

Stern-Gerlachův experiment, spin

Pavel Werner

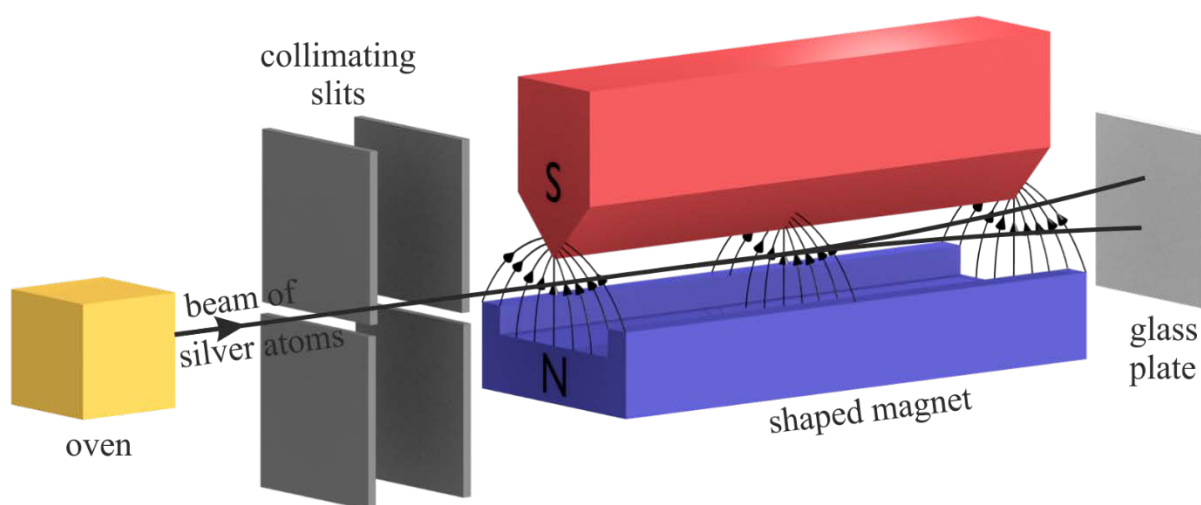
Úvod

Počátkem dvacátých let Otto Stern a Walter Gerlach provedli experiment [1], kde se pomocí aparatury (obr. 1) snažili naměřit magnetický moment valenčního elektronu atomu stříbra. Atomy stříbra byly v experimentu použity, protože mají lichý počet elektronů s jedním elektronem ve valenční slupce s . Předpokládali, že se magnetické momenty všech zbývajících elektronů vzájemně vyruší. Atomy stříbra, které se odpařovaly z pícky, byly kolimovány do svazku procházejícího nehomogenním magnetickým polem. Směr pohybu svazku atomů byl kolmý na směr pole a jeho gradient. Na stínítku pak pozorovali rozštěpení původní čáry na dvě oddělené stříbrné křivky (obr. 2), z čehož usoudili, že elektron má magnetický moment se dvěma možnými směry a je kvantován.

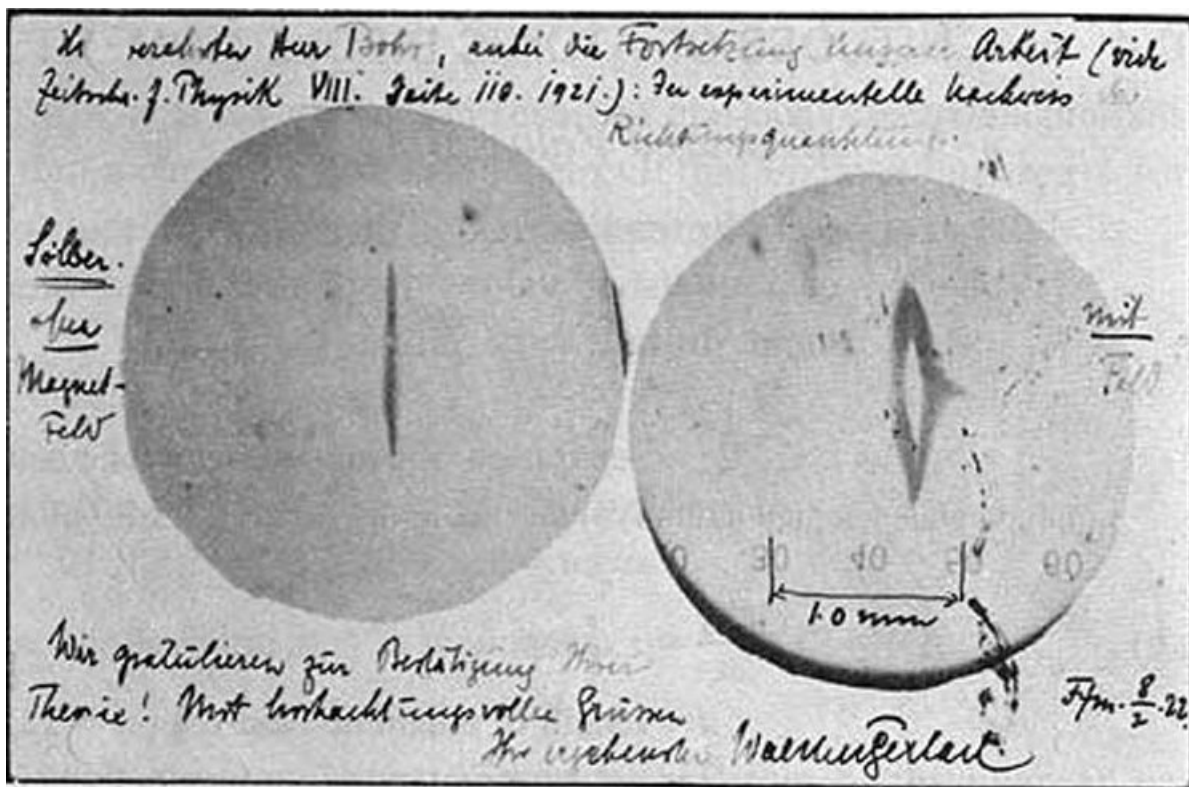
Protože u valenčního elektronu ve slupce s neměl být podle tehdejší teorie žádný magnetický moment, pak pozorovaný nenulový magnetický moment atomů stříbra musel být vyvolán dalším momentem hybnosti – spinem. Stern – Gerlachův experiment je považován za experimentální důkaz existence elektronového spinu.

V roce 1925 holanští fyzikové Samuel A. Goudsmit a George E. Uhlenbeck postulovali existenci vnitřního úhlového momentu nezávislého na orbitální charakteristice, a tedy existenci čtvrtého kvantového čísla, které nabývá pouze dvou hodnot a to $+1/2$ a $-1/2$.

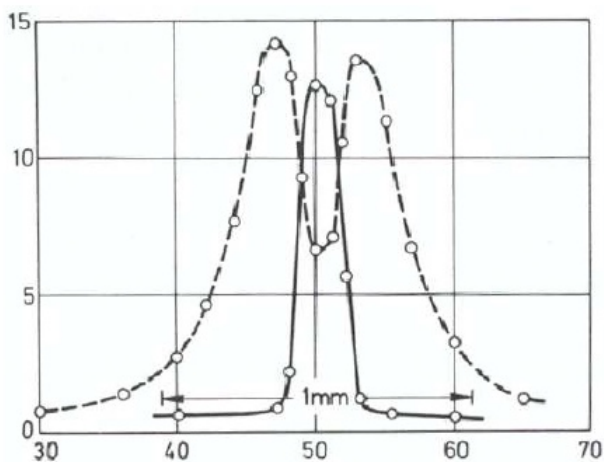
Jde skutečně o důkaz existence spinu elektronu, nebo byl výsledek experimentu nesprávně vyhodnocen, protože neobsahoval fyzikální vysvětlení celého procesu?



Obr. 1 Schéma Stern-Gerlachova experimentu.



Obr. 2 Oznámení výsledku experimentu Bohrovi.



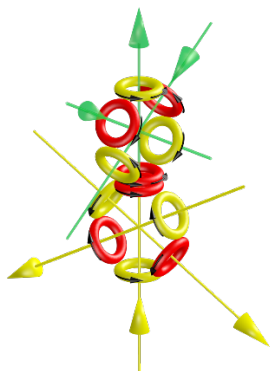
Obr. 3 Výsledek experimentu. Srovnání rozdělení intenzity svazku atomů s vypnutým polem (1 vrchol) a se zapnutým polem (2 vrcholy)

Objasnění experimentu podle Prstencové teorie (RT)

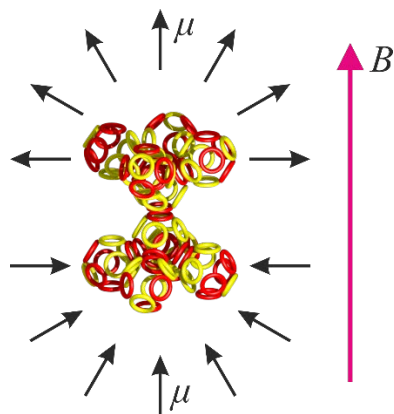
Při objasnění výsledků experimentu musíme začít u prstencového modelu jádra atomu stříbra. Tento model jádra se podle RT skládá z globulí, u nichž magnetické momenty prstencových modelů protonů směřují jednou dovnitř globule a u sousední globule směřují ven (obr. 4).

Model jádra atomu stříbra se skládá ze čtyř úrovní spojení globulí. V každé úrovni se mění směr vektoru magnetického momentu. A protože je počet úrovní sudý, nakonec po sečtení složek jednotlivých vektorů vyjde, že jádro jako celek má jasný směr vektoru magnetického momentu (obr. 5).

Protože rozložení elektronů v obalu atomu stříbra je determinováno strukturou jádra, má rovněž výsledný magnetický moment součtu všech elektronů v obalu atomu stříbra jednoznačný směr a velikost. Elektronový obal jako celek vytváří magnetický dipól.



Obr. 4 Rozdílné směry magnetických momentů sousedních globulí u modelu jádra atomu uhlíku.



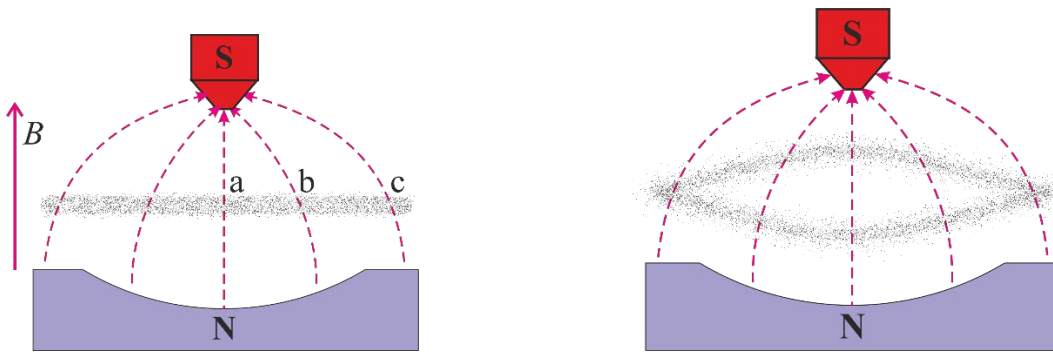
Obr. 5 Směry magnetických momentů modelu jádra atomu stříbra

Bez působení vnějšího magnetického pole je vektor magnetického momentu atomu stříbra náhodně orientován v prostoru. V homogenním poli tento vektor koná precesi kolem z-tové složky pole podle úhlu natočení vektoru magnetického momentu atomu vůči vektoru magnetické indukce B vnějšího pole. V nehomogenním poli působí na magnetický moment dodatečná síla, jejíž směr a velikost závisí na orientaci magnetických momentů jednotlivých elektronů vůči vnějšímu magnetickému poli.

Magnetické momenty všech elektronů v atomech reagují na změnu vnějšího magnetického pole. Bez přítomnosti vnějšího magnetického pole se v látkách účinky magnetických momentů atomů, molekul nebo iontů navzájem eliminují, takže výsledný magnetický moment látky je minimální (nulový).

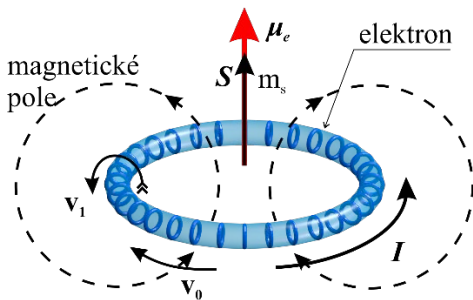
Předpokladem experimentu je, že atomy stříbra mají nenulový magnetický moment. Atomy s nenulovým magnetickým momentem interagují s nehomogenním magnetickým polem a jsou vychýleny z přímého směru v závislosti na prostorové orientaci magnetického momentu.

V experimentu však byly naměřeny pouze dvě orientace (obr. 6).



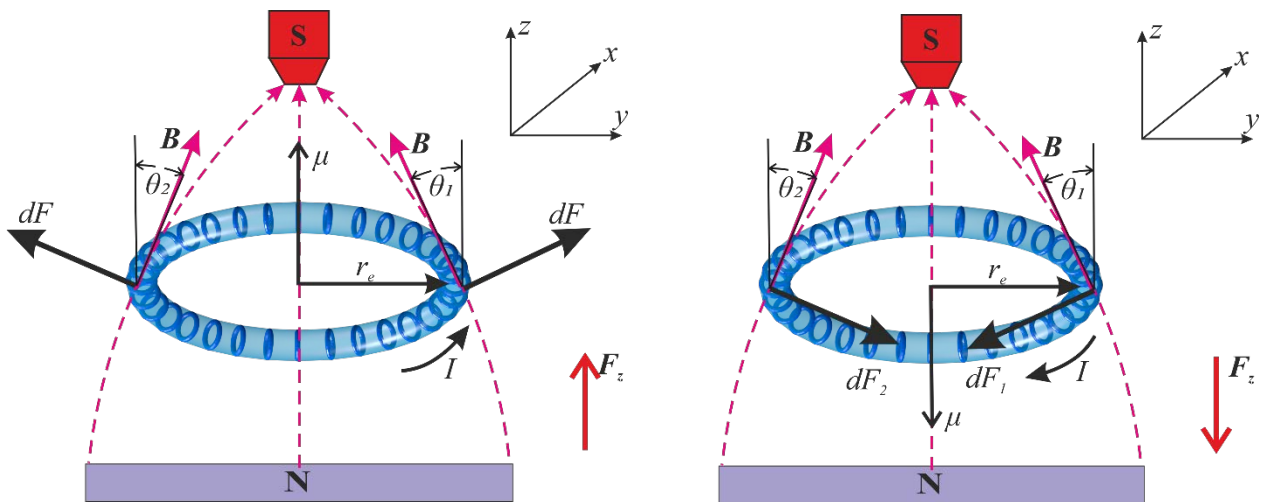
Obr. 6 Výsledek Stern-Gerlachova experimentu.

Pro vysvětlení tohoto jevu si zvolíme model prstence elektronu, kterým teče elektrický proud I , a je svojí osou umístěn do nehomogenního pole například nad severní pól tyčového magnetu (obr.7).



Obr. 7 Magnetický moment μ_e modelu elektronu podle RT

V místě prstence elektronu vnější magnetické pole s indukcí B svírá s normálou úhel θ (obr.8). Pokud je elektron umístěn v ose magnetu je síla působící na oba konce elektronu stejná. Elektron je vychylován pouze ve směru osy z ve směru podle orientace svého magnetického momentu.



Obr. 8 Model prstence elektronu nad severním pólem tyčového magnetu. Magnetická indukce B_{out} svírá s osou z úhel θ

Magnetická síla působící na malý element délky prstence $d\mathbf{l}$, kterým prochází elektrický proud I je dána vztahem

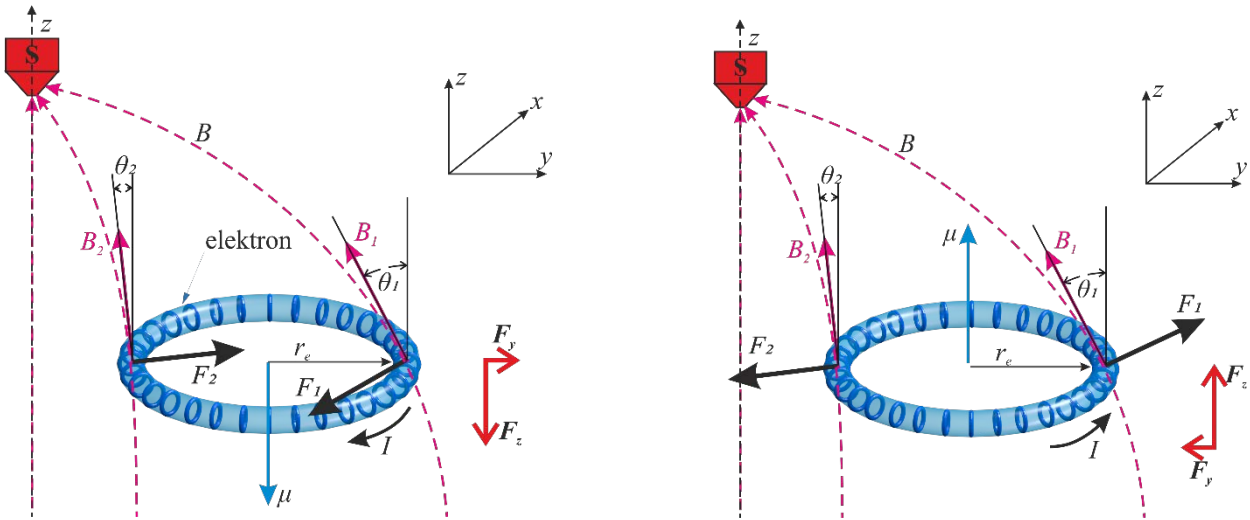
$$d\mathbf{F}_B = I d\mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad (1)$$

kde \mathbf{B} je vektor indukce magnetického pole v bodě na prstenci P .

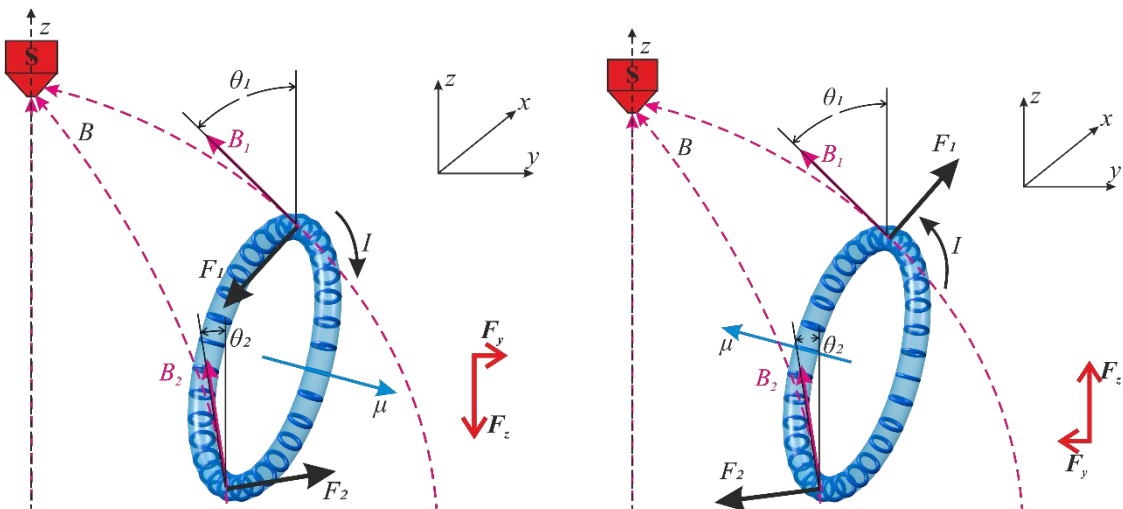
$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_{out} + \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_l \frac{I d\mathbf{l} \times \mathbf{R}}{\|\mathbf{R}\|^3} \quad (2)$$

Síla \mathbf{F}_B je funkcí úhlu θ , F_{Bz} míří do směru osy $+z$, a je tvořena vnějším magnetickým polem. Pokud použijeme prstenec elektronu s opačně orientovaným magnetickým momentem, síla bude opačně orientovaná vzhledem k relaci (1).

Na model prstence elektronu, který se nachází mimo osu z , působí na jeho vzdálenějším konci od osy z síla orientovaná pod jiným úhlem než na nejbližším bodě prstence k ose z (obr.9, 10). To má za následek pohyb elektronu nejen v ose z , ale i v ose y podle směru vektoru magnetického momentu elektronu.



Obr. 9 Síla \mathbf{F}_B je funkcí úhlu θ



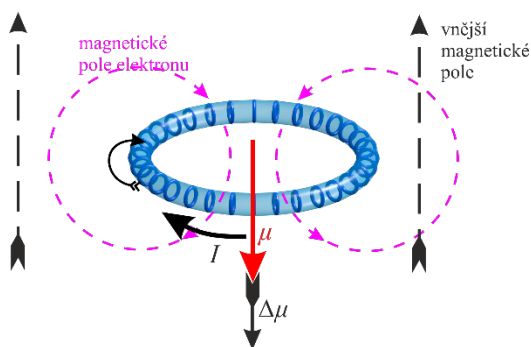
Obr. 10 Síla \mathbf{F}_B je funkcí úhlu θ

Působením vnějšího magnetického pole dojde v modelech prstencové struktury elektronů podle Prstencové teorie (Ring theory – RT) k indukci magnetického pole. Pokud je magnetický moment modelu elektronu $\Delta\mu$ antiparalelní k vnějšímu magnetickému poli, dojde magnetickou indukcí ke zvětšení proudu I_1 a tím i ke zvětšení účinků síly F_1 a F_2 o velikost ΔF , (obr 11). Při paralelním vektoru magnetické indukce \mathbf{B} modelu

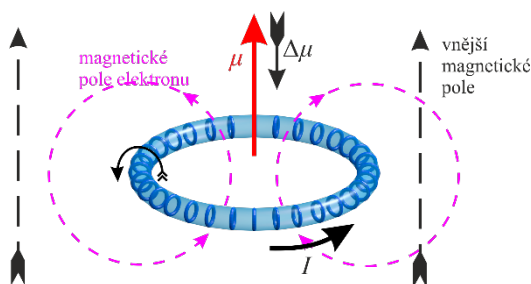
elektronu s vnějším magnetickým polem \mathbf{B}_{out} , (obr. 12), se na základě principu superpozice změní výsledná indukce magnetického pole a tedy i výsledný magnetický moment modelu elektronu $\boldsymbol{\mu}$. Výsledná magnetická síla se také zmenší a velikost sil \mathbf{F}_1 a \mathbf{F}_2 poklesne o velikost ΔF . Protože síla \mathbf{F}_B je funkcí úhlu θ , bude síla \mathbf{F}_{1z} v ose z vždy větší než síla \mathbf{F}_{2z} .

$$\mathbf{F}_z = \mathbf{F}_{1z} + \mathbf{F}_{2z} \quad (3)$$

Síla F bude vždy větší u antiparalelní orientace magnetického momentu $\boldsymbol{\mu}$ vůči vnějšímu magnetickému poli \mathbf{B}_{out} než u orientace paralelní.



Obr. 11 Schematické zesílení magnetického momentu modelu elektronu při antiparalelní orientaci s vnějším magnetickým polem



Obr. 12 Schematické zeslabení magnetického momentu modelu elektronu při paralelní orientaci s vnějším magnetickým polem

Magnetické momenty elektronů, které původně odpovídaly jediné energii elektronu na stejné energetické hladině, se vlivem vnějšího magnetického pole a jejich natočení štěpí na multiplety blízkých energetických podhladin. Hovoříme o tzv. sejmutí degenerace v přítomnosti magnetického pole.

Magnetický moment jednotlivých stavů je různý, a proto je různá i výsledná působící síla a energie daného stavu. V důsledku toho budou atomy s antiparalelní orientací vůči vnějšímu magnetickému poli více vychylovány než elektrony s paralelní orientací vůči vnějšímu magnetickému poli. Proto je výsledný obrazec experimentu v kladné části osy z výraznější a vyšší než v záporné části obrazce, kde je mnohem slabší s menší odchylkou.

V neposlední řadě vliv na tvar výsledného obrazce má i Lorentzova síla, která způsobuje zakřivení dráhy letících elektronů v magnetickém poli. U letících elektronů s vektorem magnetického momentu rovnoběžným s vnějším polem se tato síla projeví. U elektronů s vektorem magnetického momentu kolmým na směr vnějšího magnetického pole je tato síla nulová. Ve výsledném obrazci se to projeví intenzivnější oblastí dopadů atomů v levé horní straně a pravé dolní straně výsledného obrazce.

Závěr

Při analýze tvaru výsledného obrazce Stern – Gerlachova experimentu vidíme, že se na jeho vykreslení podílí více fyzikálních jevů a dějů. Cesta každého atomu stříbra je tvořena složitou křivkou, která je závislá na jeho umístění na ose y a na natočení vektoru jeho celkového magnetického momentu vůči silokřivkám magnetického pole magnetu při vstupu do nehomogenního magnetického pole. V neposlední řadě hraje také roli rychlost a délka pohybu atomu v nehomogenním poli magnetu i vzdálenost stínítka po jeho opuštění.

Významnou roli v experimentu sehrála také velká atomová hmotnost atomů stříbra, protože slabší magnetické pole magnetu nebylo schopno natočit vektor magnetického momentu celého atomu do paralelního směru se směrem vektoru magnetického pole. U méně hmotných atomů se efekt rozštěpení projevuje méně.

U samotných elektronů se tento efekt neprojeví vůbec, protože elektrony se při vstupu do magnetického pole magnetu natočí všechny stejně shodně svým magnetickým momentem paralelně se směrem vektoru magnetické indukce vnějšího pole, což dokazuje, že elektron má pouze jeden směr magnetického momentu.

Pokud pracujeme s modelem elektronu podle RT, nepotřebujeme žádný dodatečný magnetický moment, protože struktura modelu elektronu vytváří dostatečně silné magnetické pole s jednoznačně určeným magnetickým momentem.

Stern – Gerlachův experiment nedokazuje žádnou existenci spinu elektronu. Spin je pouze matematická berlička, která kompenzuje nedokonalý model atomu a elektronu zavedený Bohrem.

Literatura

- [1] Gerlach, W. and Stern, O.; *Concerning the Quantization of Direction in a Magnetic Field*. Annalen der Physik, IV folge 74, 1924.
- [2] Bohm, D.; *Quantum Theory* (Prentice-Hall, NJ, 1951).
- [3] Platt, D., *A modern analysis of the Stern-Gerlach experiment.*, Am.J.Phys., 60, 306, 1992
- [4] Osmera, P. (2006), *Chaotic system with vortex- fractal structures*. In Proceedings of 13th Zittau East – West Fuzzy Colloquium. ISBN: 3-9808089-8-X, pp. 182, 2006.
- [5] Ošmera P. (2009), *The Vortex – ring - fractal Structure of Hydrogen Atom*, in Proceedings of WCECS2009, San Francisco, USA, pp.89-94., October 20-22, 2009
- [6] Osmera, P., Werner,P. and Osmera,P. jun., (2015), *Ring structures of atoms and molecules*. In Roychoudhuri, C; Kracklauer, A; DeRaedt, H. *Proceedings of SPIE : Nature of Light : What are Photons? VI*. Bellingham: SPIE, 2015. pp. 1-15, 15 p. ISBN 978-1-62841-736-4. doi:10.1117/12.2207303.
- [7] Werner, P. (2017), *Základy modelování prstencové struktury elementárních částic*. VUT ISBN 978-80-214-5620-4.