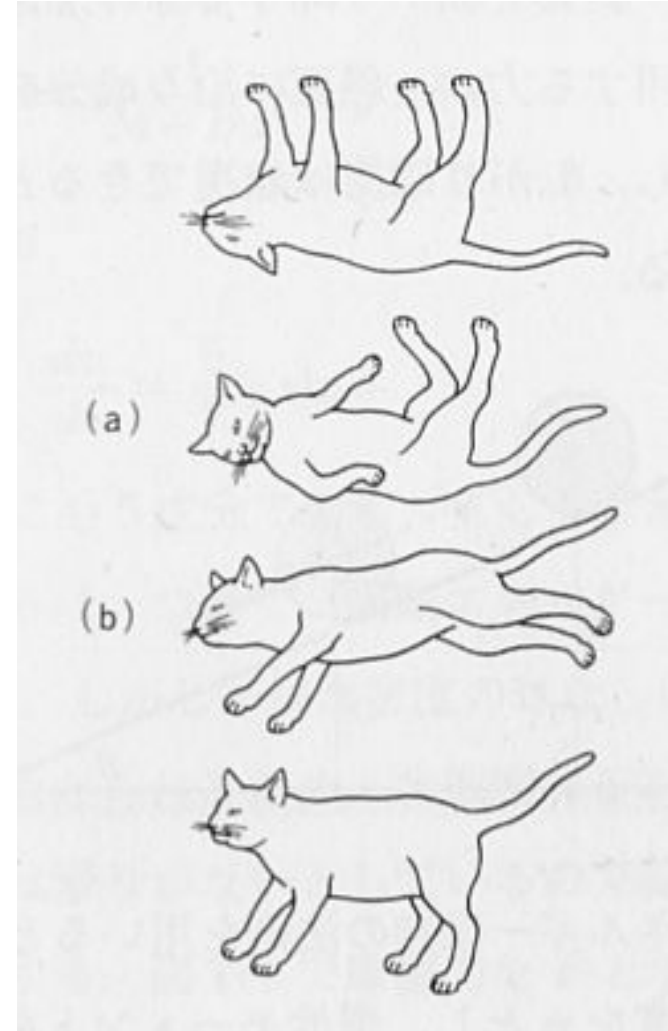
YouTube で観る

# 猫の宙返りのパズル

力学には角運動量の保存則  
(慣性の法則の一種) という法則がある。

自由落下中、外力のトルクはゼロで、回っているものはいつまでも回り続け、止まっていたものが勝手に回り出すことはないはず。

初速度ゼロの猫はどうして回転できるのか？



# 猫の宙返りのポイント

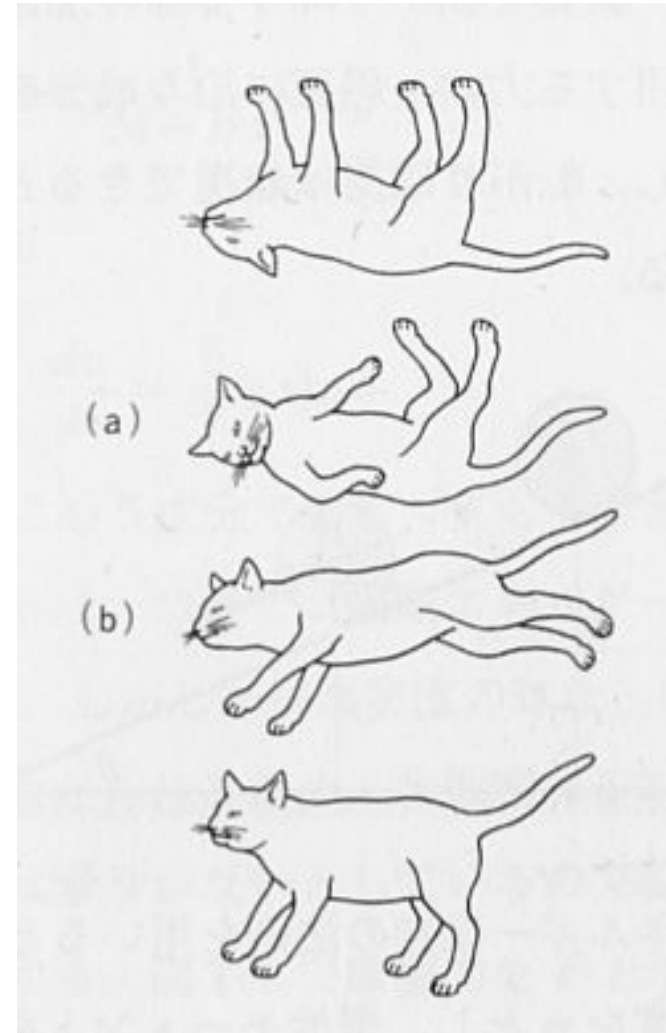
拘束条件：角運動量ゼロ

猫は体形を変えられる。

体形は、初期形状 = 終形状

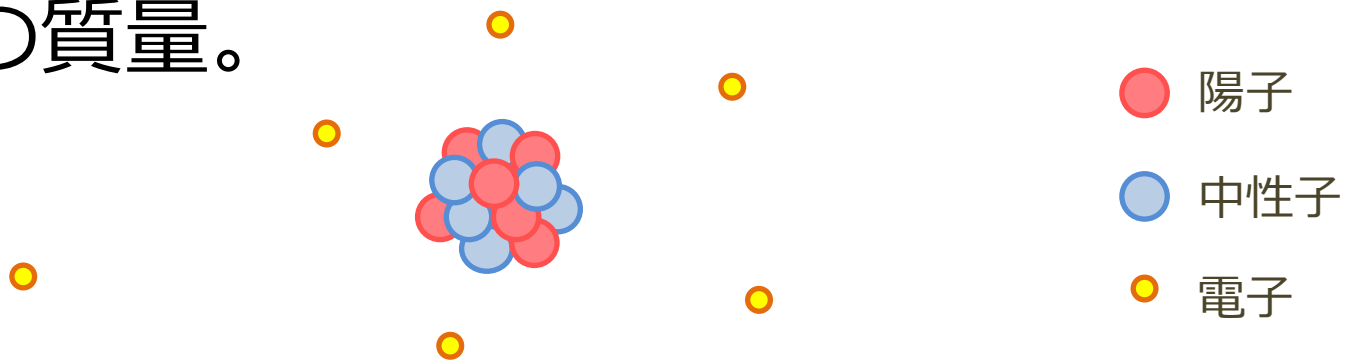
体の形は元に戻った。しかし、体全体の向きが元に戻らない。

これとそっくりの現象が電子でも起きます。



# 電子って何？どこにあるの？

すべてのものは原子でできていて、  
原子は、プラスの電荷を持つ原子核と、マ  
イナスの電荷を持つ電子からできている。  
原子核の周りを電子が動いている。  
電子の質量は原子核の質量の4000分の1く  
らい。体重60kgの人なら、そのうち約15g  
が電子の質量。



# 電子なしには世界は成り立たない

- 化学結合（原子がくっついて分子や固体を作ること）は、電子の働き。
- 化学反応（燃焼や、呼吸や消化や筋肉の運動など）は電子がこっちの原子からあっちの原子に乗り移ることによって起きる。
- 光（電磁波）を出したり、反射したり、吸収したりするのは、電子（炎・電球・蛍光灯・LED・眼・アンテナ・電子レンジ）。
- 電子は電場や磁場から力を受けて動く（モーター・トランジスタ・コンピュータ）。

# 電子の物理法則

- マイナスの電荷を持っている。プラスの電極から引力を受ける。
- 磁力で進行方向を曲げられる。
- 一定の質量を持っている。
- 分割できない。
- 一つ二つと数えられる粒子だ。





# 磁場と電子

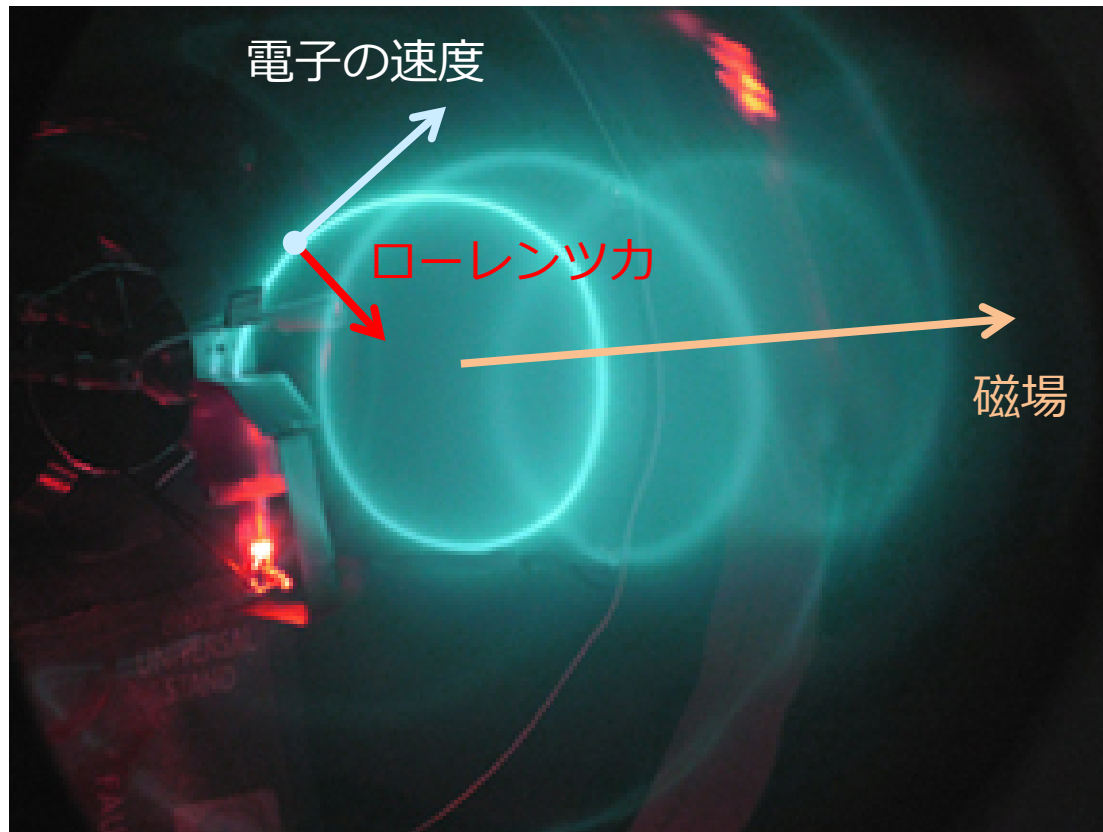
磁場は電子の進行方向を曲げる：ローレンツ力



<https://forum.cosmoquest.org/showthread.php?138906-How-slow-can-electron-go>

# 磁場と電子

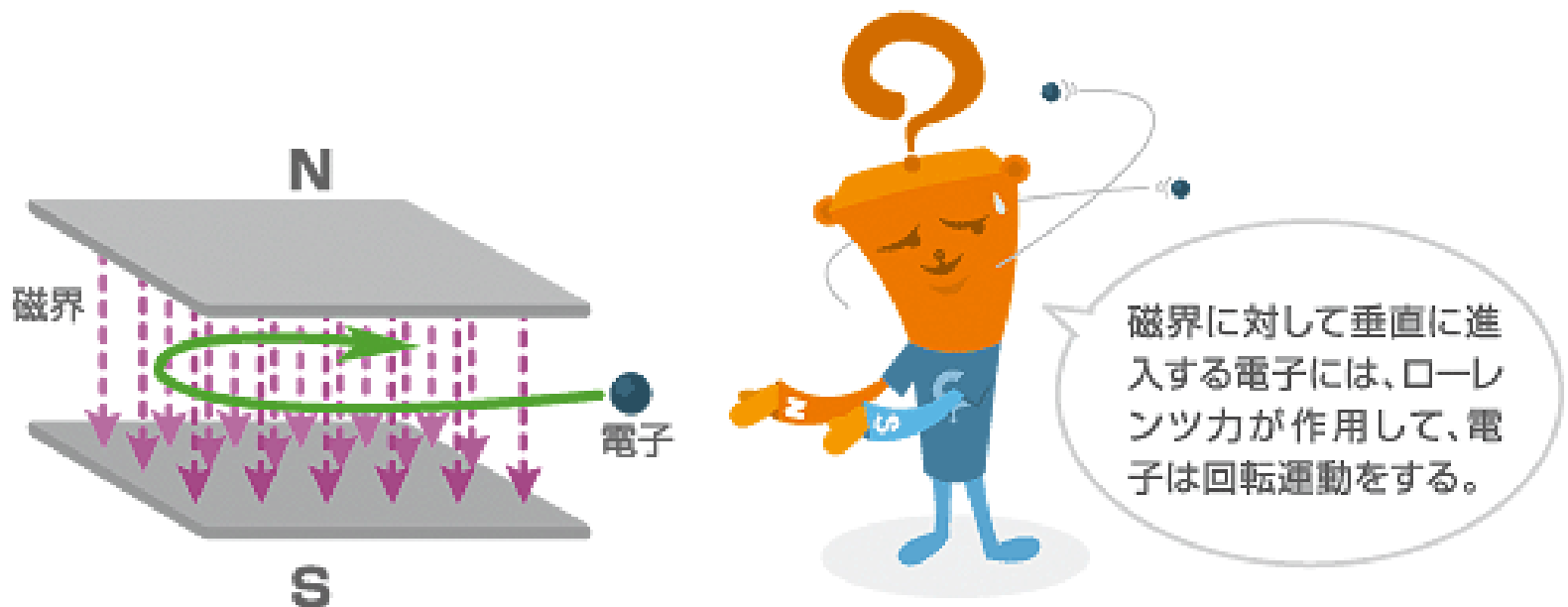
磁場は電子の進行方向を曲げる：ローレンツカ



# 磁場と電子

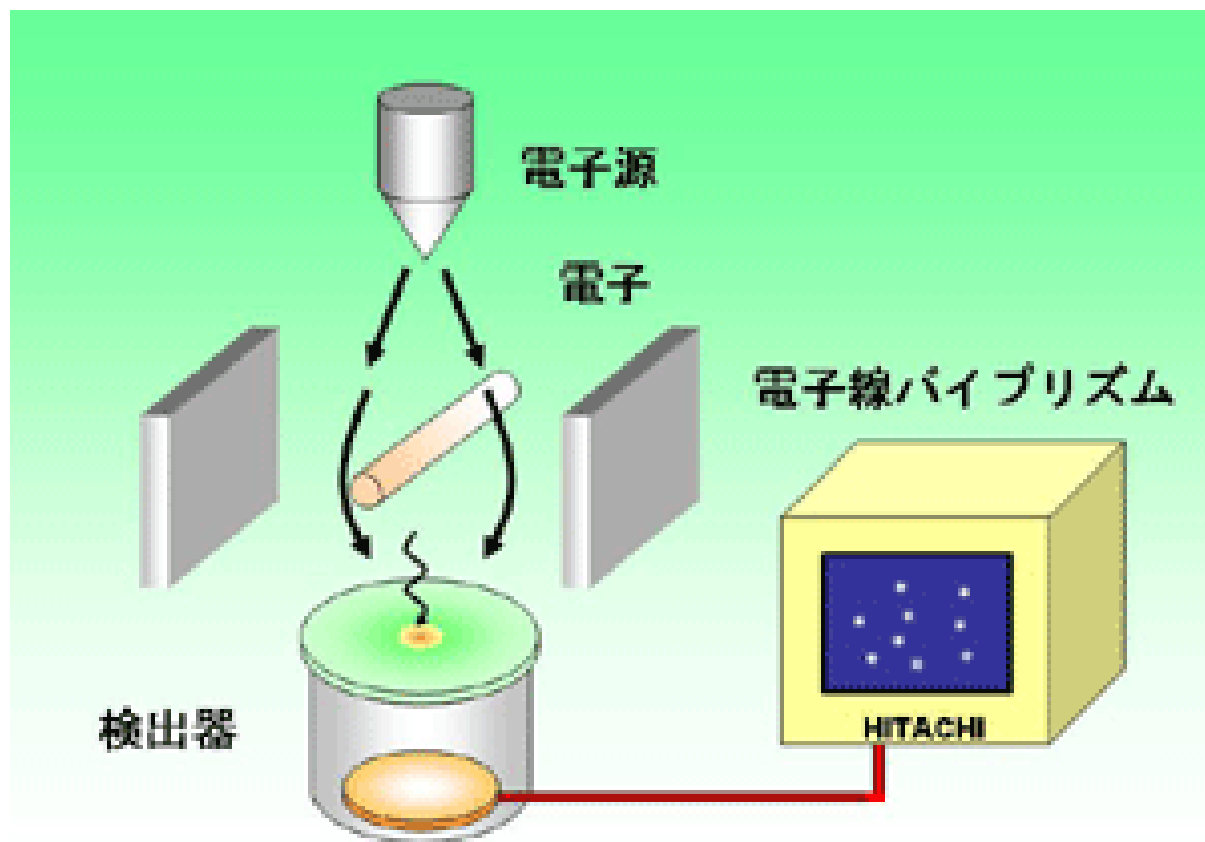
マグネトロン：磁場の中で電子を回転運動させてマイクロ波（電磁波）を発生させる装置。電子レンジやレーダーに使われている。

電子レンジのマグネトロンとマイクロ波発振のしくみ



# 電子の量子論的性質をあばく実験

個々の電子が右か左を通過してスクリーンに当たる。  
外村彰氏の  
実験



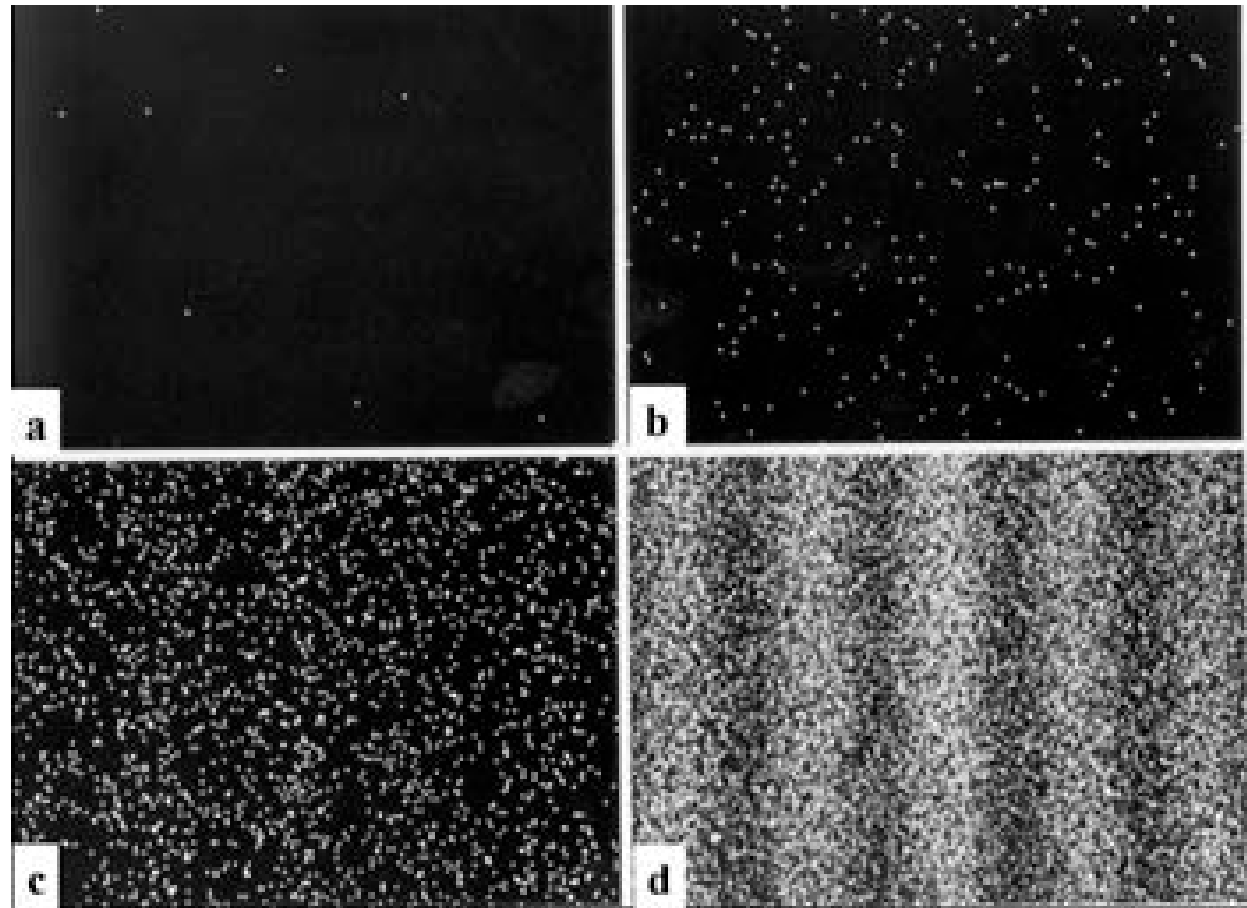
動画

<http://www.hitachi.co.jp/rd/portal/highlight/quantum/doubleslit/index.html>

# 電子の縞模様

一個一個の電子が右か左を違ってスクリーンに当たった結果。

ぽつりぽつりと到着した電子が積もって明暗の縞模様を作る。



# 波の干渉効果

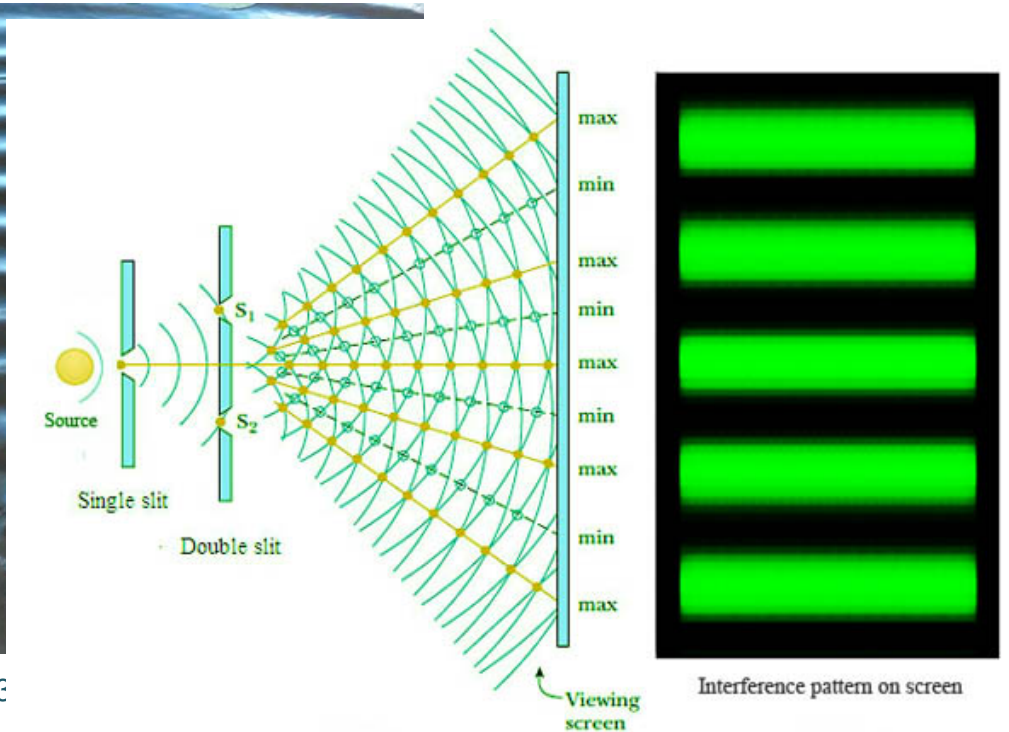
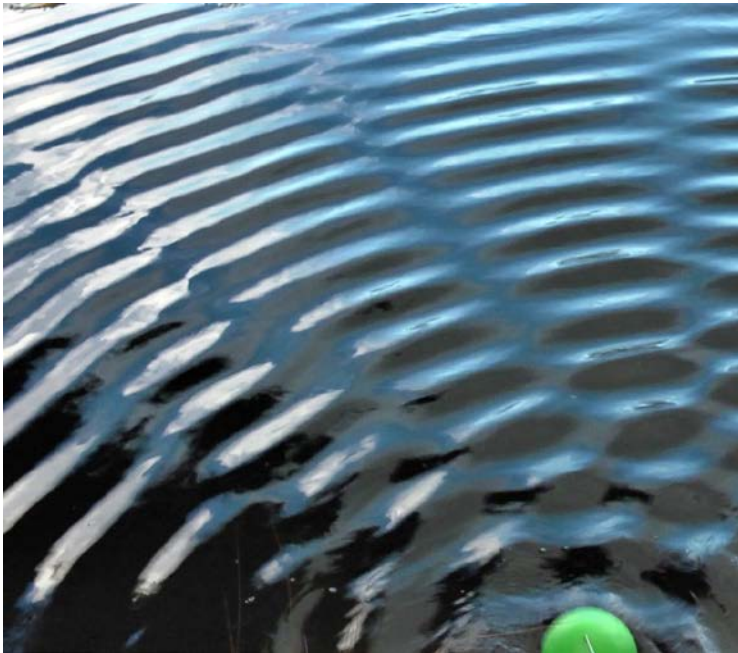
水面の波は、重なり合って、弱め合ったり強め合ったりする。



YouTube "The Original Double Slit Experiment" (4:30~)

# 波の干渉効果

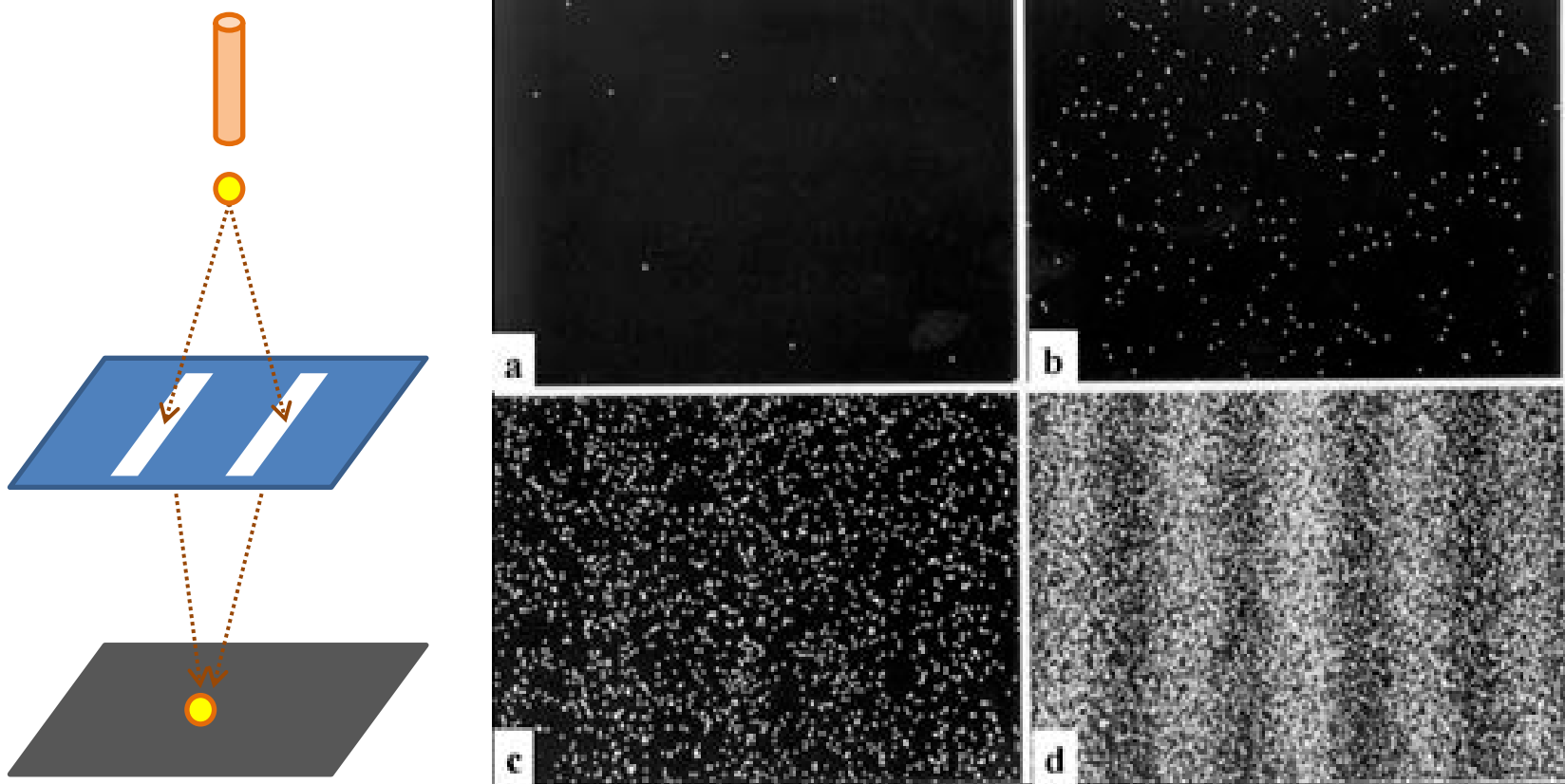
水面の波は、重なり合って、弱め合ったり強め合ったりする。干渉 (interference) という。



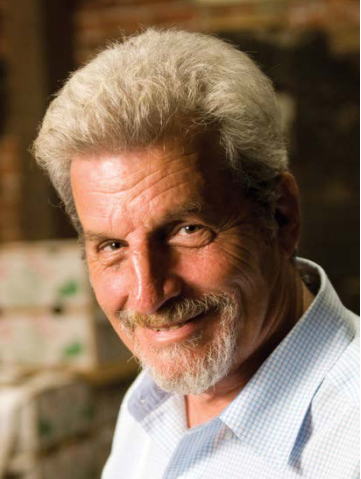
YouTube "The Original Double Slit Experiment" (4:3

# 電子の干渉効果

電子は不可分な粒子のはずなのに、波動のごとく広がって、重なり合って、干渉している。





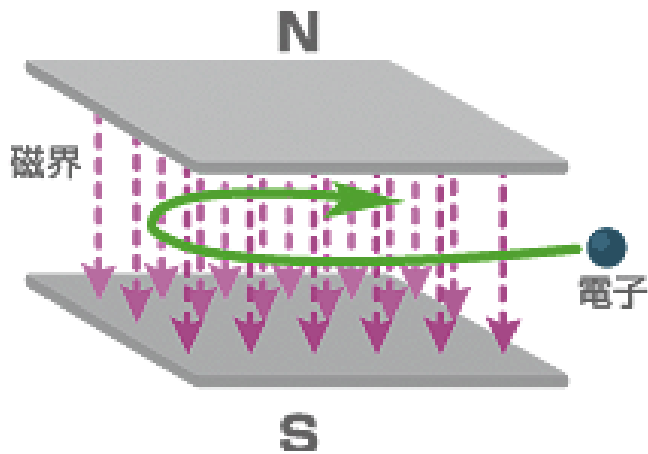


# アハラノフとボーム

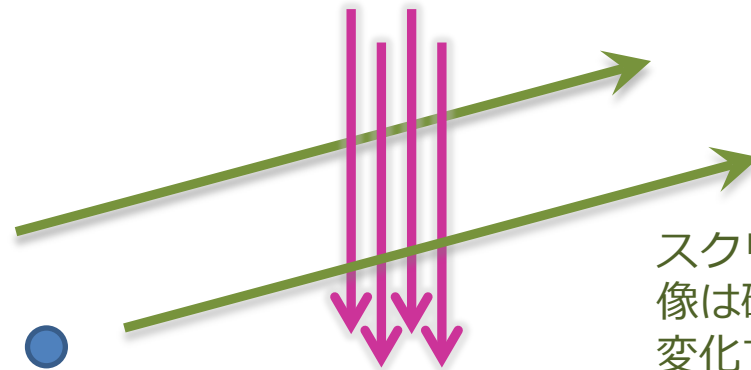


電子が磁場を通れば電子の進行方向が曲げられることは、わかった。

では、電子の通らない場所にある磁場は、電子の干渉縞に影響をおよぼすか？



磁場はこのあたりだけにある

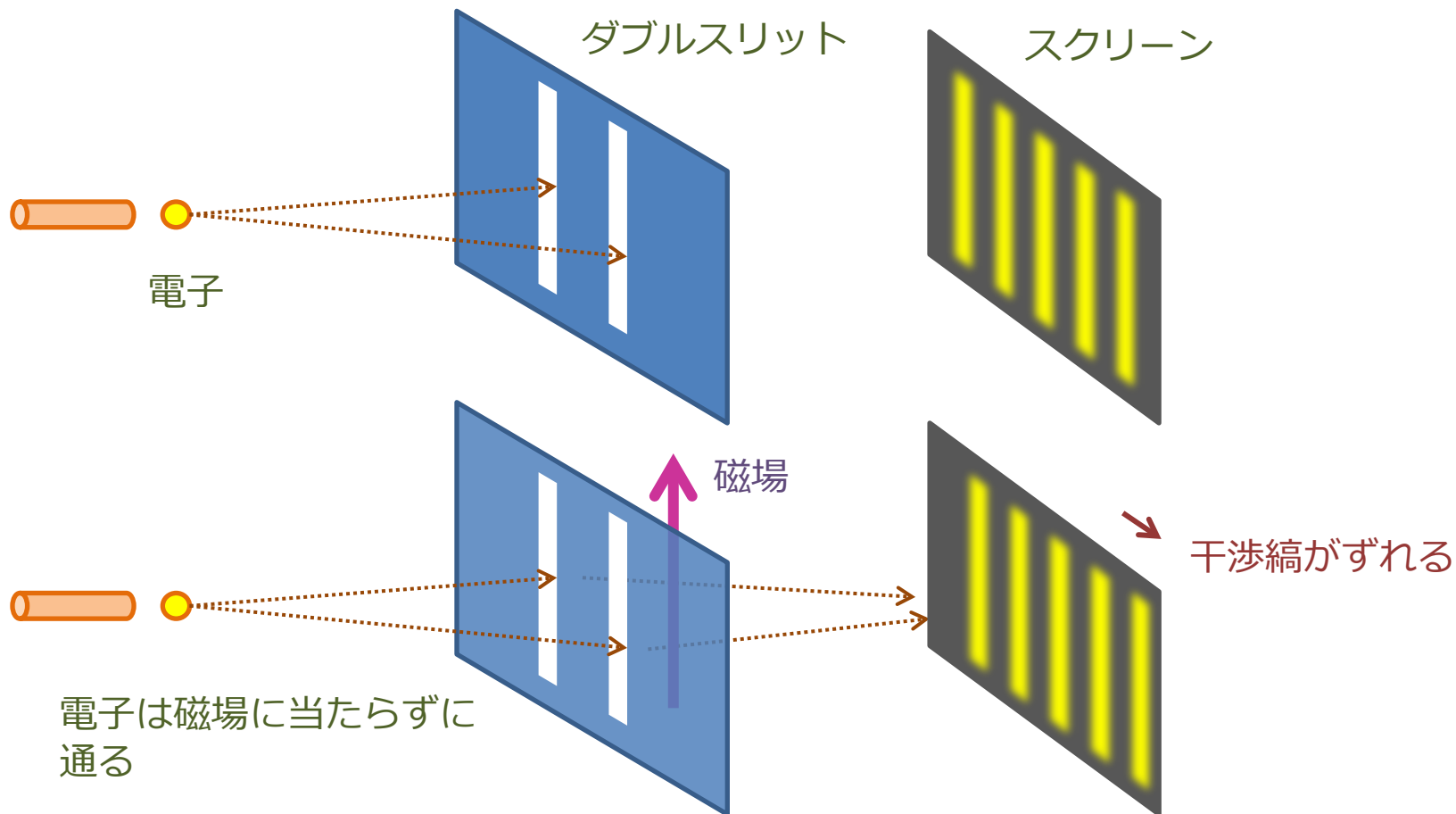


スクリーンに映る像は磁場の影響で変化するか？

電子は磁場をよけて通る

# アハラノフとボームの予測

磁場をまたいだ電子の干渉縞は、磁場の強さに比例してシフトする。



# 外村氏の実験

超伝導物質（磁場を通さない）で環状の磁石を取り囲む。環の内側と外側に電子を通す。

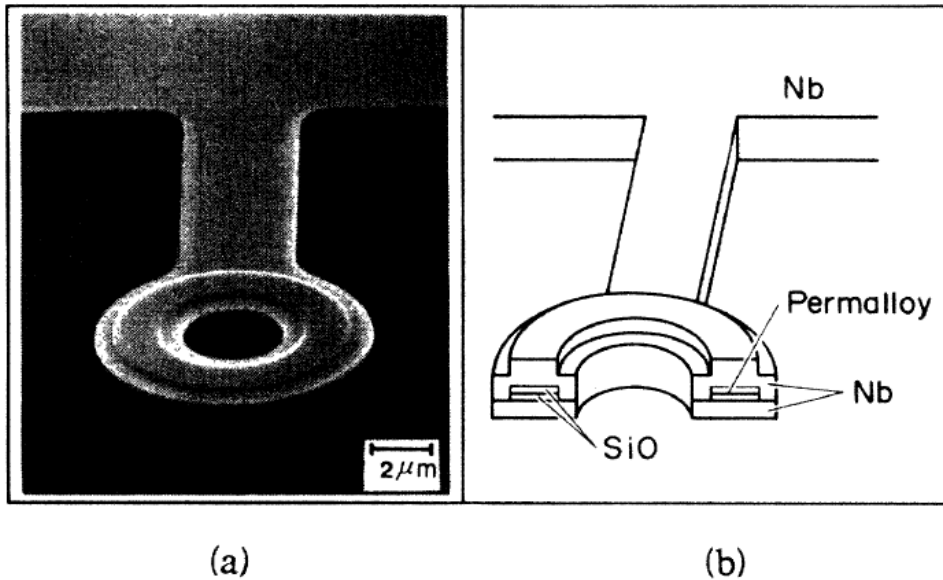


FIG. 2. Toroidal magnet. (a) Scanning electron micrograph; (b) diagram. The toroid is connected to a Nb plate by a tiny bridge for high thermal conductivity.

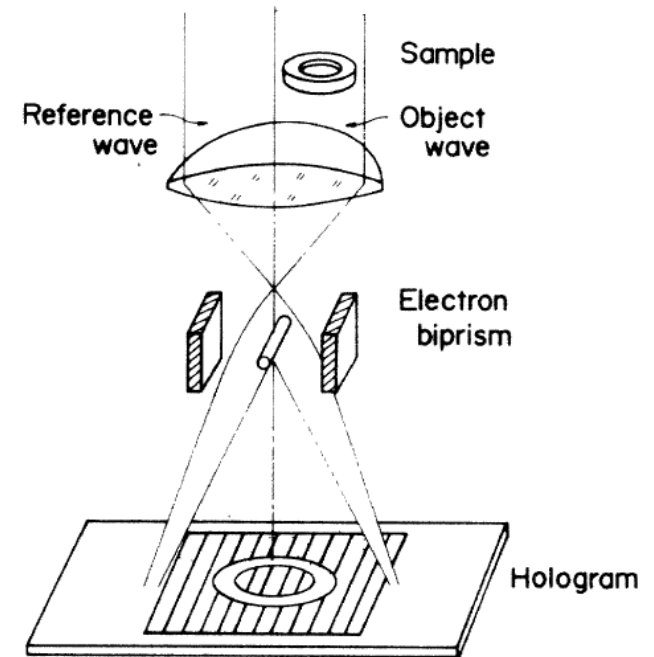
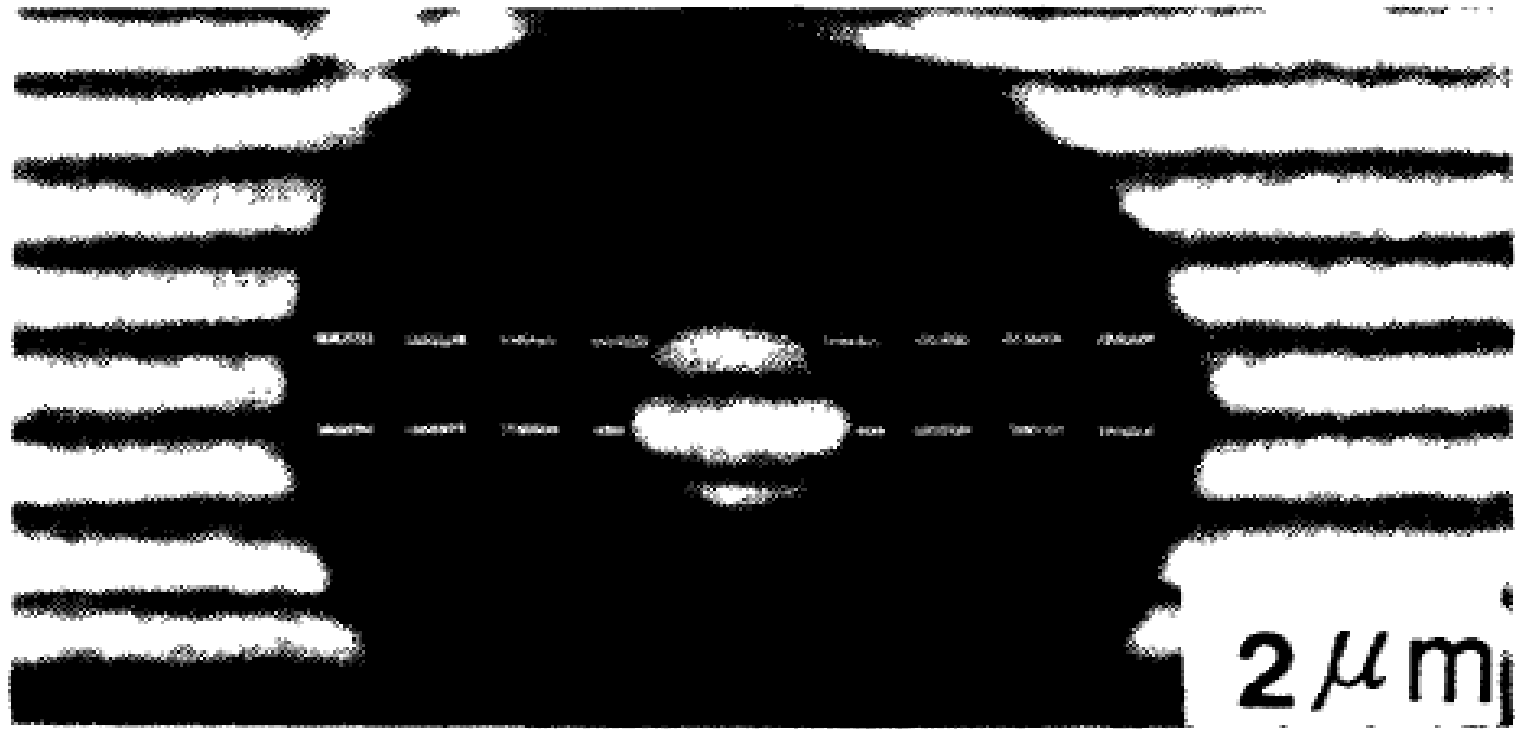


FIG. 3. Electron-optical system for hologram formation.

# 外村氏の実験結果

磁場をまたいだ電子の干渉縞はシフトしていた。



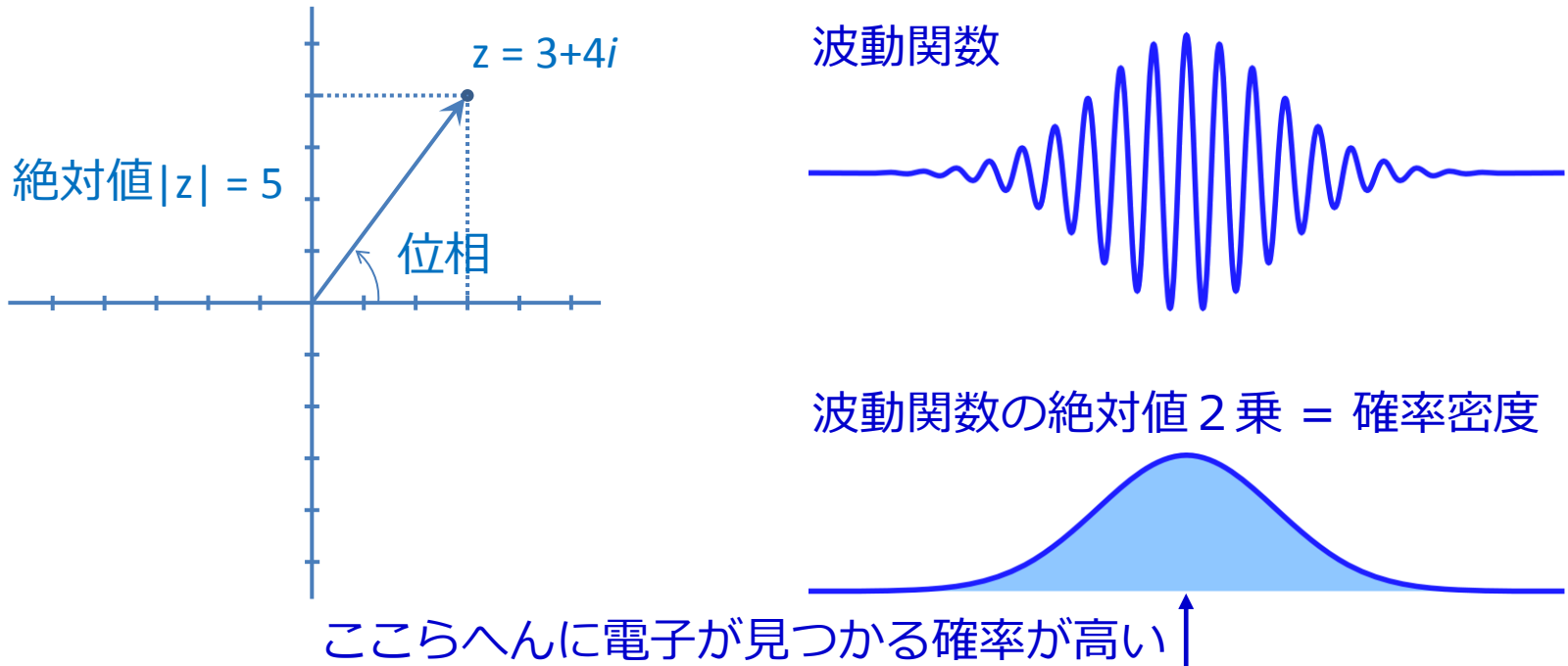
(a)

# アハラノフ・ボーム効果のしくみ

アハラノフ・ボーム効果がどうやって起こるのか、そのしくみを、おおざっぱに説明します。

# 電子の波動関数

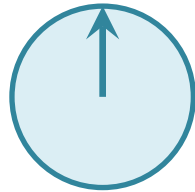
- 電子の状態は複素数値の波動関数で表される。
- 複素数には絶対値と位相という性質がある。
- 電子が、ある場所に見つかる確率は、波動関数の絶対値 2 乗に比例する。



# 電子の波動関数

波動関数は時間的に回転しながら生じ、空間的には平行移動しながら進む。

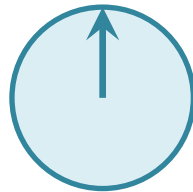
開始時刻



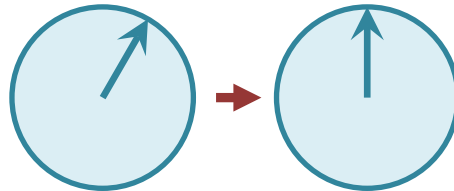
# 電子の波動関数

波動関数は時間的に回転しながら生じ、空間的には平行移動しながら進む。

開始時刻



次の瞬間

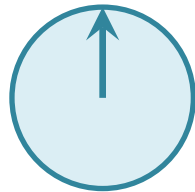




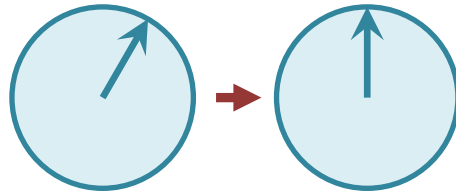
# 電子の波動関数

波動関数は時間的に回転しながら生じ、空間的には平行移動しながら進む。

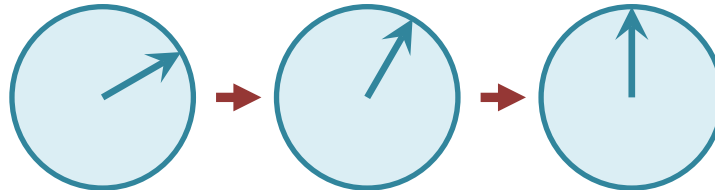
開始時刻



次の瞬間

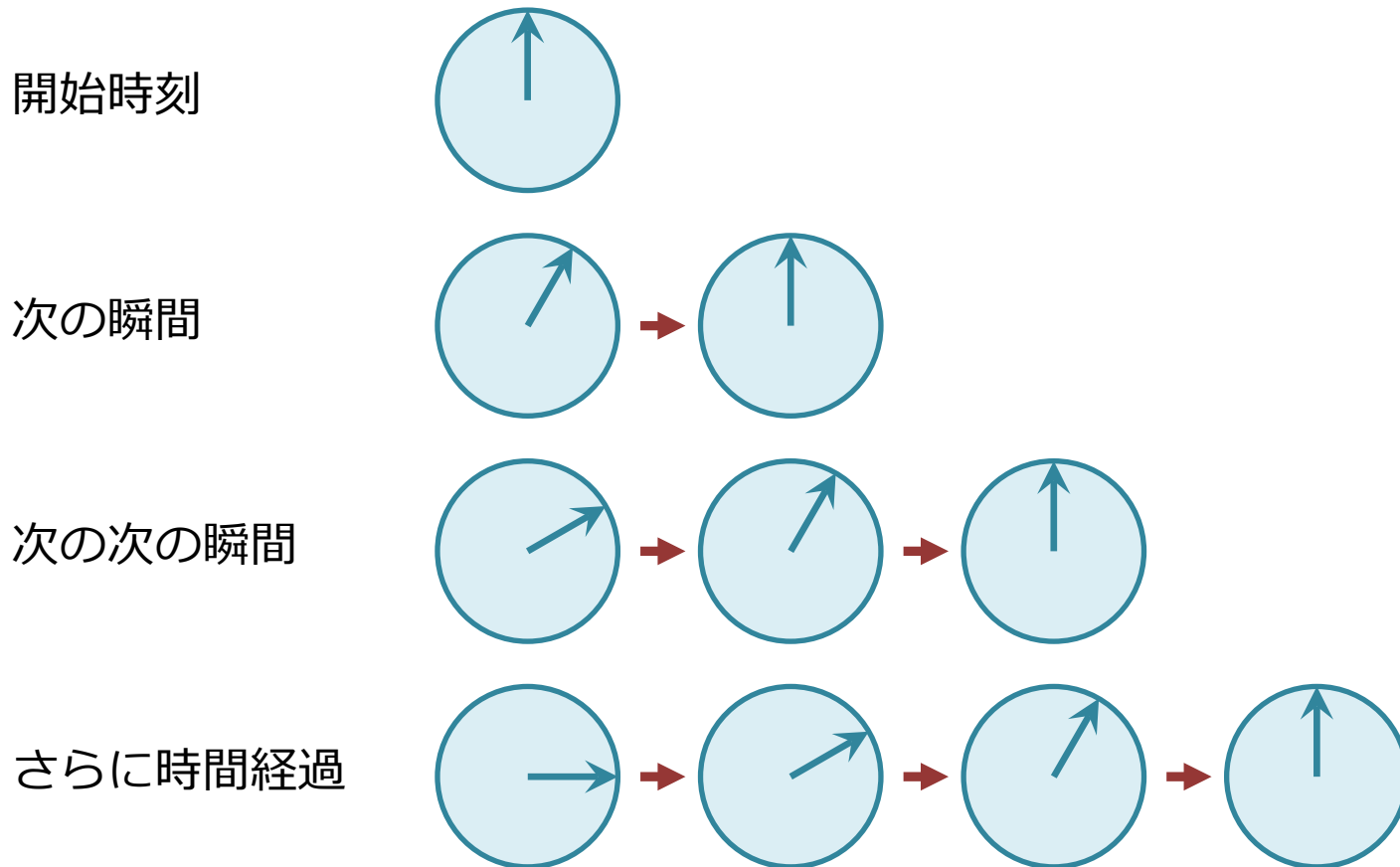


次の次の瞬間



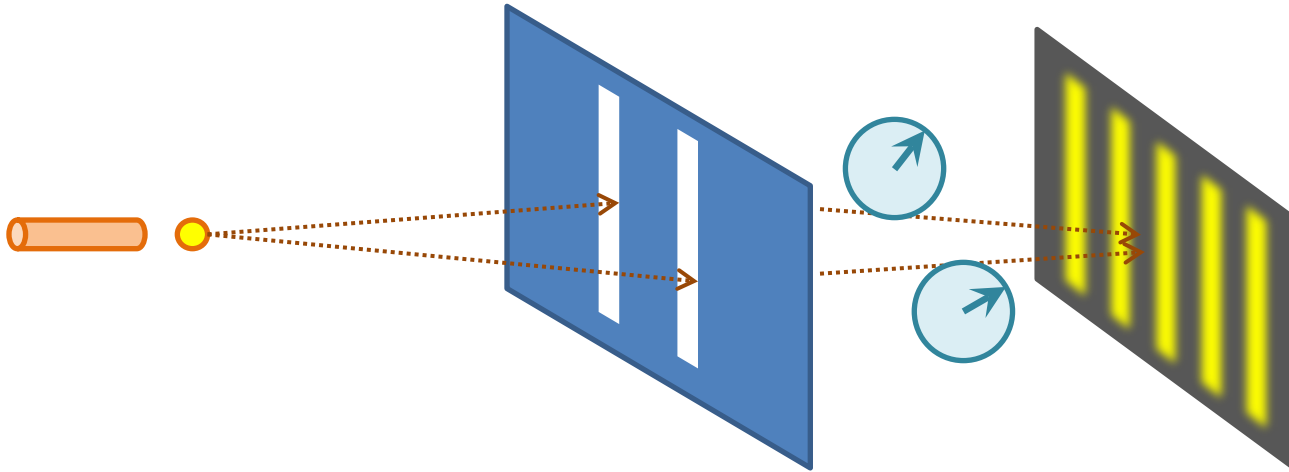
# 電子の波動関数

波動関数は時間的に回転しながら生じ、空間的には平行移動しながら進む。

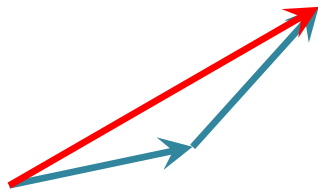


# 電子の波動関数

スクリーン上で波動関数が重なり合う  
⇒ 複素数の足し算 ⇒ 位相に応じた干渉効果



足し算の結果、強め合えば ⇒ 電子の出現確率高い ⇒ 明るい縞

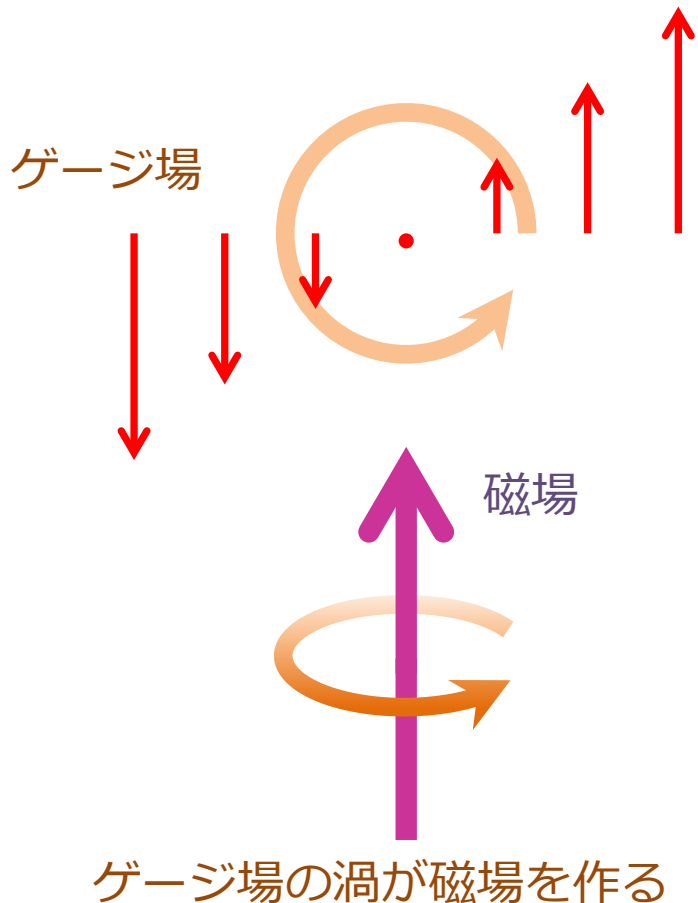


打ち消し合えば ⇒ 電子の出現確率低い ⇒ 暗い縞



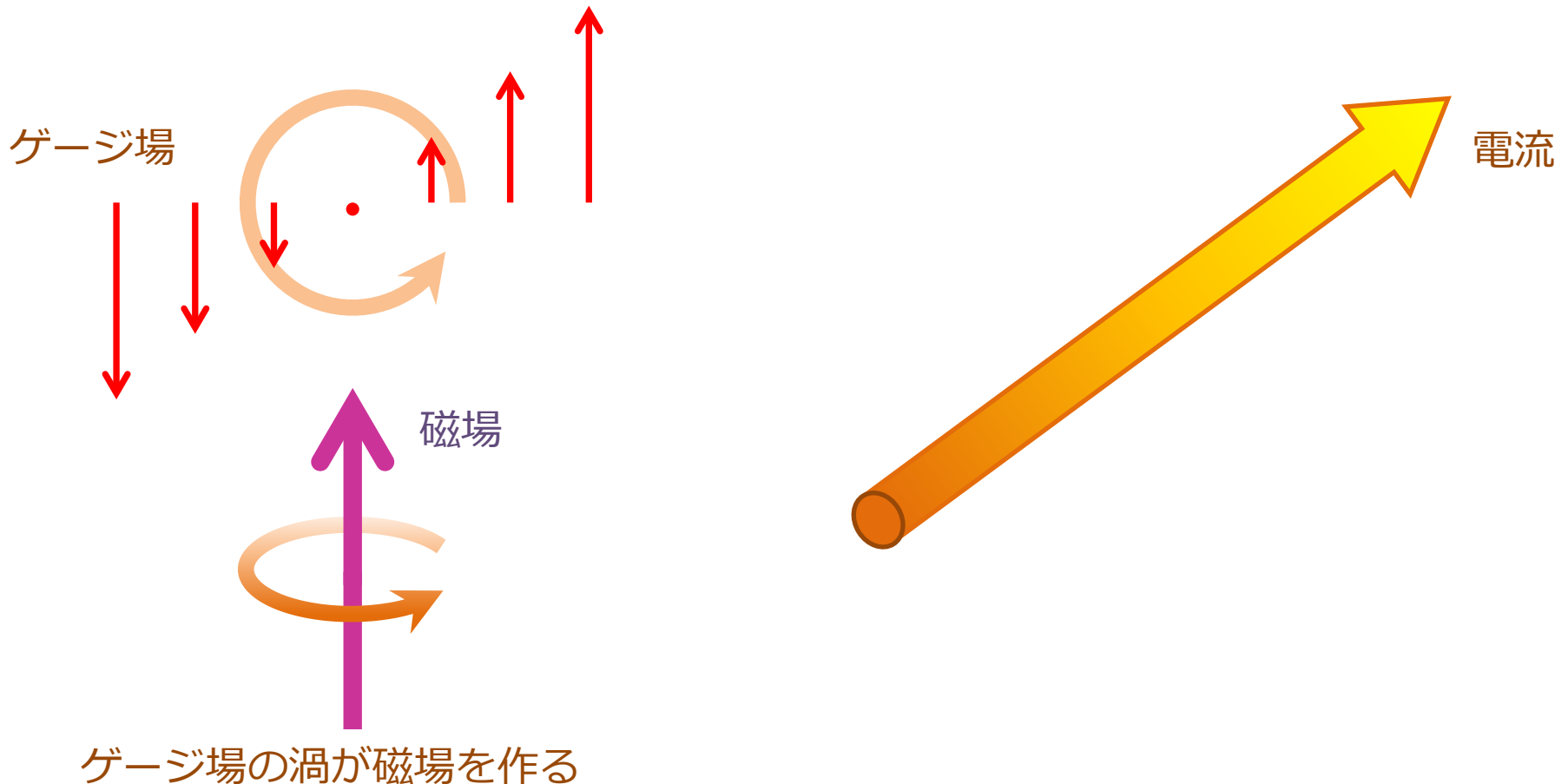
# 磁場とゲージ場

ゲージ場は電流によって生じるベクトル場であり、ゲージ場の渦が磁場を生む。



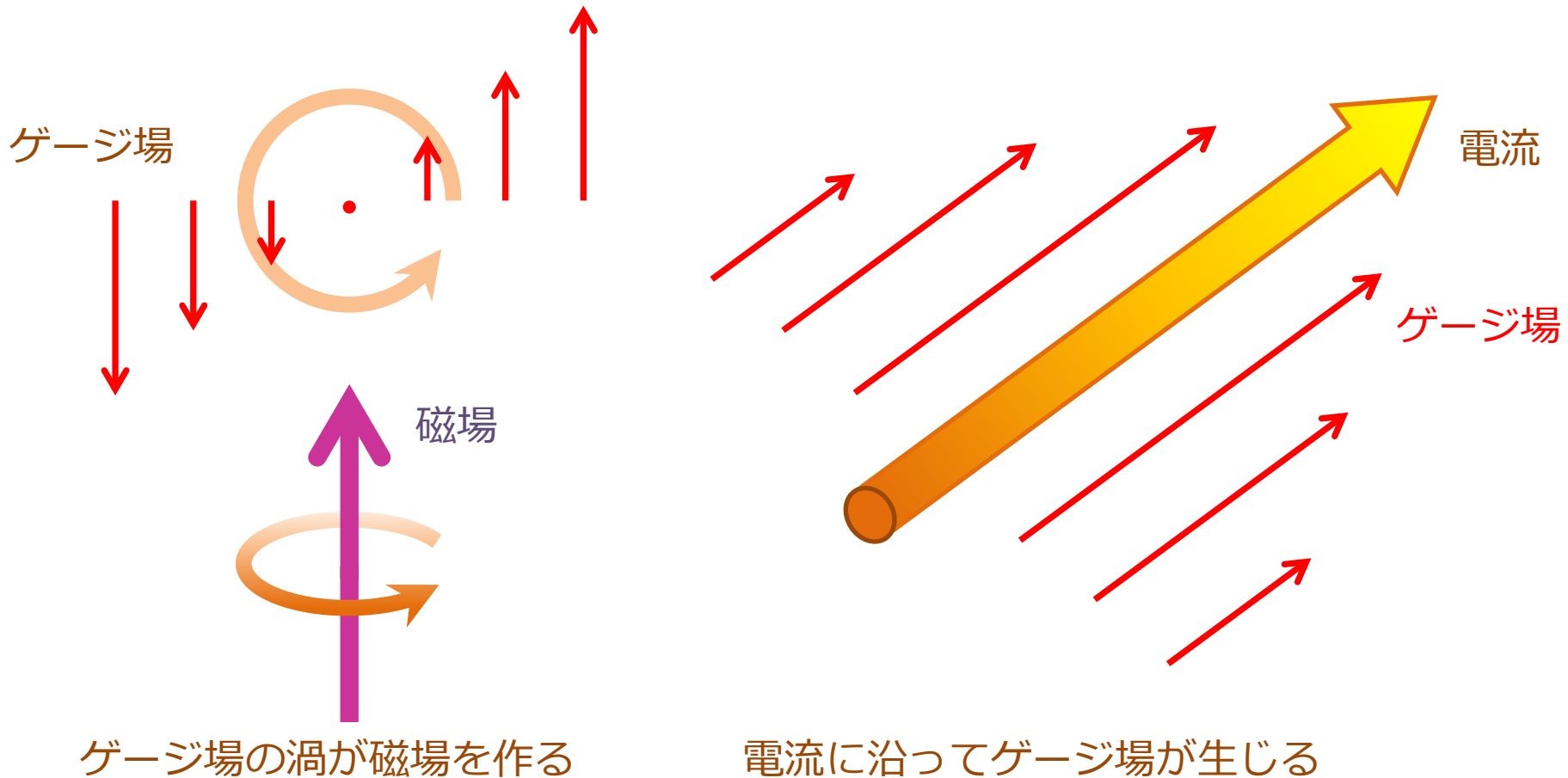
# 磁場とゲージ場

ゲージ場は電流によって生じるベクトル場であり、ゲージ場の渦が磁場を生む。



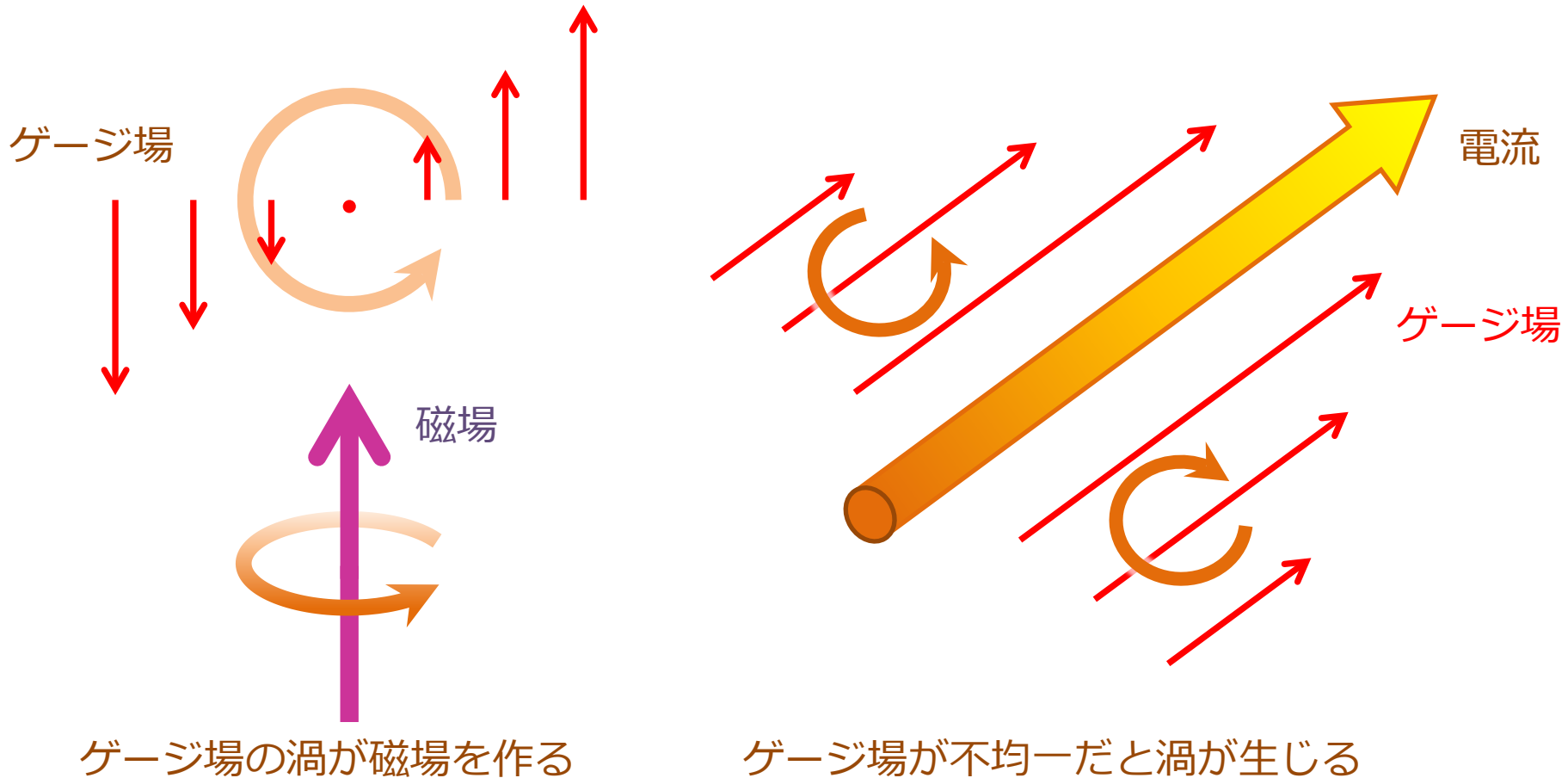
# 磁場とゲージ場

ゲージ場は電流によって生じるベクトル場であり、ゲージ場の渦が磁場を生む。



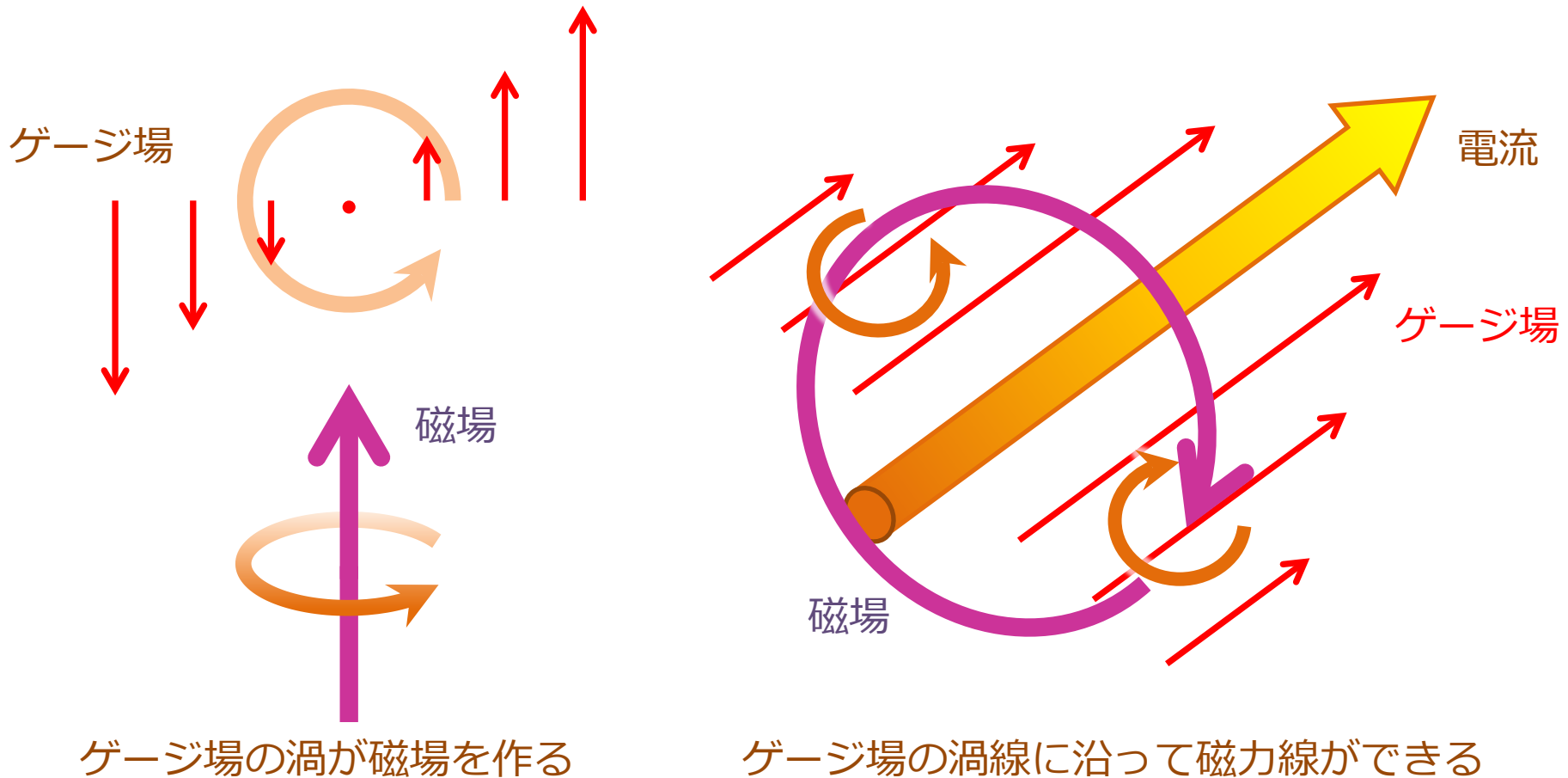
# 磁場とゲージ場

ゲージ場は電流によって生じるベクトル場であり、ゲージ場の渦が磁場を生む。



# 磁場とゲージ場

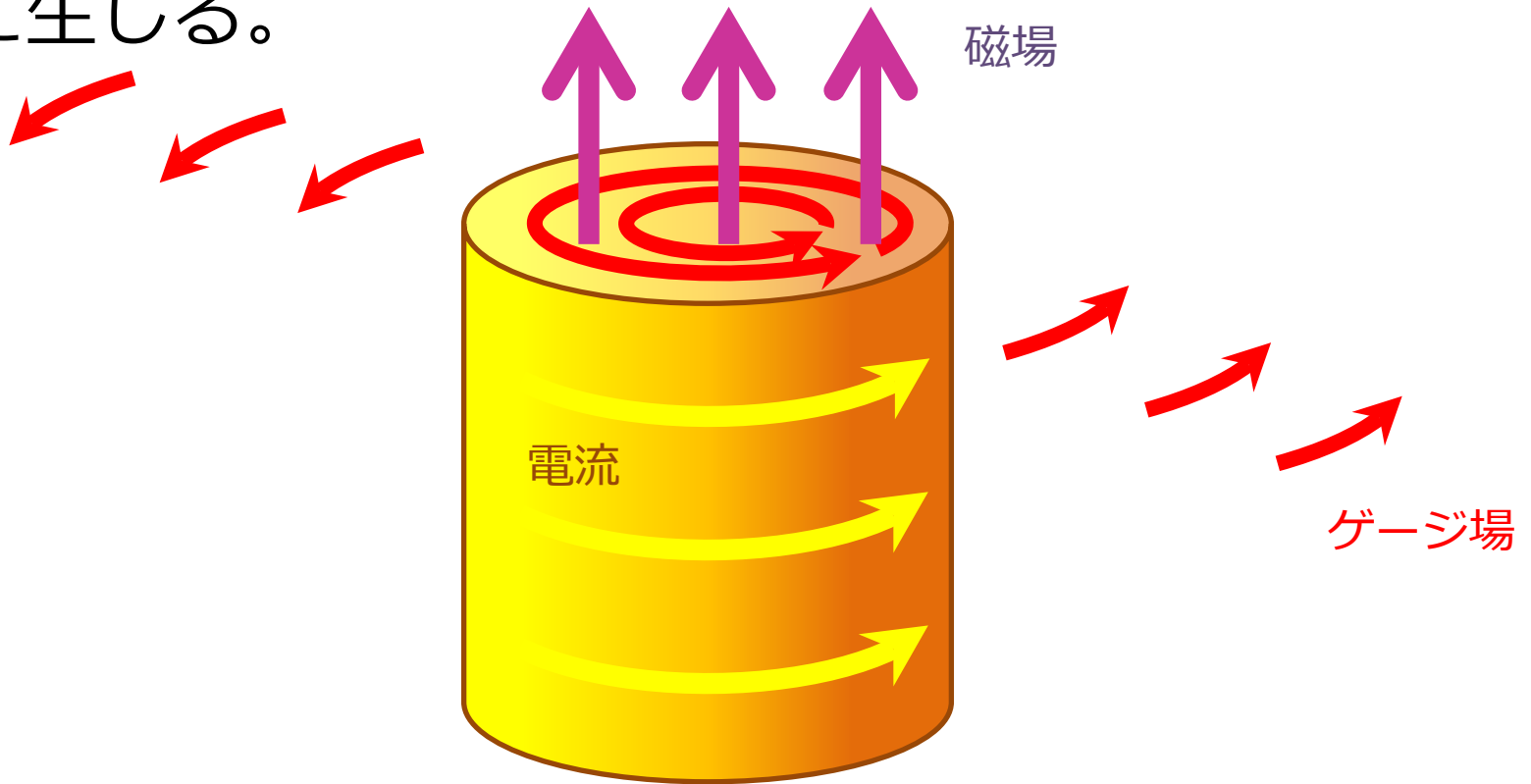
ゲージ場は電流によって生じるベクトル場であり、ゲージ場の渦が磁場を生む。





# 電磁石が作るゲージ場

電磁石コイルは円筒状の電流であり、ゲージ場はコイルの内外に生じるが、磁場はコイルの内側だけに生じる。



コイルの外のゲージ場は渦なし、磁場なし

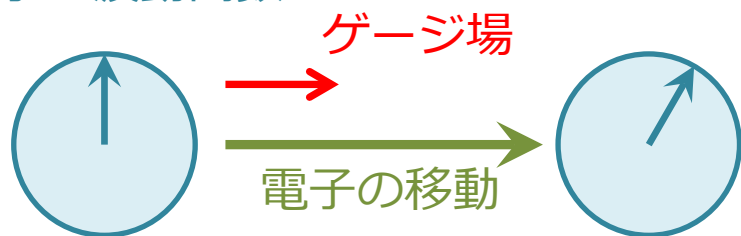
# 磁場とゲージ場

- 電流がゲージ場を生み、ゲージ場の渦が磁場を生む。
- ふだんはゲージ場そのものは観測されないのだが・・・

# 波動関数とゲージ場がからむと

ゲージ場は波動関数の平行移動のしかたを決める。

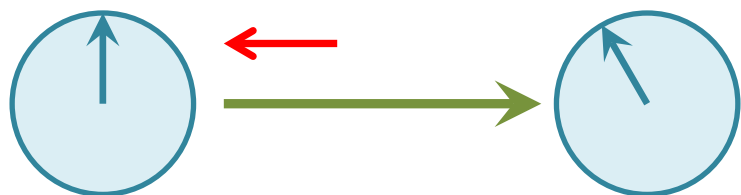
電子の波動関数



ゲージ場に沿って電子が移動すると  
波動関数の位相が進む



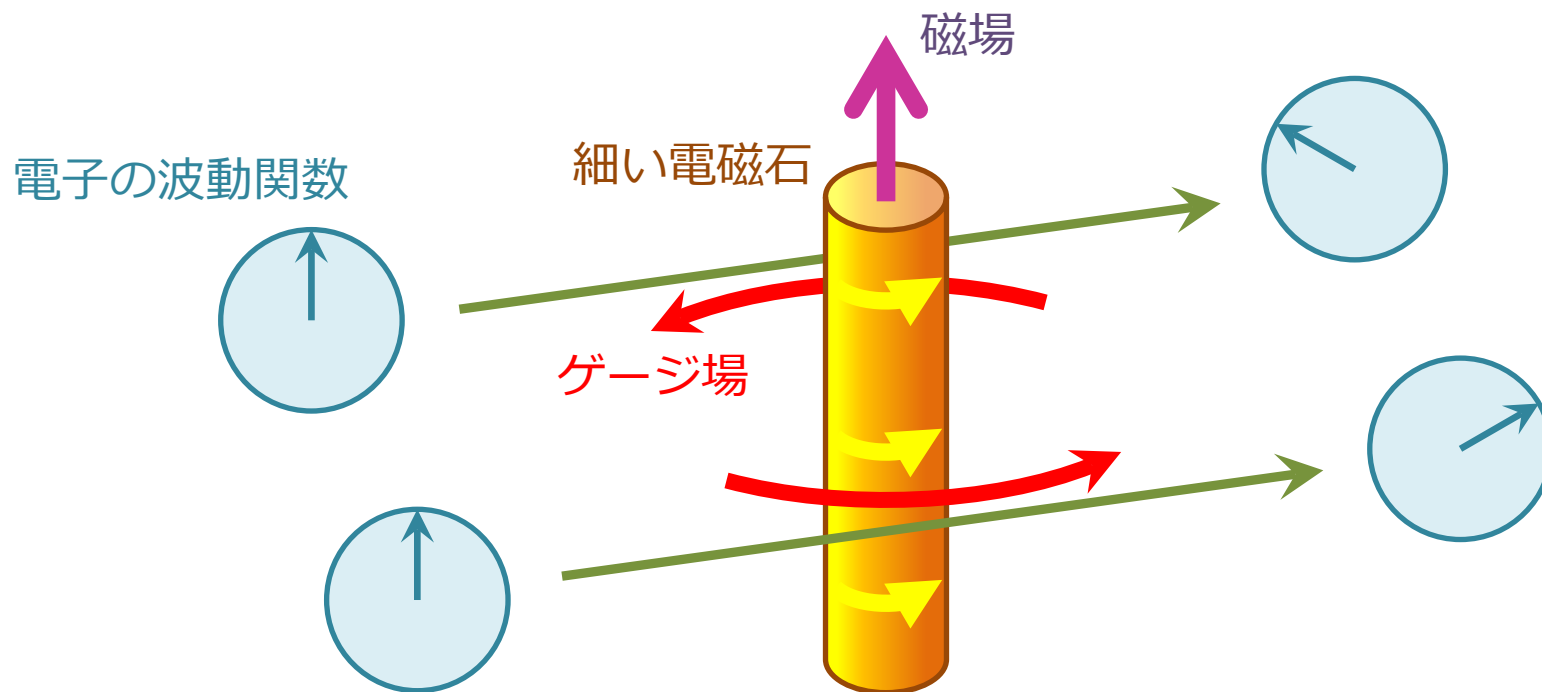
ゲージ場の強さと波動関数の位相の  
進みは比例する



ゲージ場に逆行して電子が移動すると  
波動関数の位相が遅れる

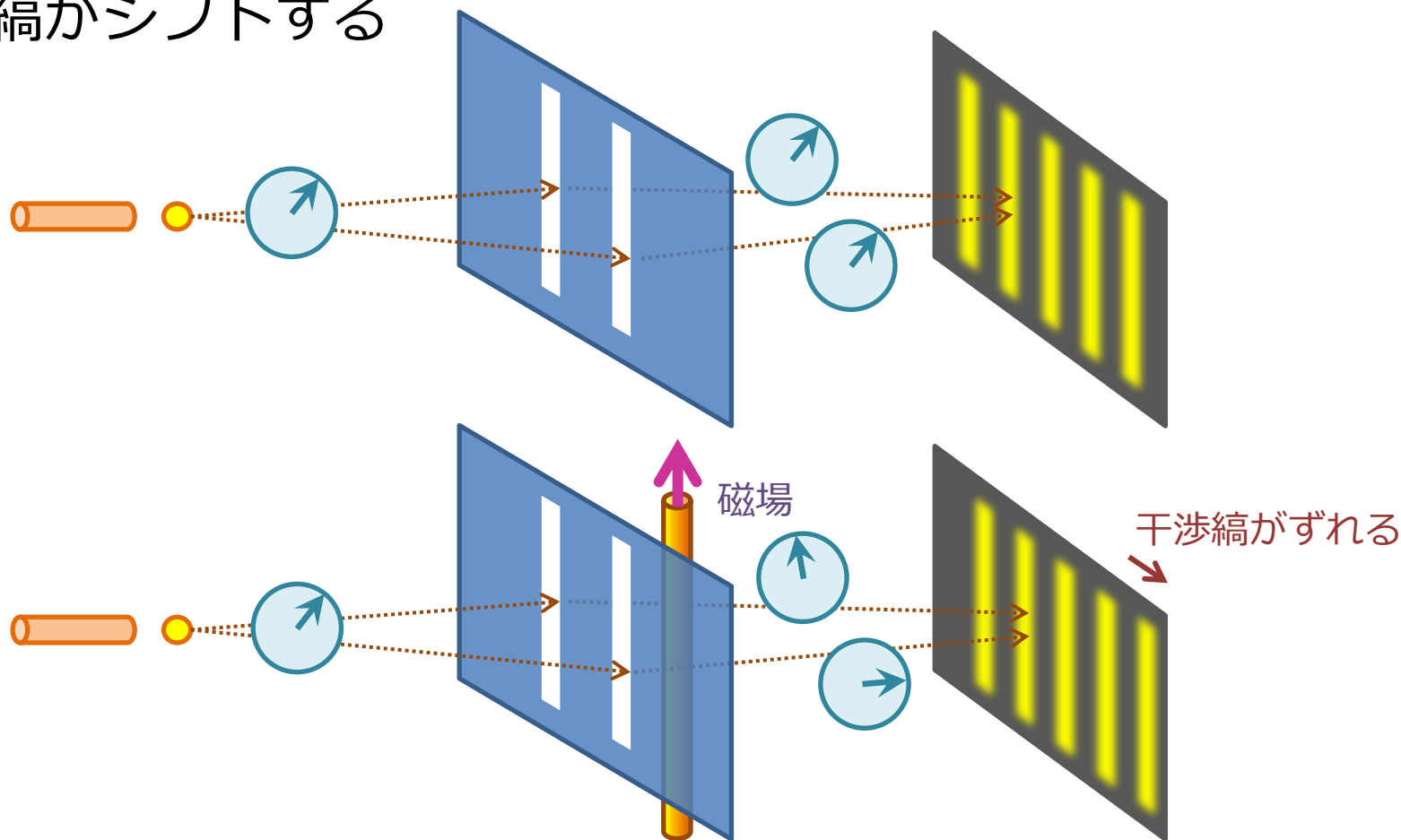
# 波動関数とゲージ場がからむと

磁場をはさんで電子の波動関数が進むと、波動関数そのものは磁場に当たっていなくても、ゲージ場のせいで位相のずれが生じる。



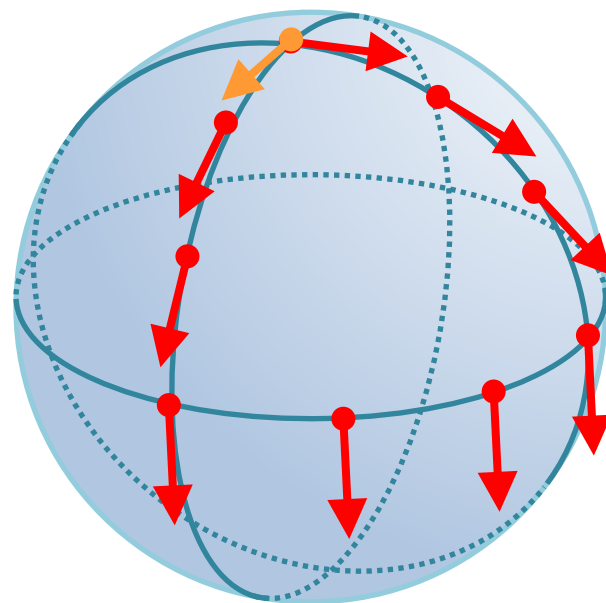
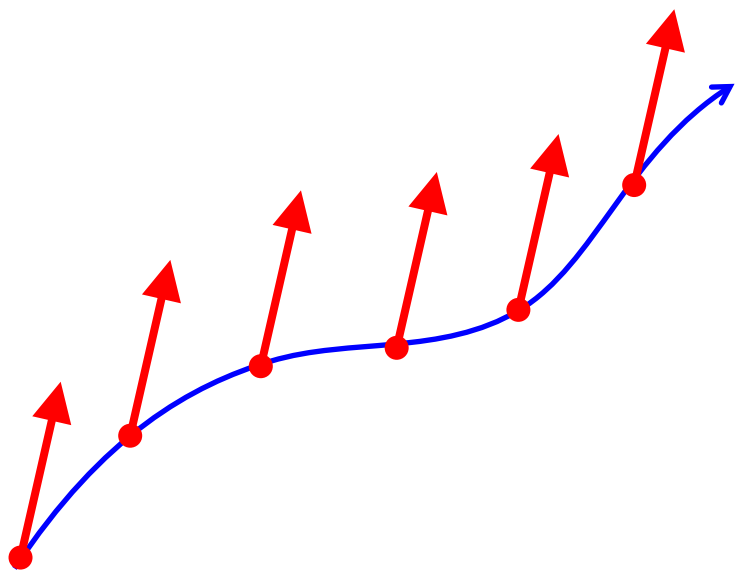
# アハラノフ・ボーム効果のしくみ

電子の波動関数の平行移動の位相がゲージ場でずれて、波動関数が強め合ったり打ち消し合ったりする場所が変わり、干渉縞がシフトする

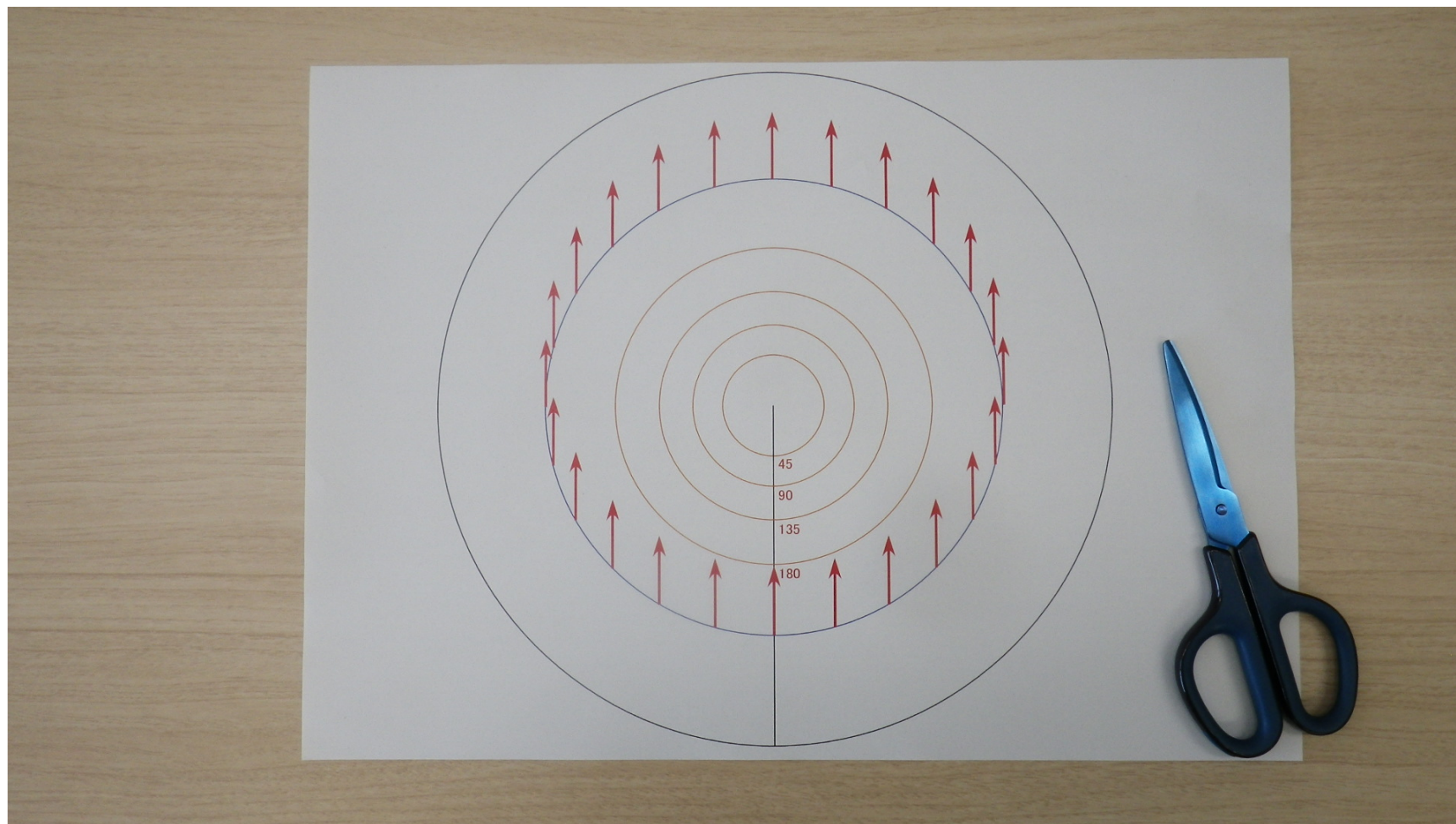


# 曲がった空間の幾何学

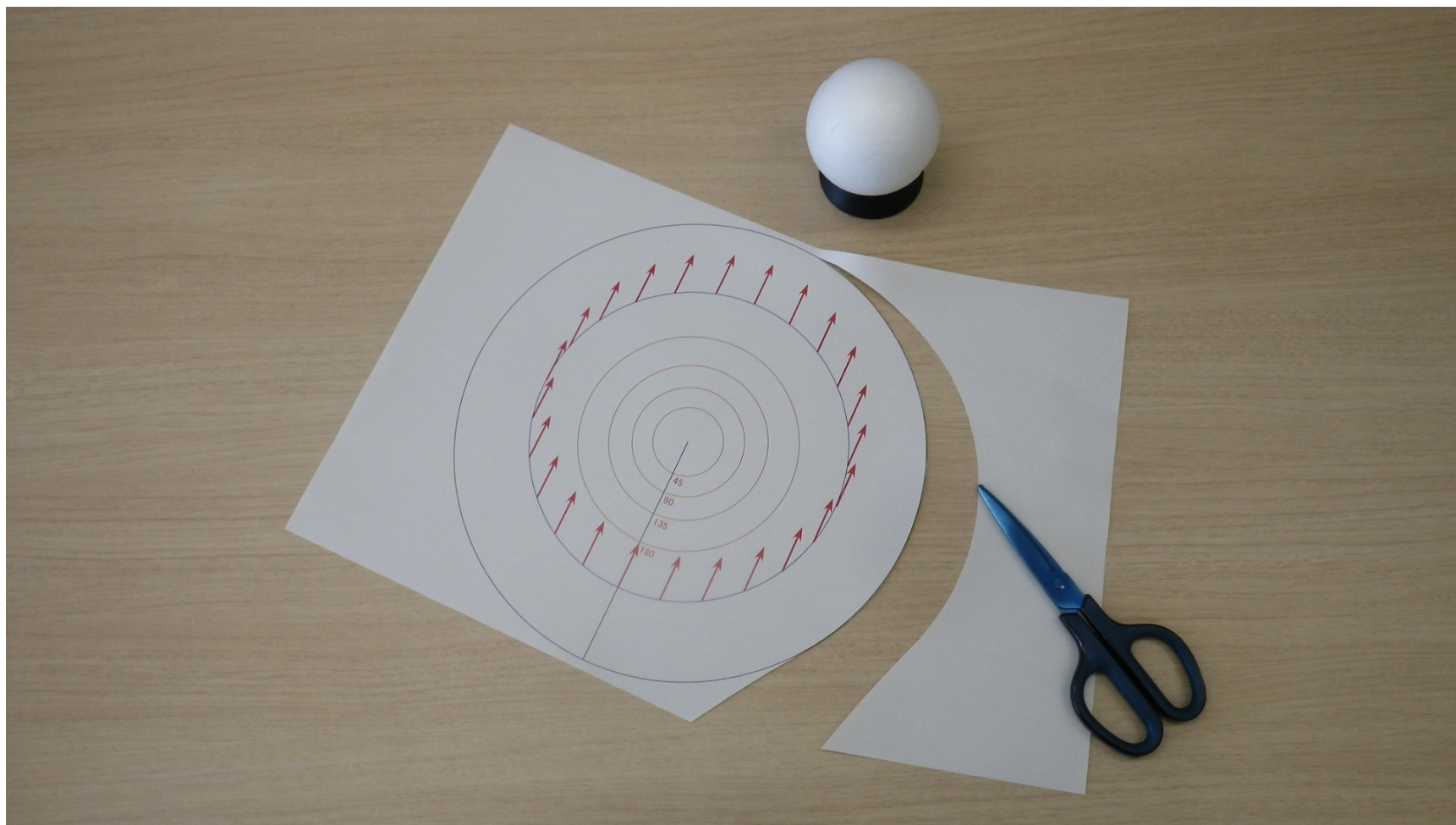
- 平行移動 = 空間中のベクトルの向きを変えずにずらすこと。
- 空間が曲がっていると、ベクトルを平行移動したにもかかわらず、正味の回転を生じる。



# 円錐は平面に展開できる⇒平坦

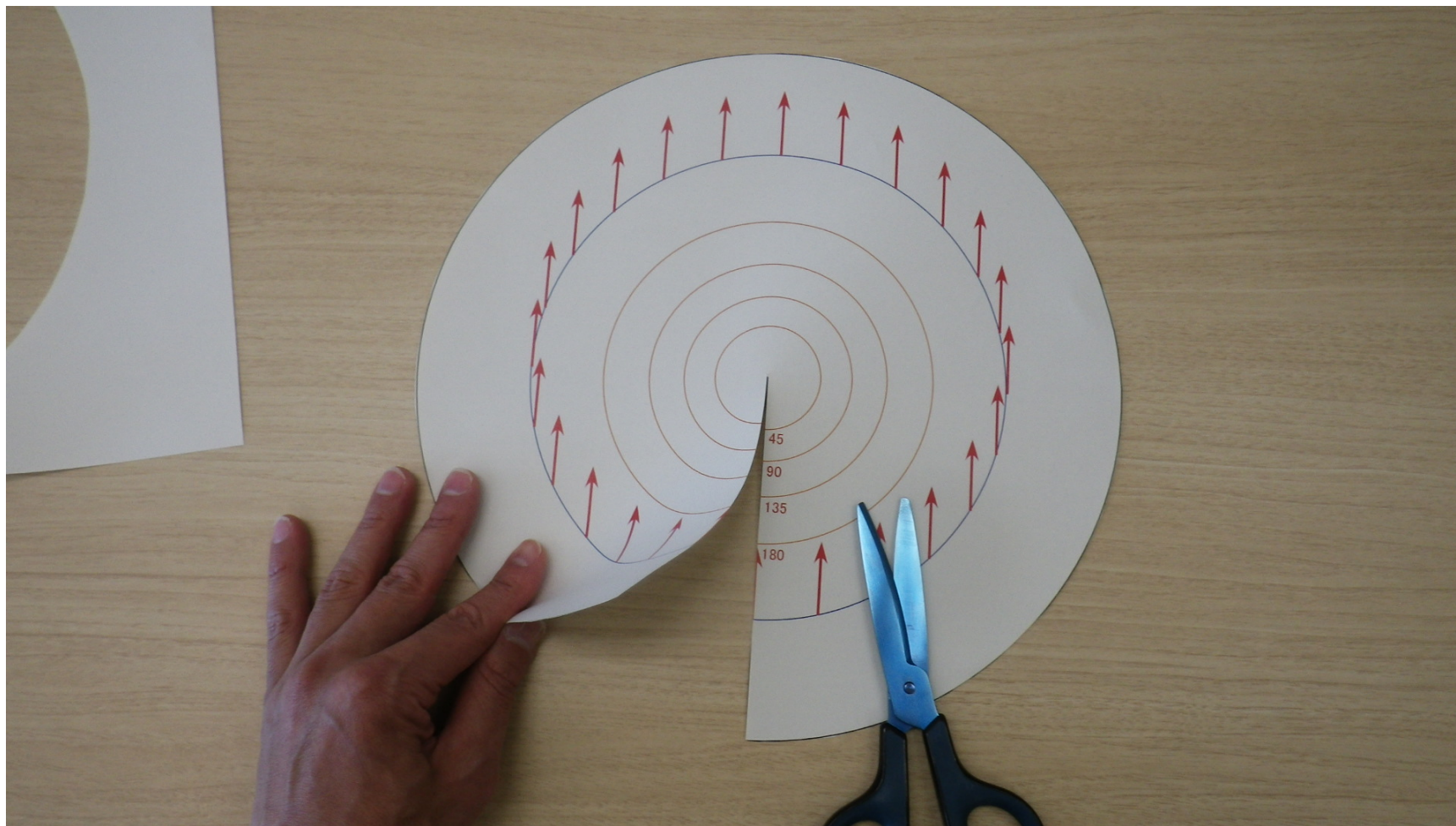


# 円錐は平面に展開できる⇒平坦

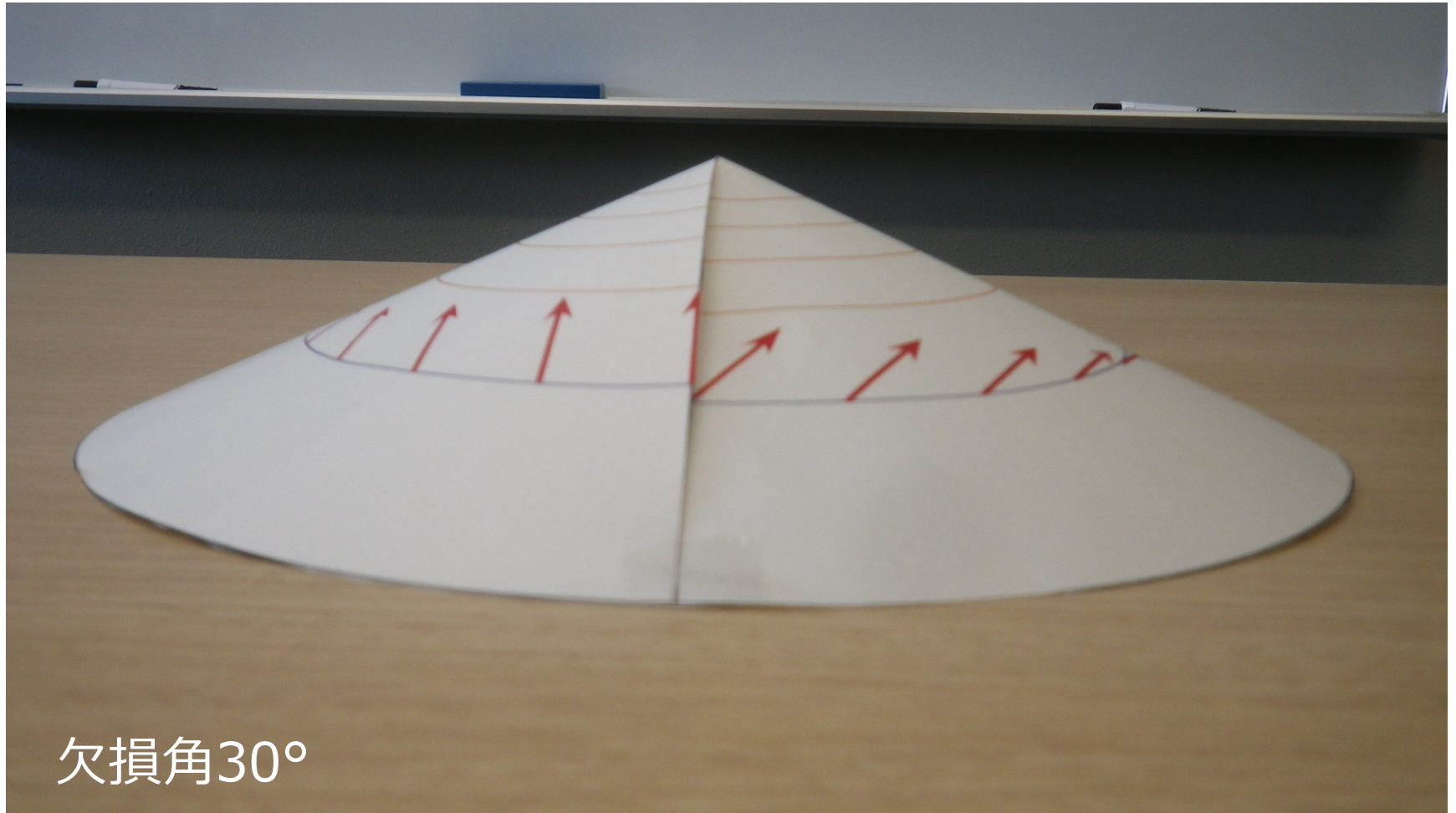




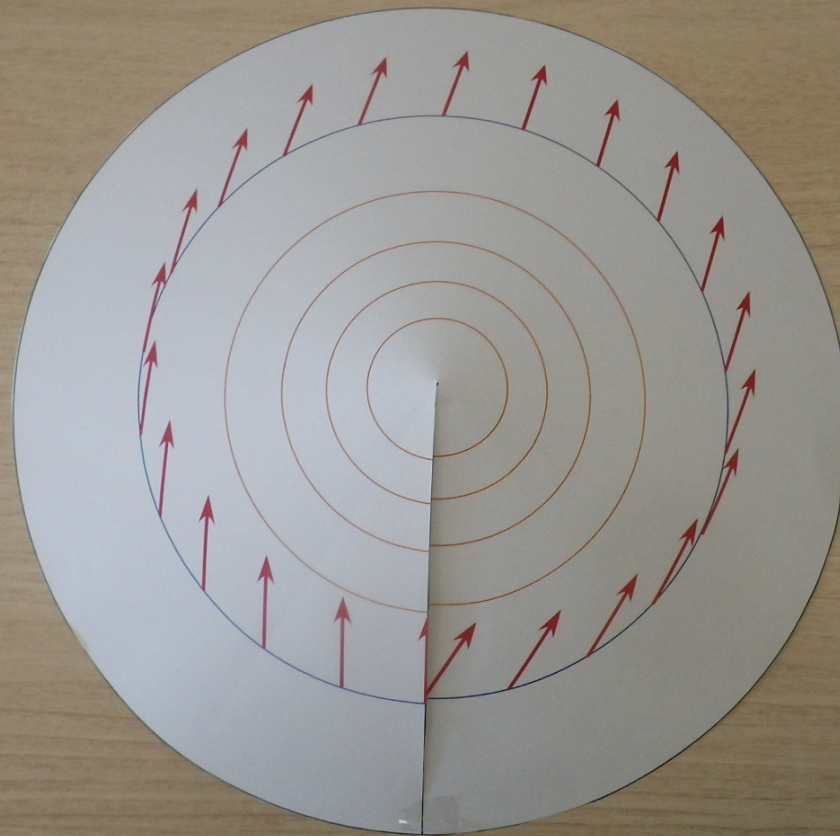
円錐は平面に展開できる⇒平坦



# 円錐の頂点の周りを平行移動すると 回転を生じる

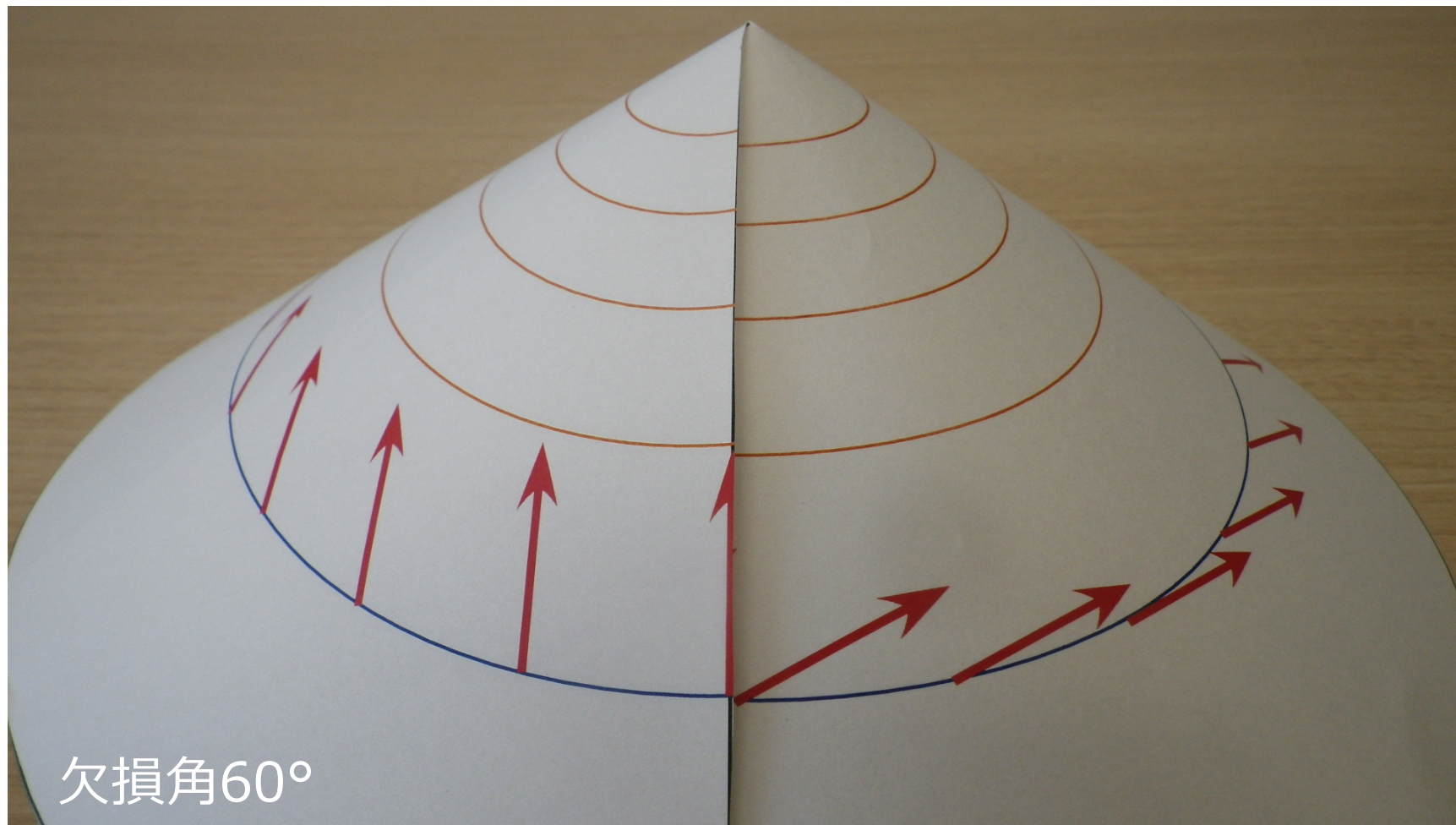


# 円錐の頂点の周りを平行移動すると 回転を生じる

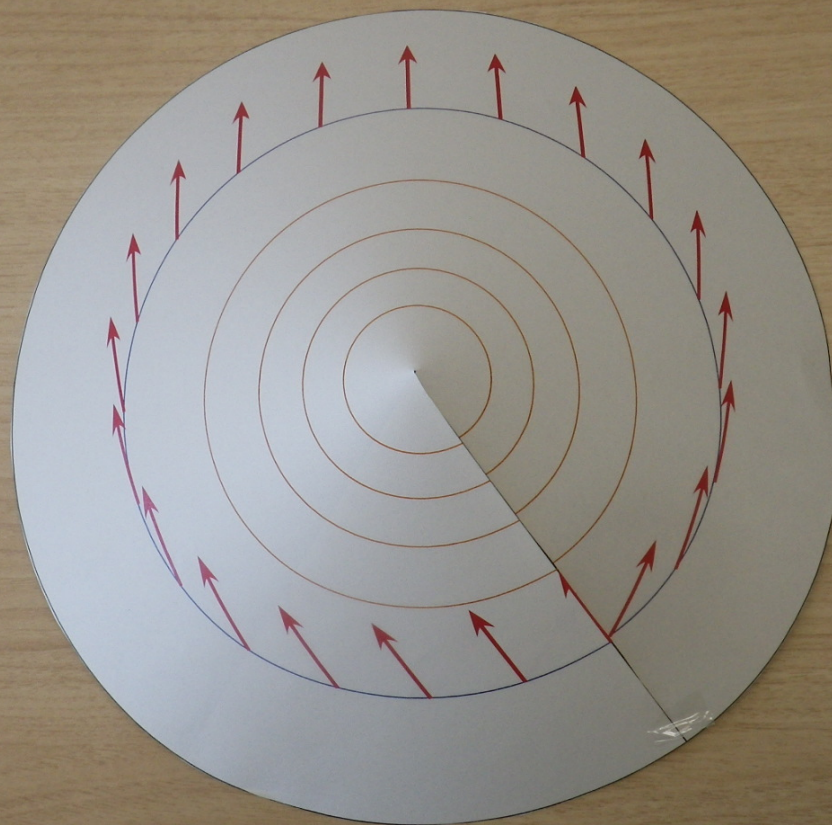


欠損角 $30^\circ$

# 円錐の頂点の周りを平行移動すると 回転を生じる

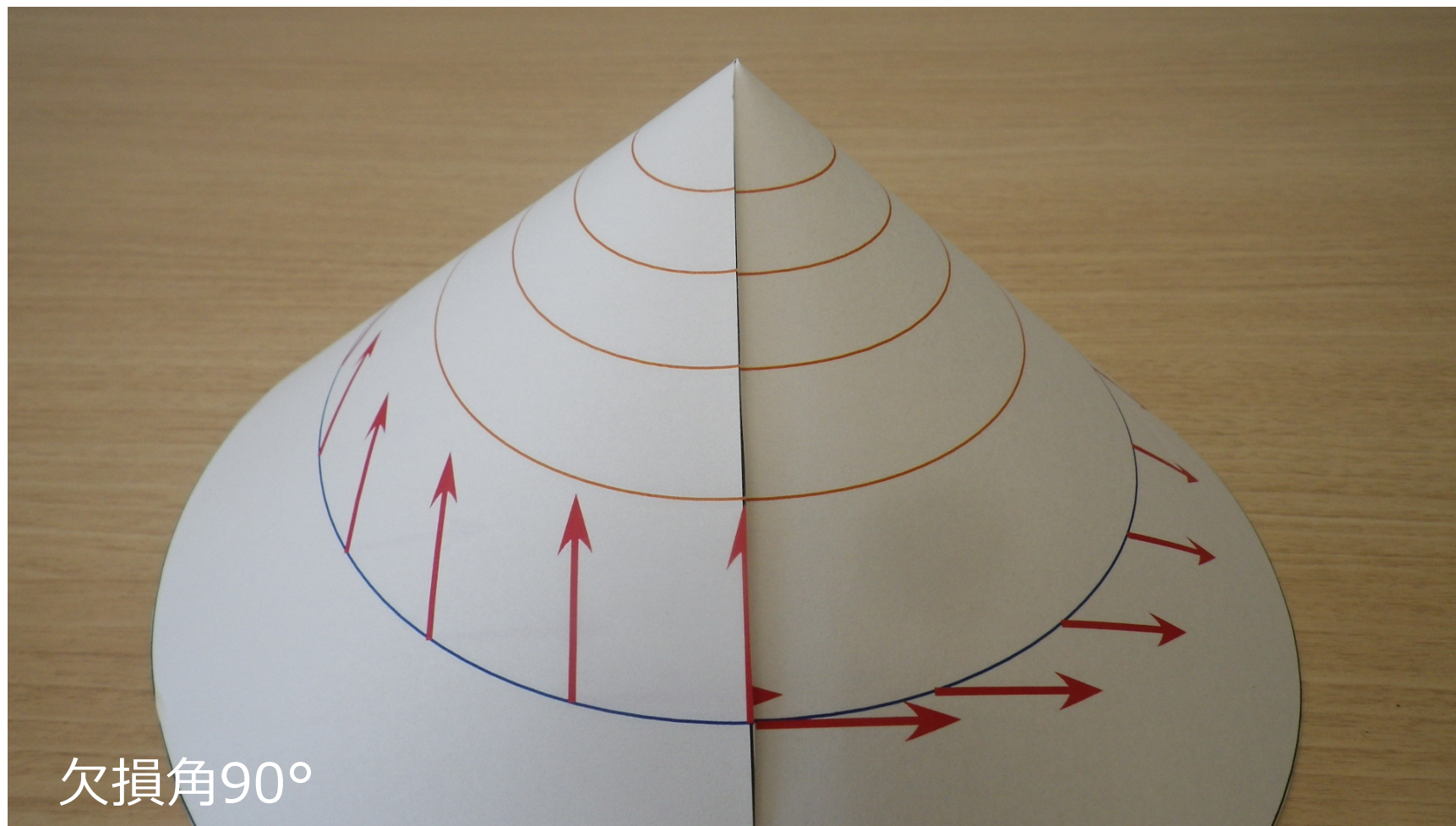


# 円錐の頂点の周りを平行移動すると 回転を生じる

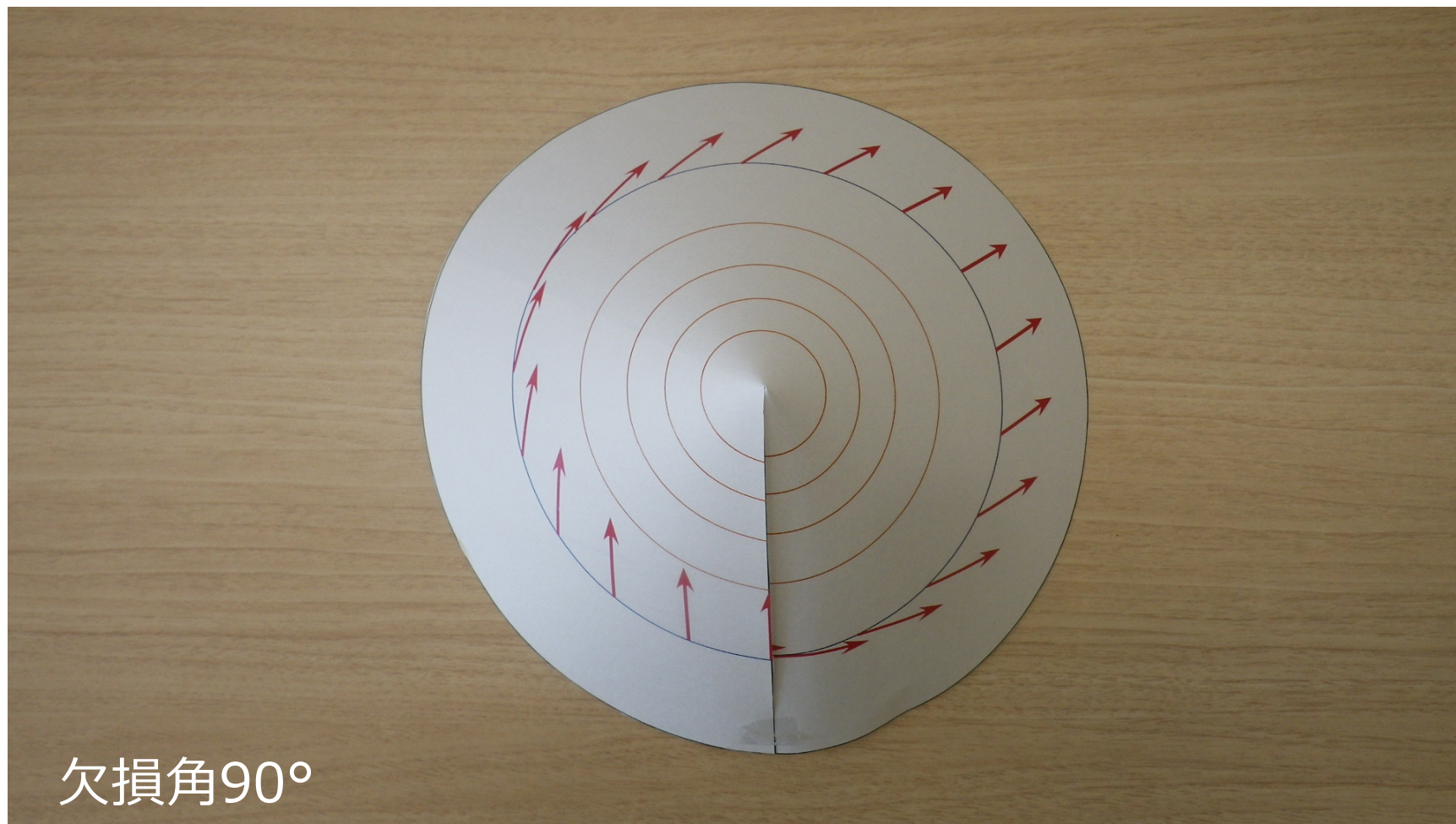


欠損角 $60^\circ$

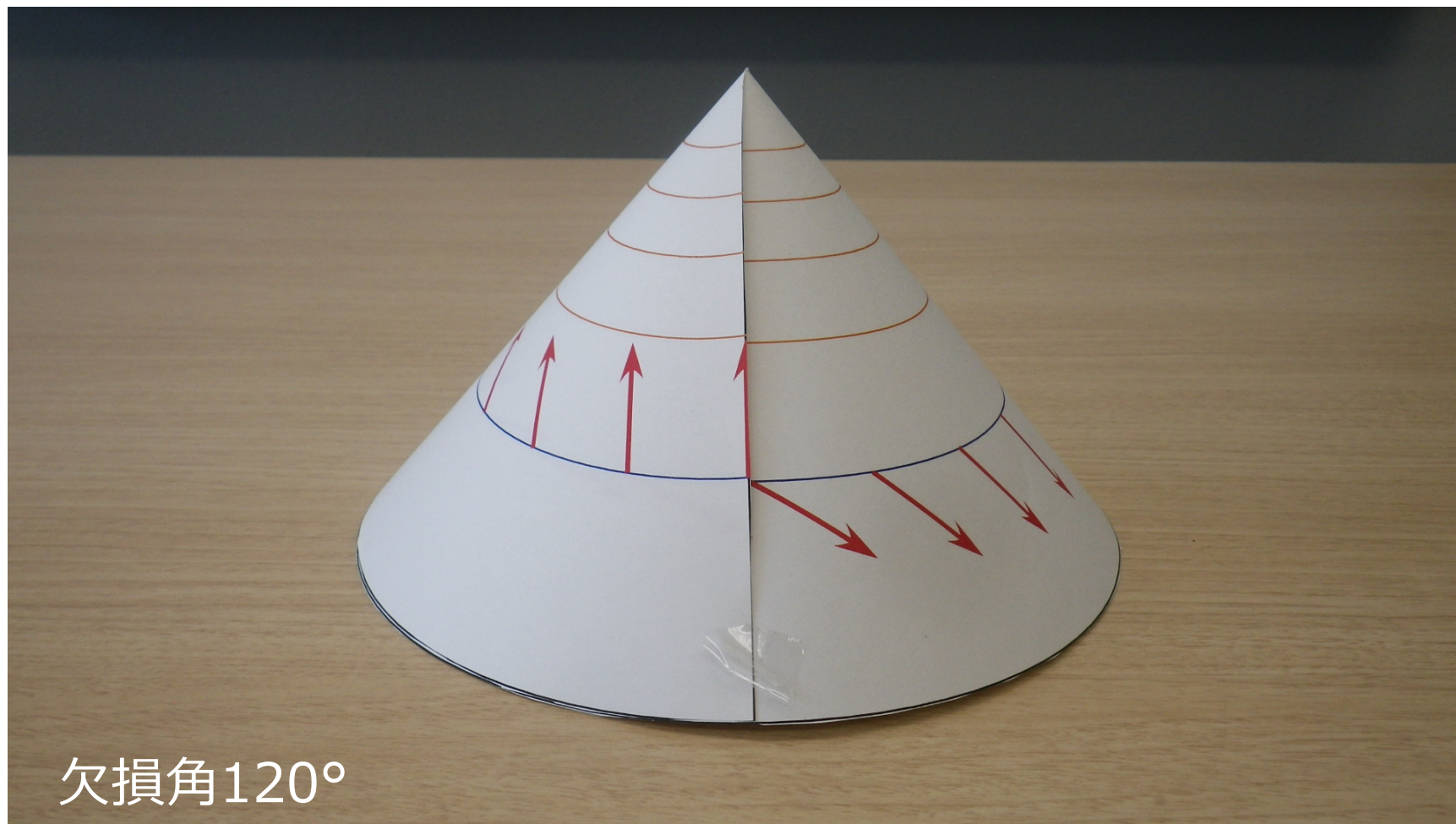
# 円錐の頂点の周りを平行移動すると 回転を生じる



# 円錐の頂点の周りを平行移動すると 回転を生じる

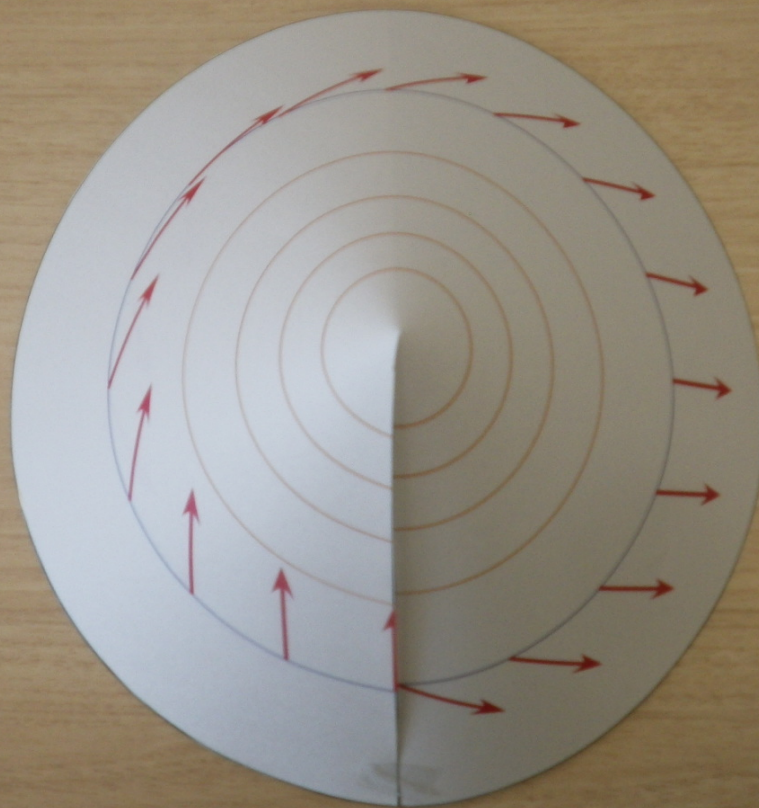


# 円錐の頂点の周りを平行移動すると 回転を生じる



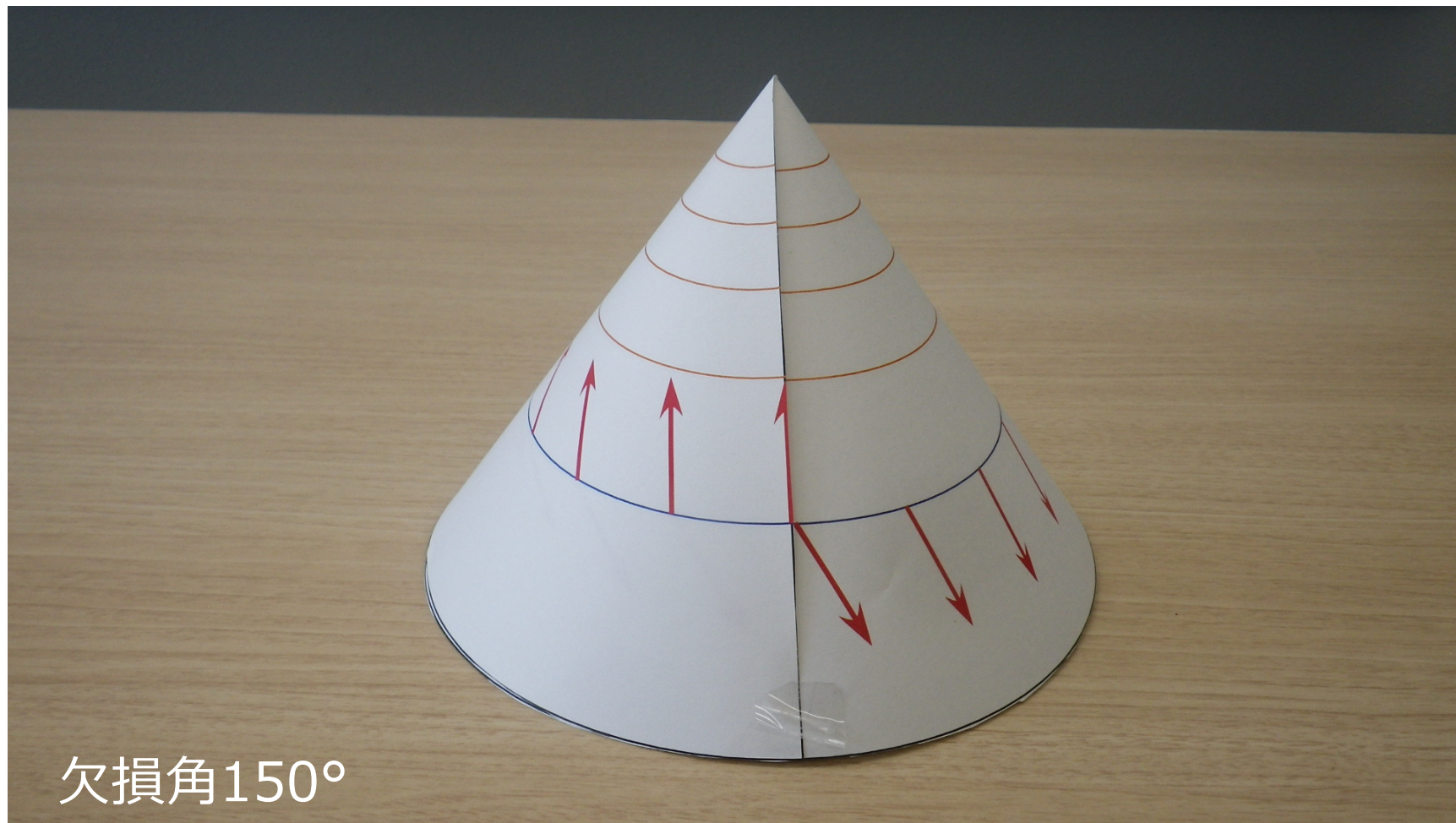


# 円錐の頂点の周りを平行移動すると 回転を生じる

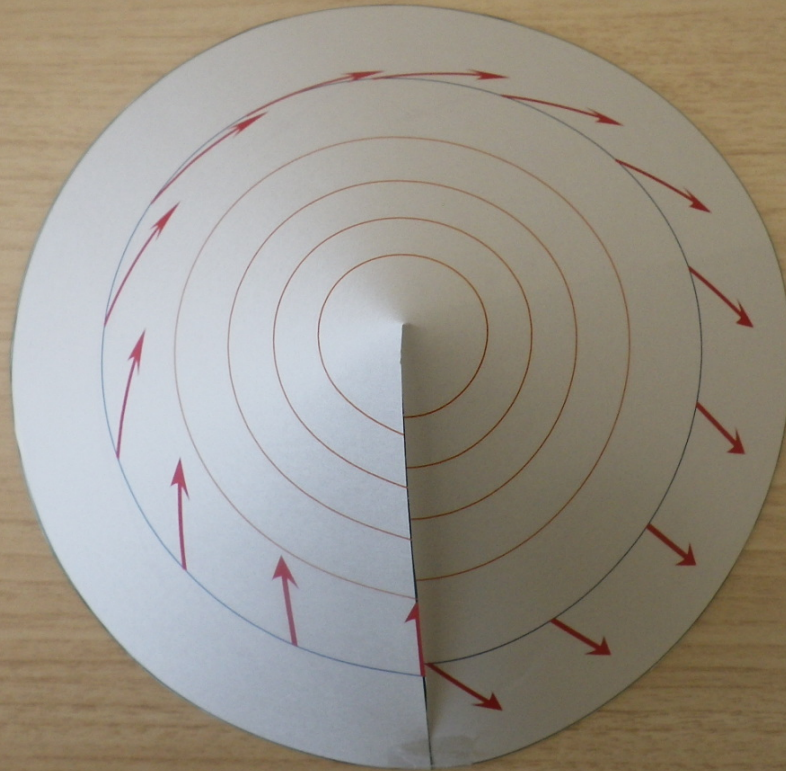


欠損角 $120^\circ$

# 円錐の頂点の周りを平行移動すると 回転を生じる

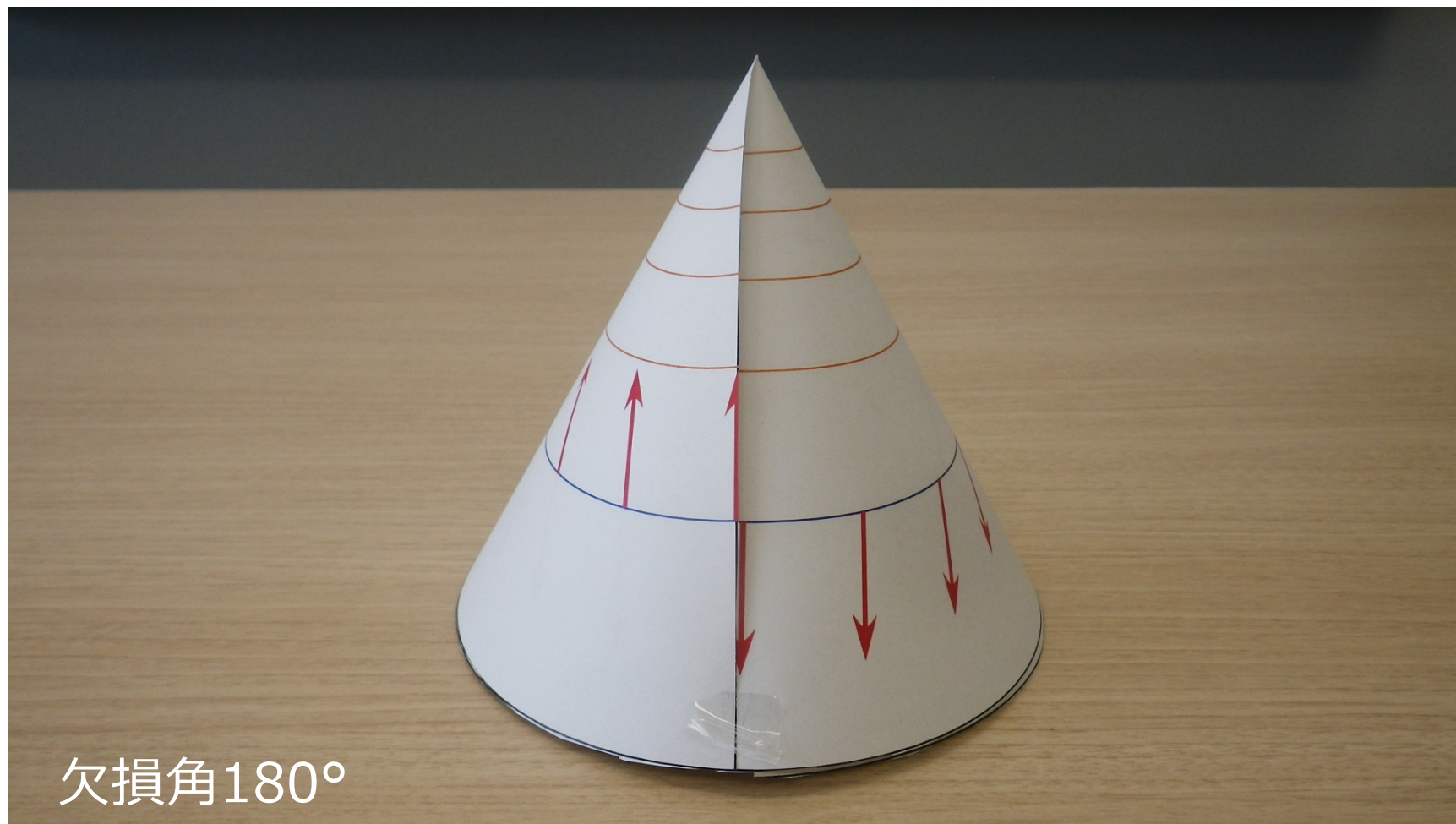


# 円錐の頂点の周りを平行移動すると 回転を生じる

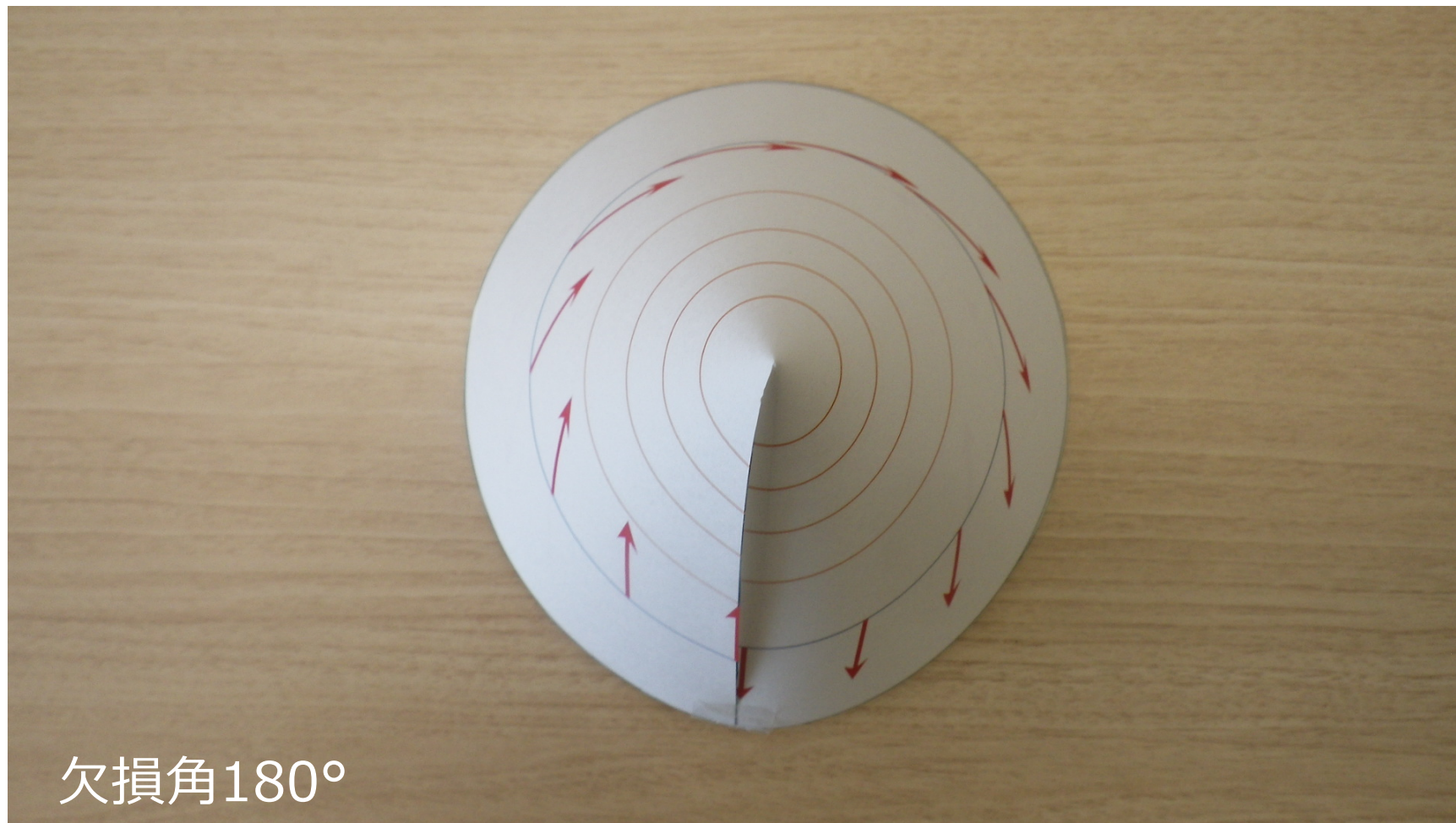


欠損角 $150^\circ$

# 円錐の頂点の周りを平行移動すると 回転を生じる

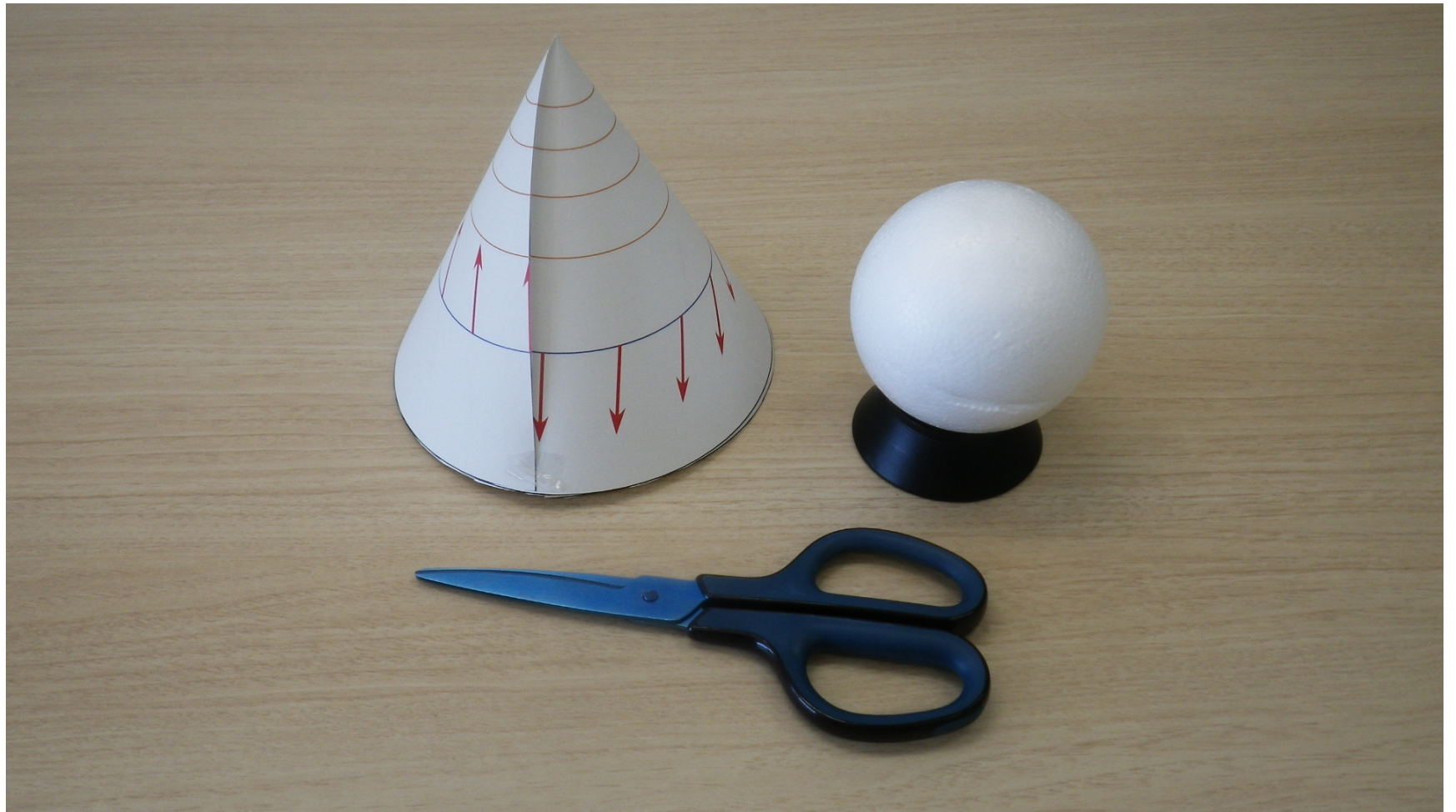


# 円錐の頂点の周りを平行移動すると 回転を生じる

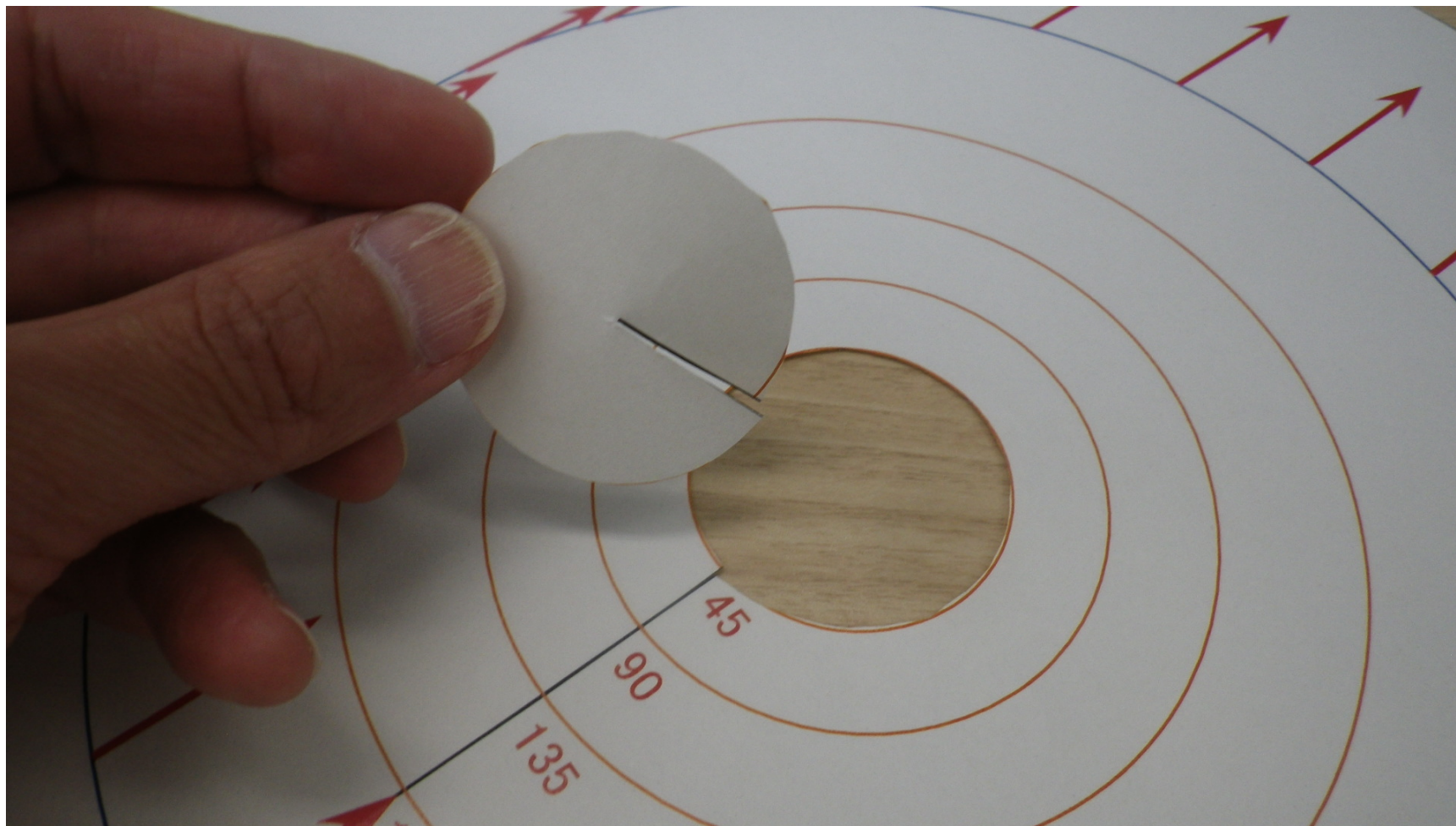


欠損角180°

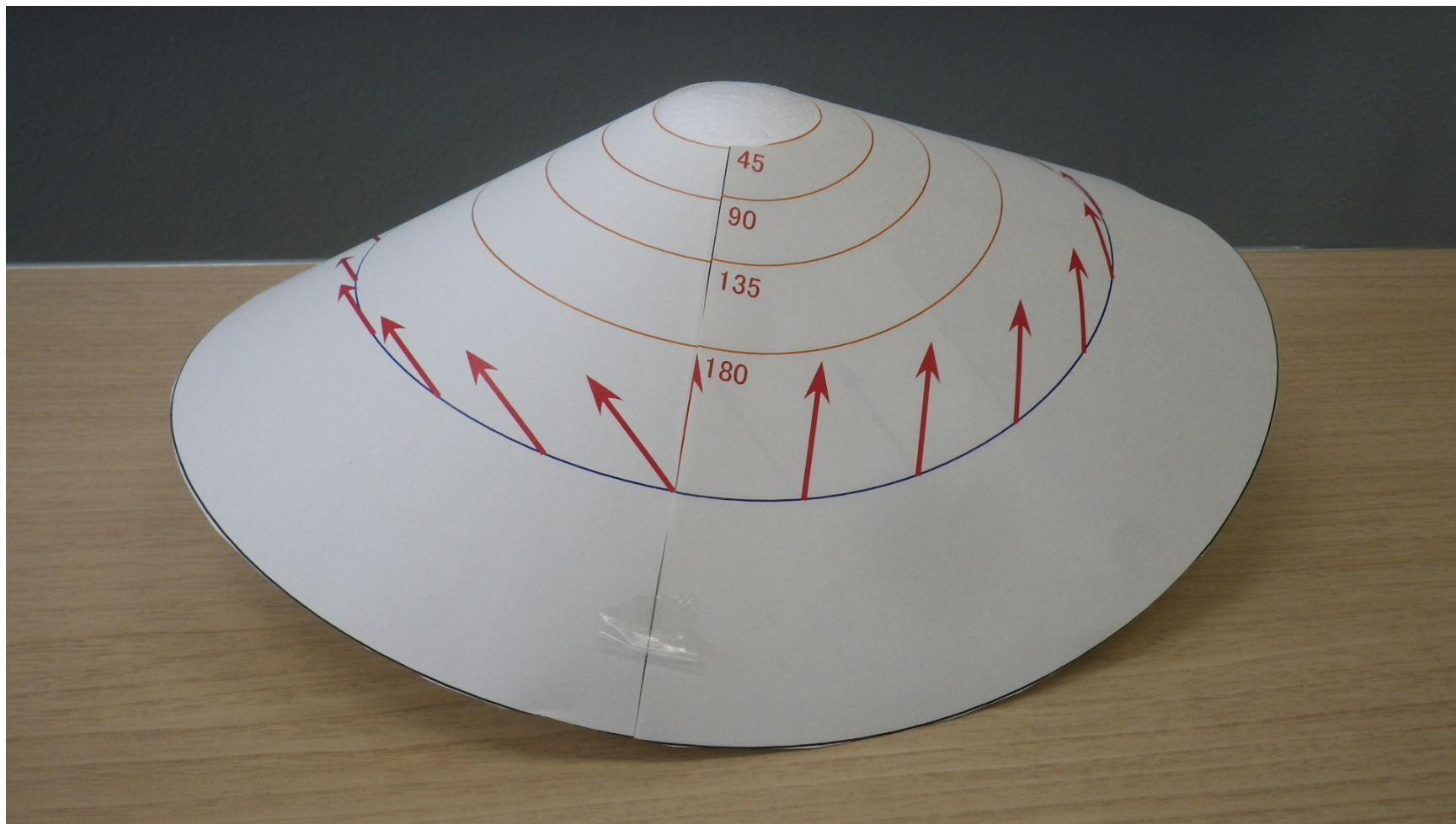
# ボールを持って来る



# 円錐の頂点を切り抜く

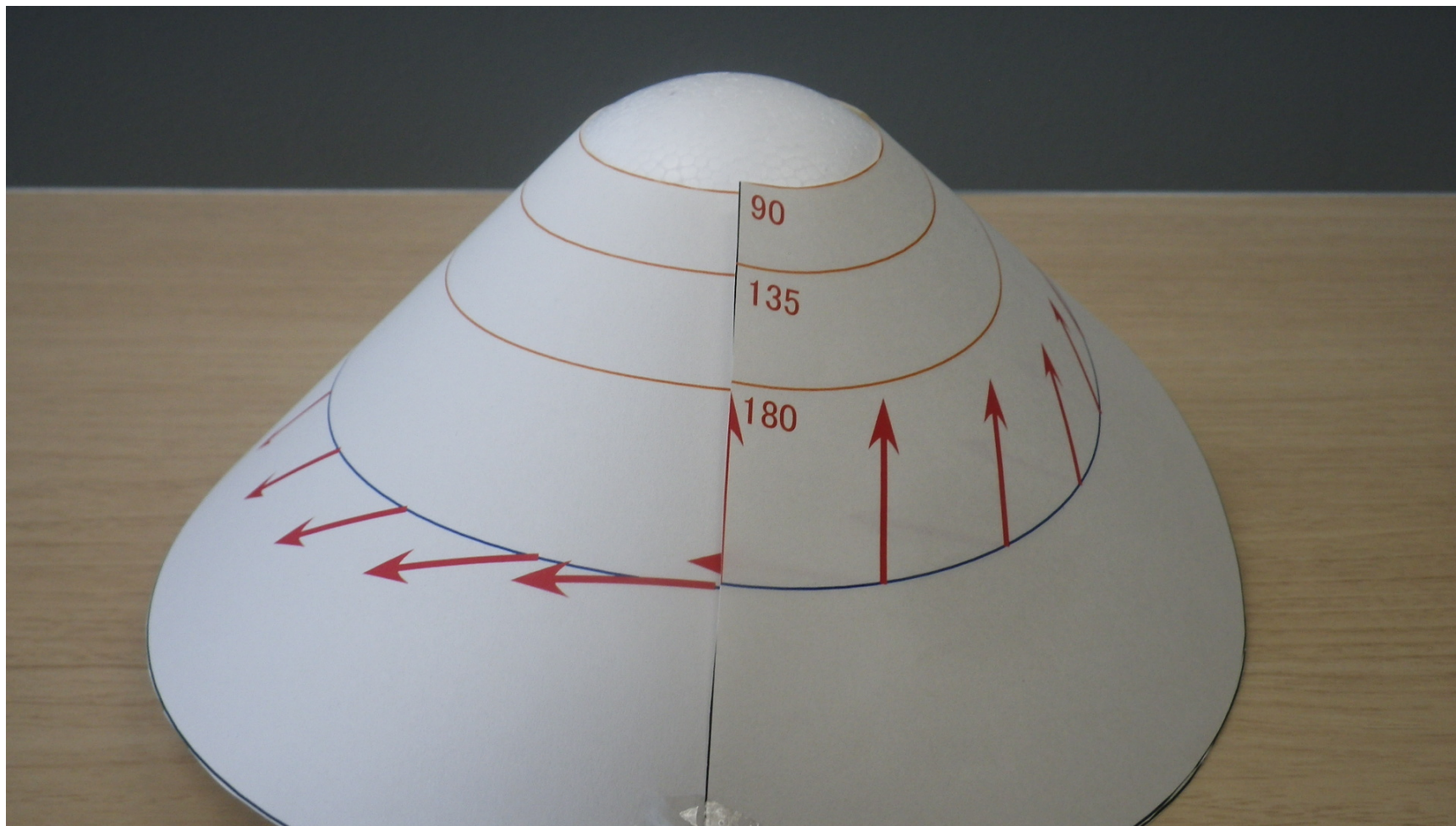


# 円錐を球面にかぶせる

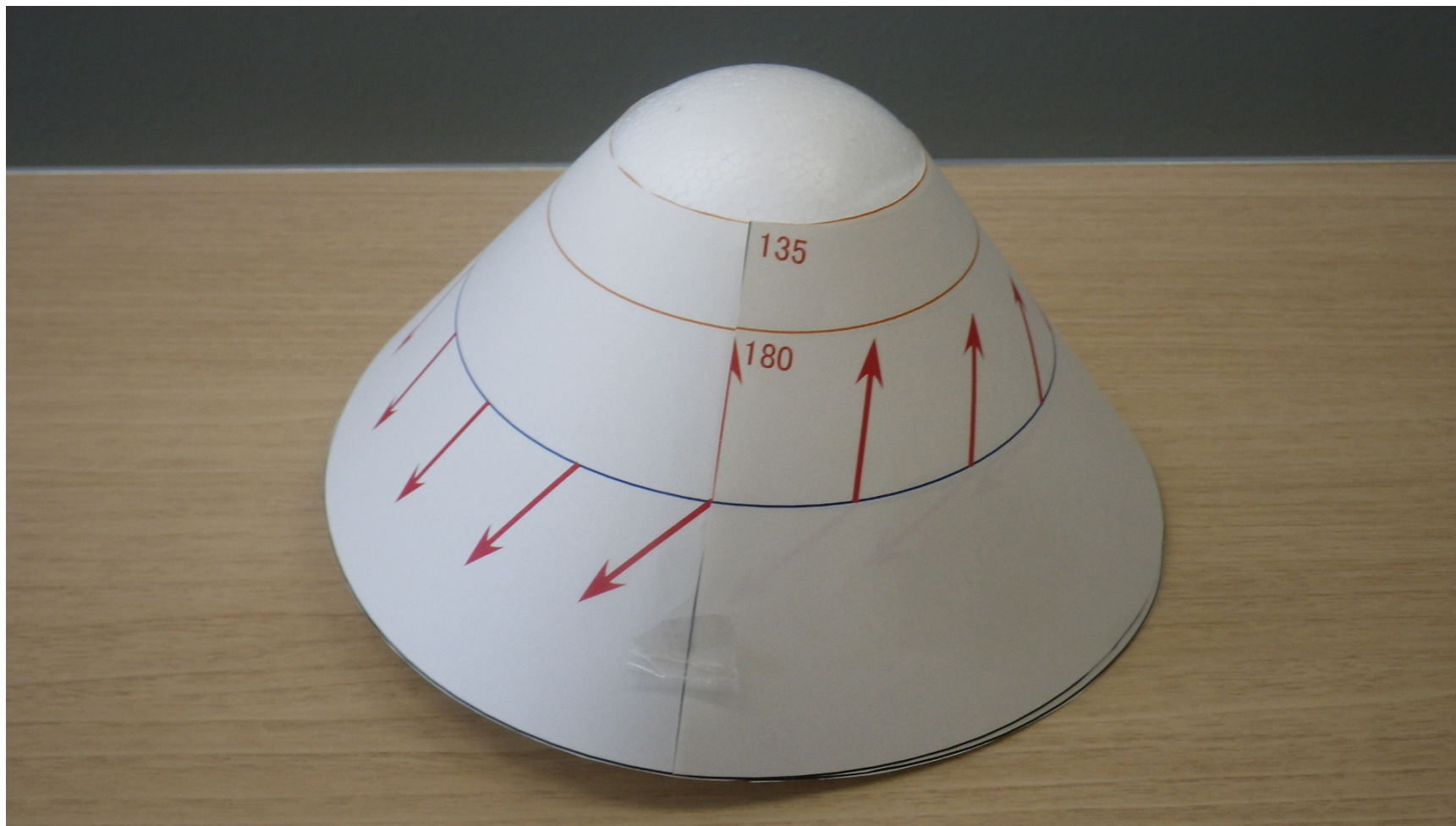




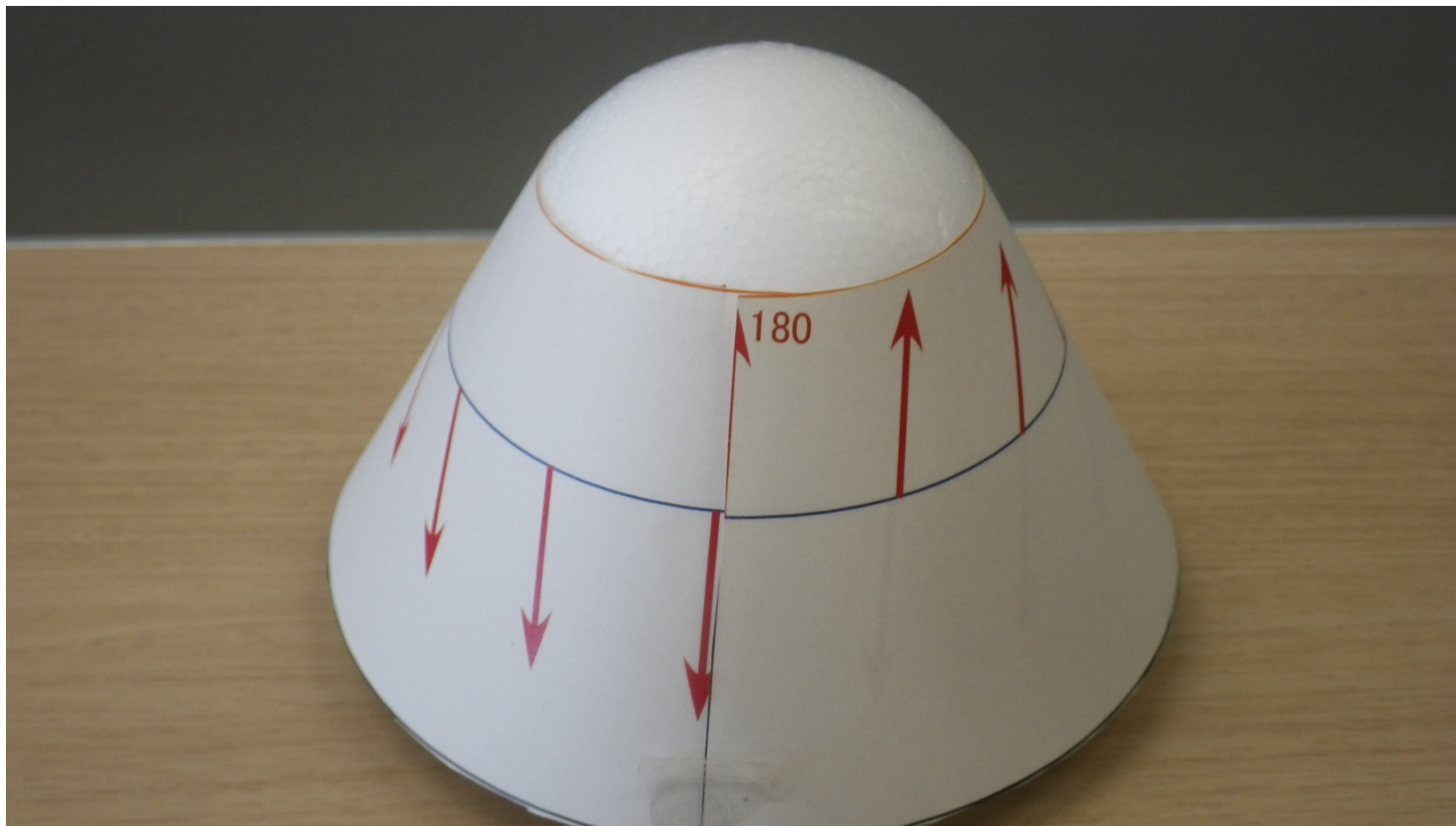
# 円錐を球面にかぶせる



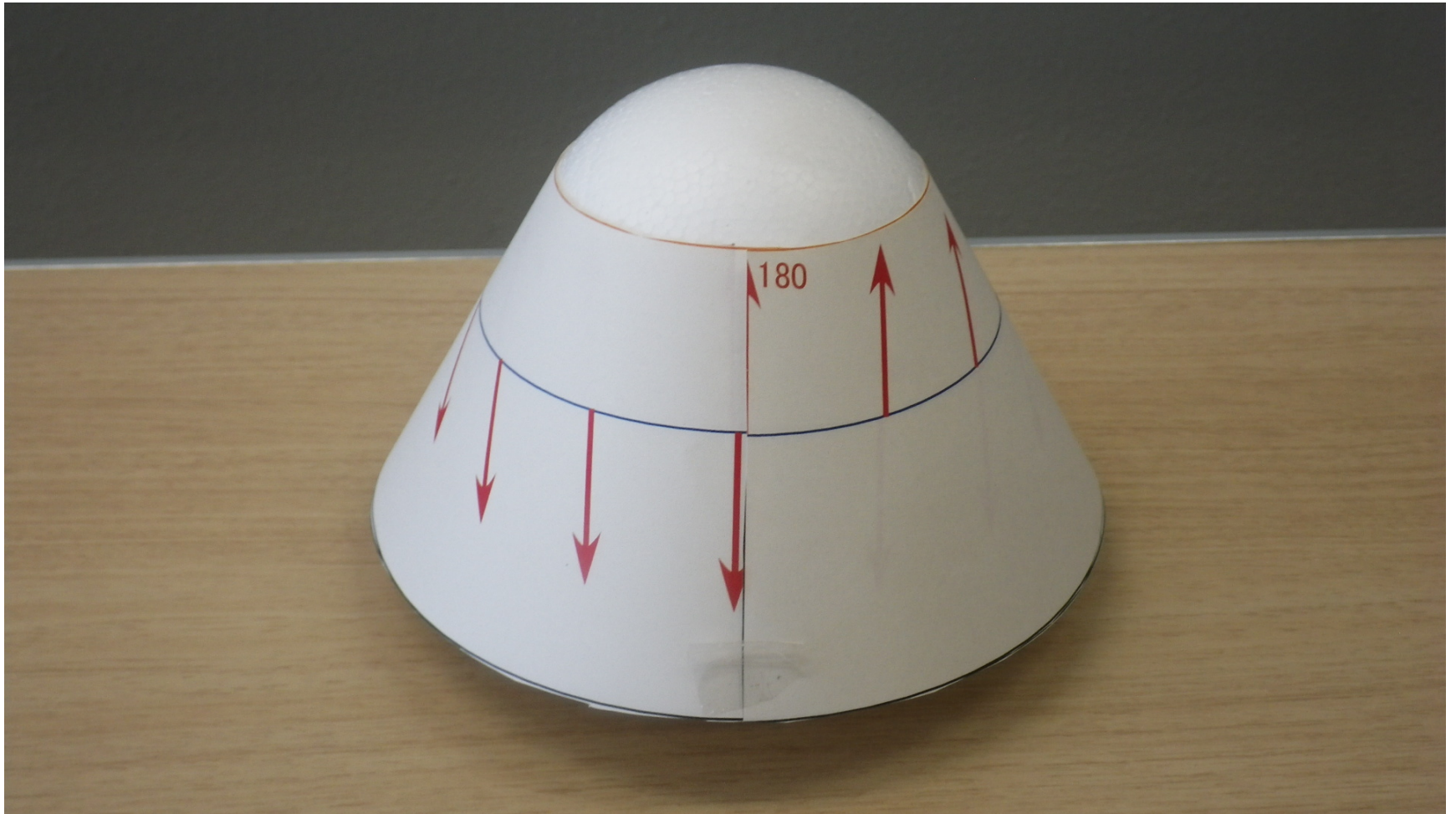
# 円錐を球面にかぶせる



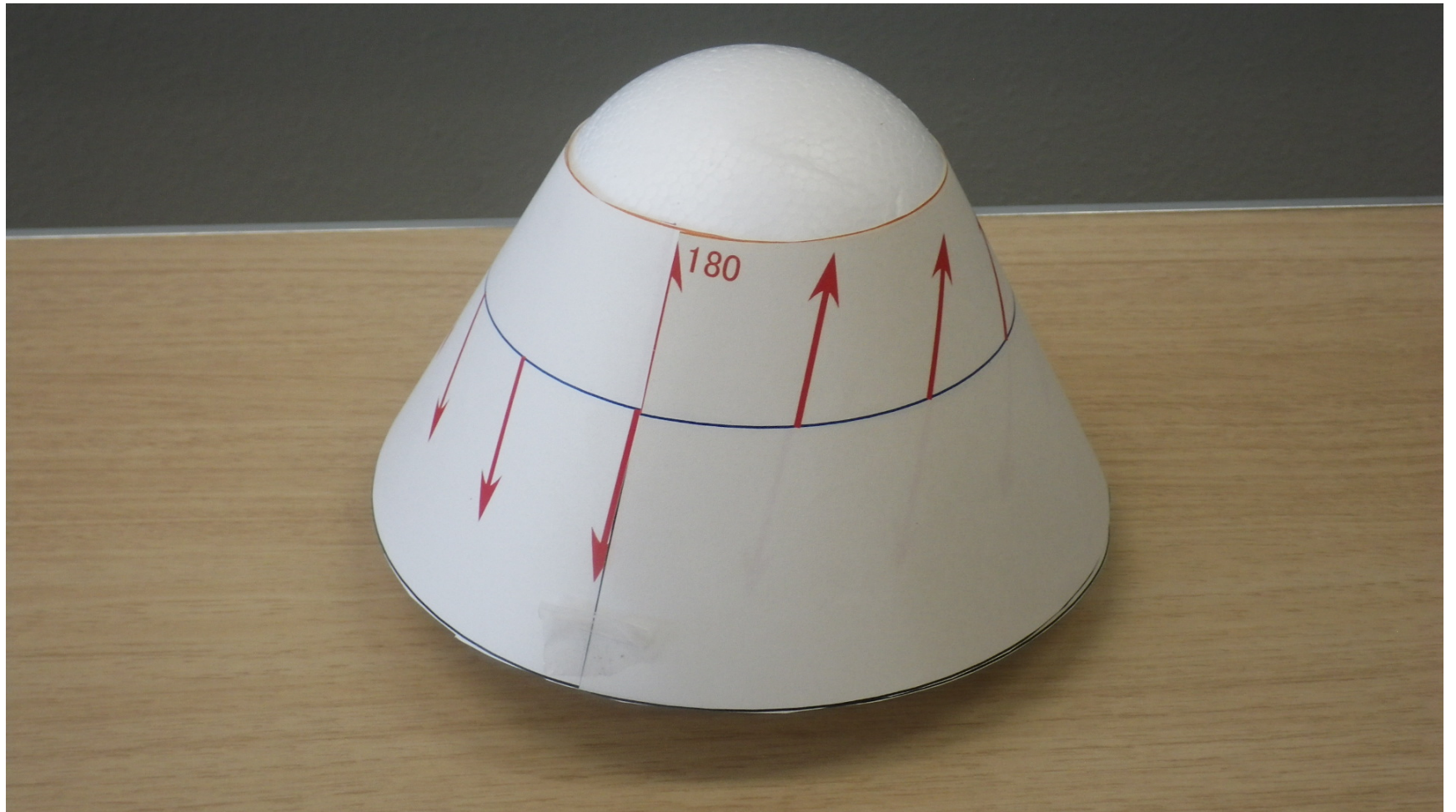
# 円錐を球面にかぶせる



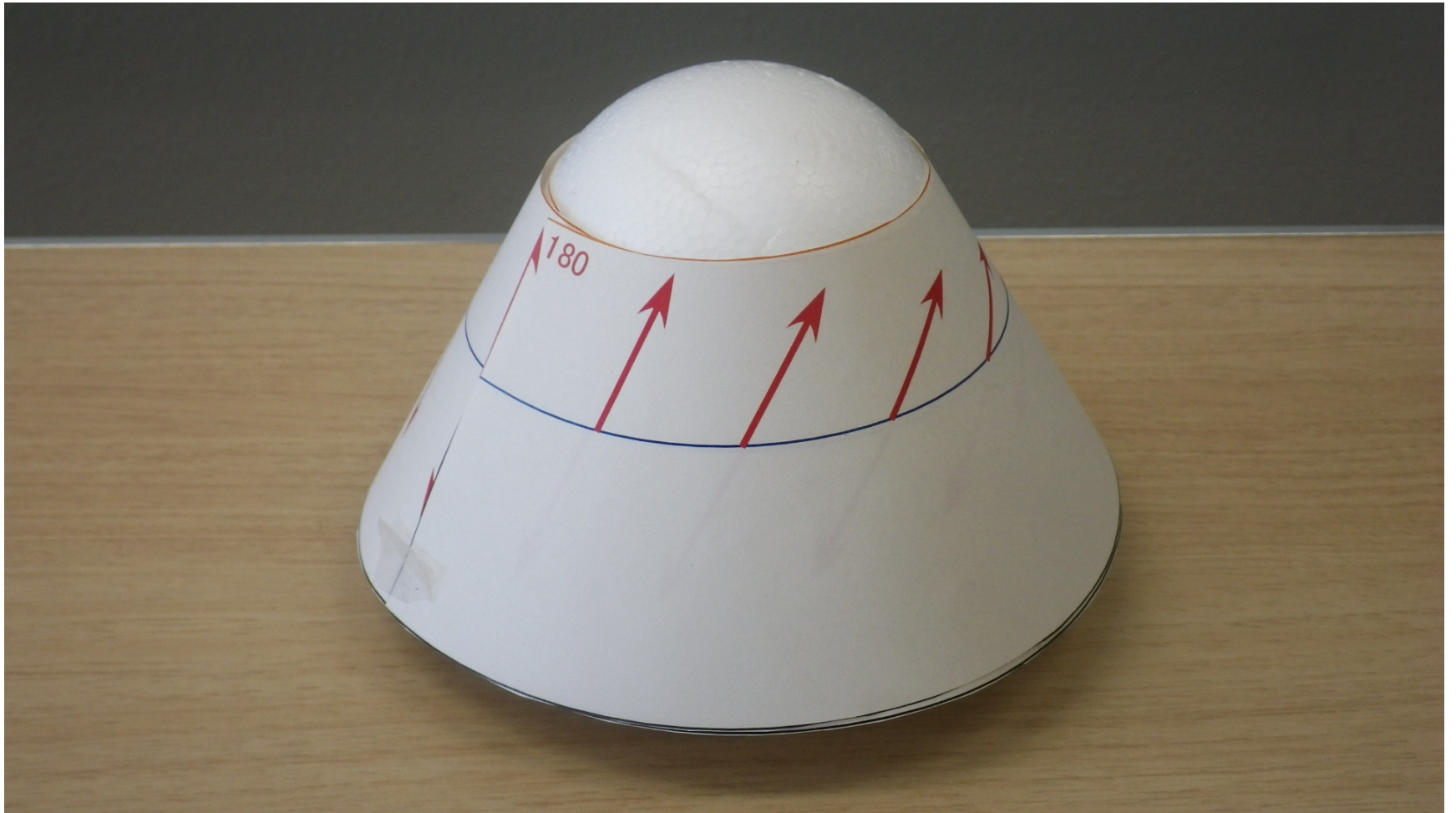
円錐の頂点を球面のキャップで置き換えた



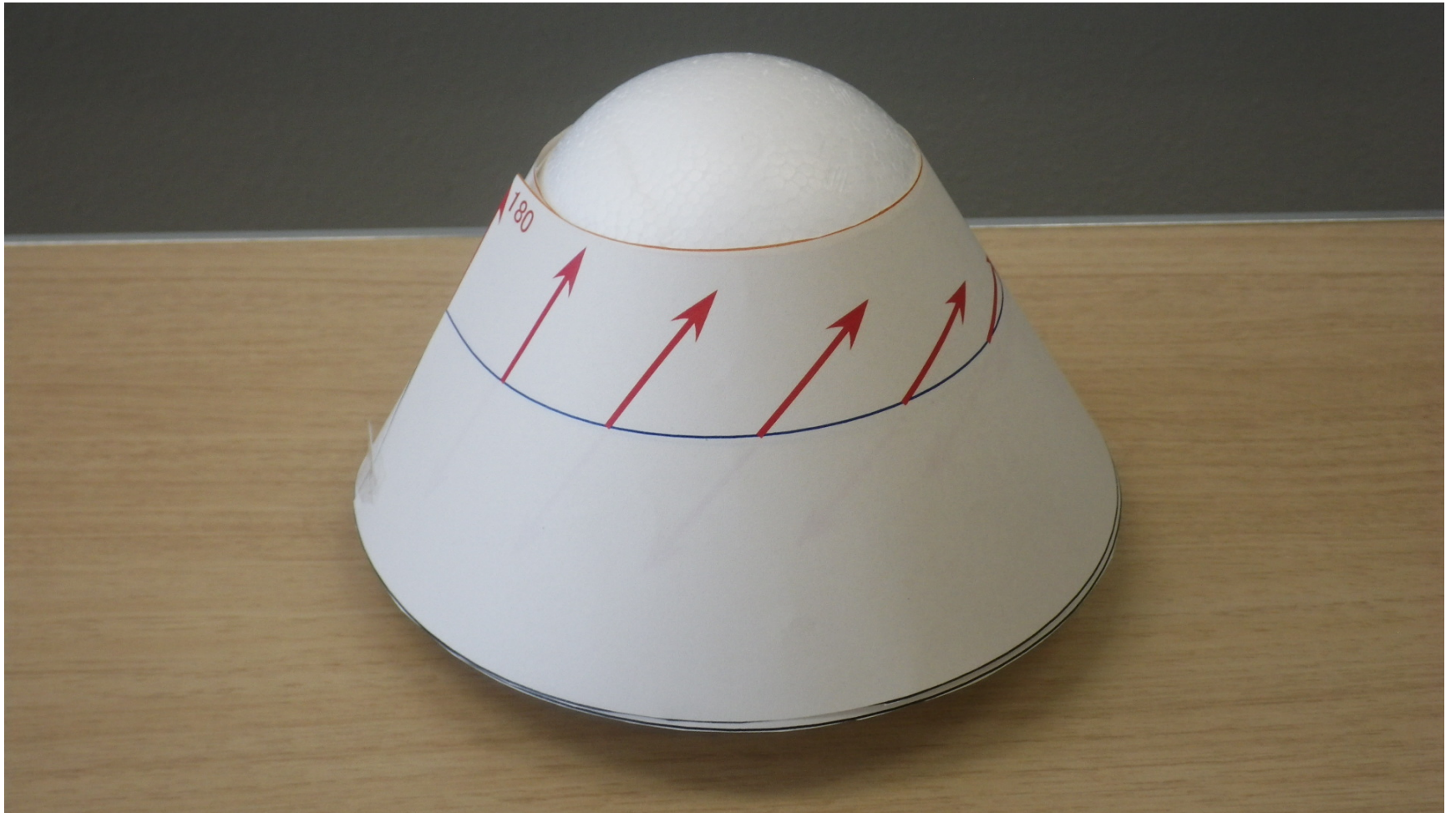
# ベクトルを平行移動する



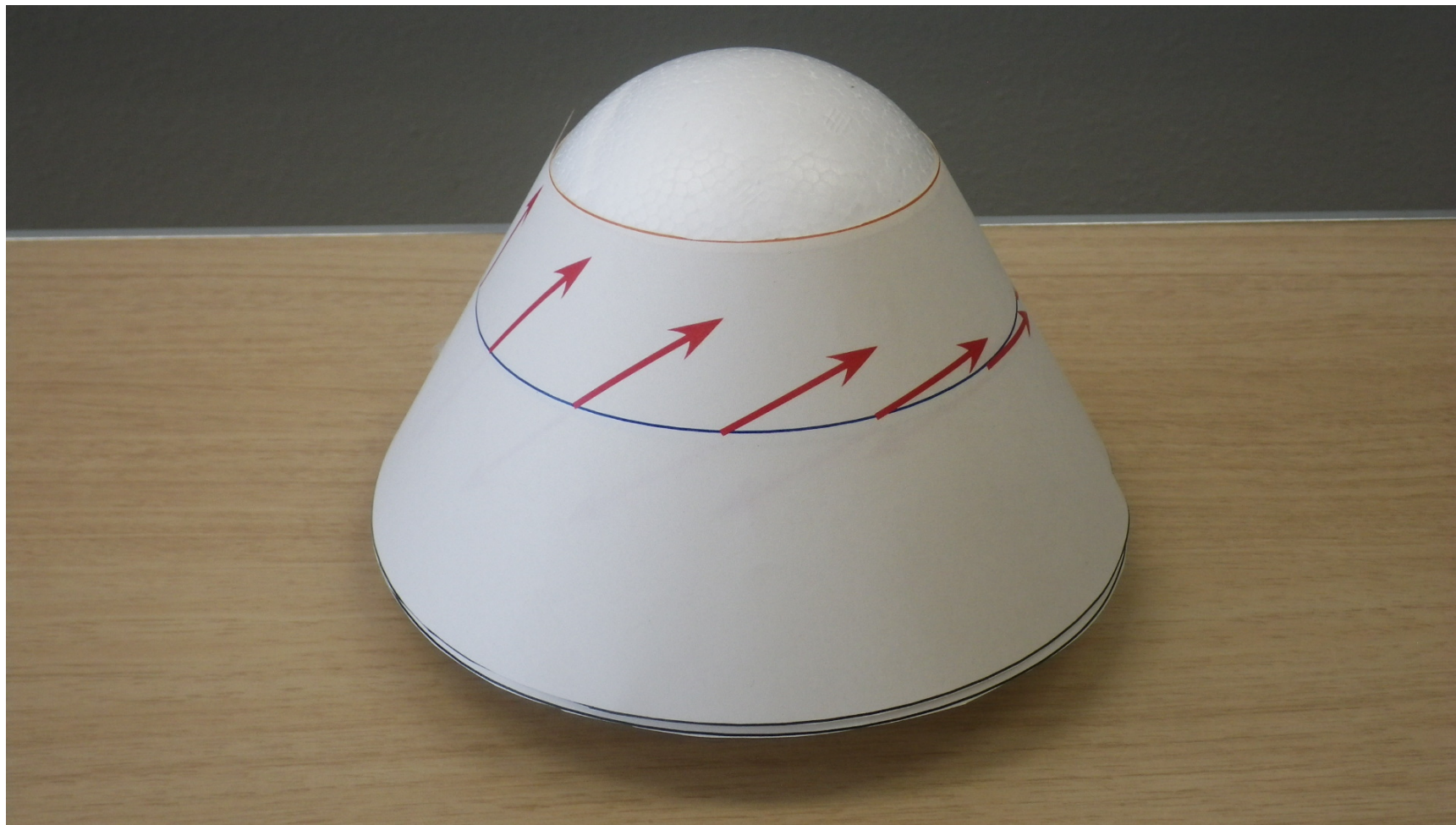
# ベクトルを平行移動する



# ベクトルを平行移動する



# ベクトルを平行移動する





# ベクトルを平行移動する



# ベクトルを平行移動する



# ベクトルを平行移動する



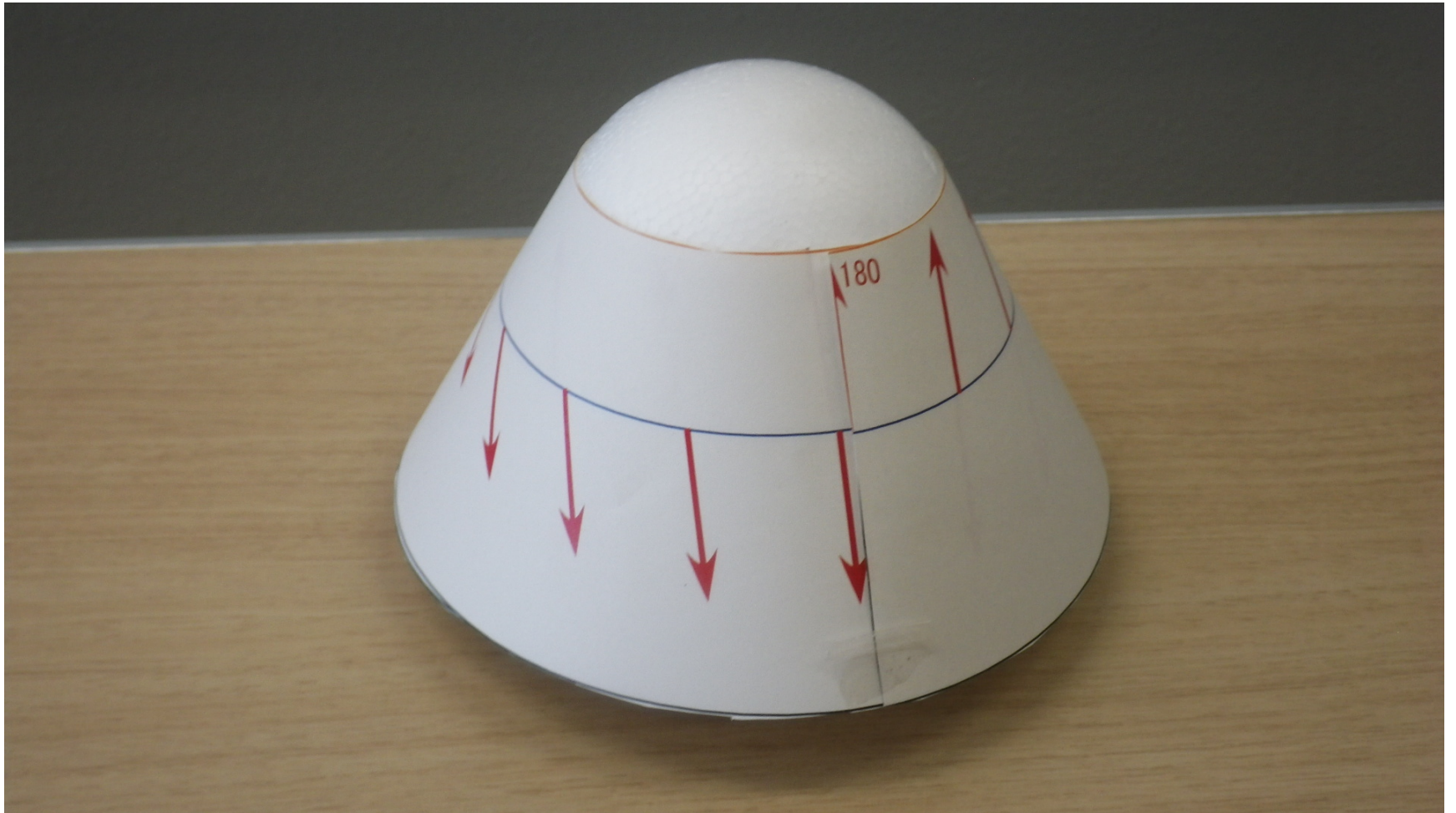
# ベクトルを平行移動する



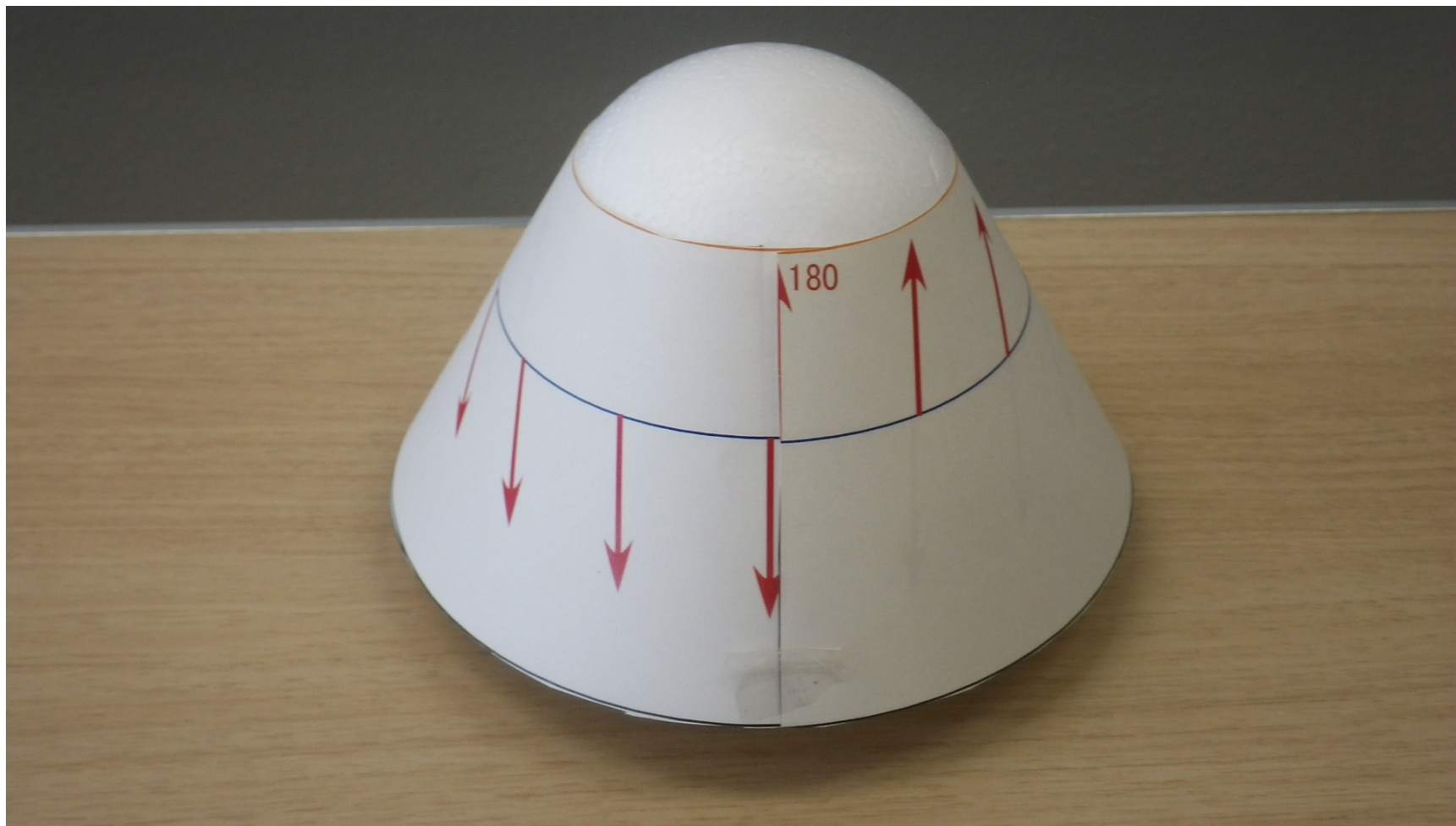
# ベクトルを平行移動する



# ベクトルを平行移動する

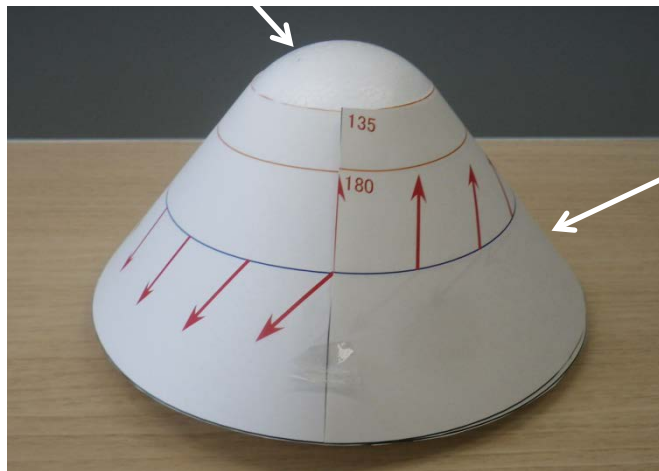


一周するとベクトルは $180^\circ$ 回転している



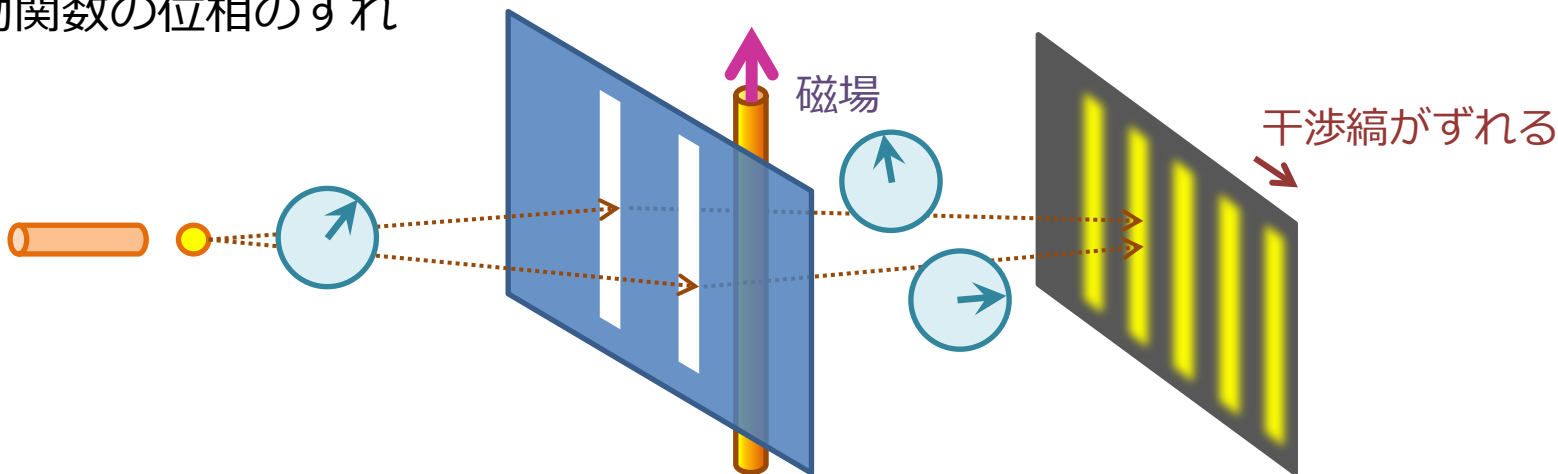
# 円錐の幾何学は アハラノフ・ボーム効果と似ている

曲がったキャップ = 磁場



平坦な側面 = 磁場ゼロ

曲がったキャップの周囲の平坦な場所を一巡りするとベクトルが回転する  
= 波動関数の位相のずれ





# 相似関係

猫：宙返り

電子：アハラノフ・ボーム効果

円錐：平行移動したベクトルの回転

# 幾何学とゲージ場のアナロジー

- ベクトルの平行移動
  - 空間の曲がり
  - 平坦
  - 円錐の頂点
  - 円錐面は平坦であるにもかかわらず、頂点を一周すると、ベクトルの回転を生じる
- ⇔
- 波動関数の進行
  - 磁場
  - 磁場ゼロ
  - コイルに閉じ込められた磁場
  - コイルの外は磁場ゼロであるにもかかわらず、コイルをまたぐと、波動関数の位相がずれる

# 幾何学と猫の宙返りのアナロジー

- ベクトルの平行移動
  - 空間の曲がり
  - 平坦
  - 円錐の頂点
- ⇔
- 角運動量保存則
  - コリオリ力
  - 角運動量ゼロ
  - ? いわくいいがたい
- 
- 円錐面は平坦であるにもかかわらず、頂点を一周すると、ベクトルの回転を生じる
- 角運動量ゼロを保っていても、猫が元の形に戻ると向きが変わっている

# まとめ

- 猫の宙返り = 角運動量保存則にもかかわらず生じる猫の体の正味の回転
- アハラノフ・ボーム効果 = 電子の波動関数は平行移動されているにもかかわらず生じる正味の位相の回転
- どちらも背後にある「空間の曲がり」が顕在化して起きる現象
- 言いたかったこと：見たままの世界がすべてではなく、目に見えない何が背後にあると考えると、目に見える現象が説明できるか、物理学者は考えている。

# 谷村の研究

- 今日の話は、主にアハラノフとボームの研究の紹介で、谷村オリジナルと言える部分はほとんどなかった。
- 谷村は、猫の宙返りのゲージ理論を、原子分子の運動に応用した。
- また、猫の宙返りのゲージ理論を、量子コンピュータの制御にも応用している。