

Dekaplet tvořící základnu pyramidu je sestaven v osách I_z (projekce izospinu) a Y (hypernáboj). Přidáním třetí osy, na níž nanášíme „půvab“ (charm - C), vznikne 20-plet symetrie $SU(4)$

=====

symetrie $SU(4)$ jsou všechny možné báze na grupě $SU(4)$ spřaženy vztahem.

$$Q = \frac{I_z + Y + C}{2}$$

Moment hybnosti nabitě částice souvisí jednoduchým vztahem s magnetickým momentem částice ($\mu = Qb/2m$). $\rightarrow 2 \cdot \mu \cdot \mathbf{m} / \mathbf{b} = Q$

Spinové kvantové číslo. Spin je veličinou souvisící se symetrií rovnic vzhledem k Lorentzově transformaci. Odpovídá rotaci mezi časovou a prostorovou osou ve čtyřech dimenzích. Přirozeným způsobem se skládá s momentem hybnosti, který souvisí se symetriemi vzhledem k prostorovým rotacím.

$$S^2 = s(s+1) \hbar^2, \quad s = 0, 1/2, 1, \dots$$

s_z

Projekce spinu. Čísluje projekci spinu do libovolné osy. Jde o analogii magnetického kvantového čísla pro moment hybnosti. Opět platí

$$S_z = s_z \hbar, \quad s_z = -s, -s+1, \dots, s-1, s$$

- **spin:** kvantové číslo, často interpretováno jako vnitřní moment hybnosti částice
- **izospin:** kvantové číslo spojené s určitou vnitřní symetrií

A. Při pozorování rozpadů částic došlo v této době k velkému problému. Částice, které vznikly při silných interakcích se rozpadaly na silně interagující částice, ale jejich střední doby života byly příliš velké - odpovídaly spíše slabým interakcím. Tuto záhadu rozřešil Murray Gell-Mann, když navrhl nové kvantové číslo pro hadrony, které nazval podivnost (strangeness). Podivnost se zachovává v silných a elektromagnetických interakcích a v slabých se může měnit nejvýš o jednotku. Na rozdíl od izospinu, který se zachovává v silných a mění se v elektromagnetických a slabých interakcích. Vztah mezi veličinami v mikrosvětě popisuje Gell-Mann-Nishijimova formule:

$$Q = T_3 + \frac{1}{2}(B + S)$$

kde Q je elektrický náboj, B je baryonové číslo (pro baryony +1, antibaryony -1 a pro mezony 0), S je podivnost a T_3 je "třetí složka izospinu" ($T_3 = -1, 0, 1$ pro triplet pionů π^-, π^0, π^+ ; $T_3 = -1/2, 1/2$ pro dublet nukleonů n, p).

Částicové multiplety

Částice se často vyskytují jako skupiny velmi podobných částic, které nazýváme multiplety (dublet nukleonů, triplet pionů, kvadruplet Δ baryonů, atd.) Tyto částice lze chápat jako kvantové stavy jediné částice, které se liší projekcí veličiny nazývané *izospin*. Multipletu přiřadíme *hypernáboj* Y (dvojnásobek průměrného elektrického náboje multipletu) a *izospin* $T = (N - 1)/2$ (N je počet částic v multipletu). Projekce izospinu do jednotlivých částic potom je

HADRONY	MEZONY	PIONY	mezon π^+	π^+	π^-	273,14	0	-	+1	
			mezon π^0	π^0	-	264,14	0	-	0	
		KAONY	mezon K^+	K^+	K^-	966,4	0	-	+1	
			mezon K^0	K^0	K^0	974,1	0	-	0	
	BARYONY	NUKLEONY	proton	p	p	1 836,15	1/2	+	+1	
			neutron	n	n	1 838,68	1/2	+	0	
		HYPERONY	hyperon Λ	Λ^0	Λ^0	2 183,15	1/2	+	0	
			hyperon E^+	E^+	E^+	2 327,6	1/2	+	+1	
			hyperon E^0	E^0	E^0	2 333,6	1/2	+	0	
			hyperon E^-	E^-	E^-	2 343,1	1/2	+	-1	
			hyperon Ξ^0	Ξ^0	Ξ^0	2 572,8	1/2	+	0	
	hyperon Ξ^-	Ξ^-	Ξ^-	2 585,6	1/2	+	-1			
	hyperon Ω	Ω^-	Ω^-	3 272,8	3/2	+	-1			
pro antičástice změnit:									A	

třída částic	název částice	symbol		klidová hmotnost m_0	spin J	elektrický náboj Q	baryonové číslo B	leptonové číslo N_L	podivnost S	hypern Y
		částice	antičástice							
KVANTA POLÍ	foton	γ	-	0	1	0	0	0	0	0
	graviton ?	g	-	? 0	2	0	0	0	0	0
	gluon ?			? 0		0	0	0	0	0
LEPTONY	elektronové neutrino	ν_e	ν_e	$3 \cdot 10^{-5}$ až 10^{-4}	1/2	0	0	+1	0	0
	mionové neutrino	ν_μ	ν_μ	?	1/2	0	0	+1	0	0
	tau-neutrino ?	ν_τ	ν_τ	?	1/2	0	0	+1	0	0
	elektron	e^-	e^+	1	1/2	-1	0	+1	0	0

	mion	μ^-	μ^+	206,77	1/2	-1	0	+1	0	0
	tau	τ^-	τ^+	$\approx 3\,490$	1/2	-1	0	+1	0	0
KVARKY	down (dolů)	d	d	607	1/2	-1/3	+1/3	0	0	+1/3
	up (nahoru)	u	u	607	1/2	+2/3	+1/3	0	0	+1/3
	side (stranou)	s	s	988	1/2	-1/3	+1/3	0	-1	-2/3
	charm (půvab)	c	c	2 935	1/2	+2/3	+1/3	0	0	+1/3
	bottom (spodek)	b	b	9 800 ?	1/2	-1/3	+1/3	0	0	+1/3
	top (svršek)	t	t	80 000 ?	1/2	+2/3	+1/3	0	0	+1/3
pro antičástice změnit:						A	A	A	A	A

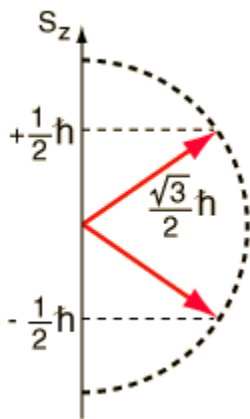
		Vůně					
Kvantová čísla	Symbol	d	u	s	c	b	t
Chuť	t	AB	BB	AB	BB	AB	BB
Teplota	T	1/3	1/3	2/3	2/3	1	1
Baryonové číslo	B	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
Elektrický náboj	Q	-1/3	2/3	-1/3	2/3	-1/3	2/3
Helicita	J	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
Dolní projekce izospinu	I_z^-	-1	0	0	0	0	0
Horní projekce izospinu	I_z^+	0	1	0	0	0	0
Podivnost	σ	0	0	-1	0	0	0
Půvab	γ	0	0	0	1	0	0
Krása	β	0	0	0	0	-1	0
Pravda	τ	0	0	0	0	0	1

Dnes již existuje řada preonových modelů, které se snaží vysvětlit následující vlastnosti kvarků a leptonů:

- Kvarky a leptony se vyskytují ve třech generacích. Kvarky mají generace "up", "charmed" a "top", leptony mají generace elektron, mion a tauon. Částice jednotlivých generací mají rostoucí hmotnost.
- Každá generace má dvě "vůně" s různým elektrickým nábojem. Kvarky jsou tvořeny dvojicí "up", "down", dále "charmed", "strange" a dvojicí "top" a "bottom". Leptony jsou tvořeny dvojicemi elektron, elektronové neutrino, dále mion, mionové neutrino a konečně tauon, tauonové neutrino.
- Každá "vůně" kvarku se vyskytuje ve třech barvách, které souvisí se silnou interakcí. Hadrony jsou z kvarků složeny tak, aby byly bezbarvé. Leptony jsou sami o sobě bezbarvé.
- Každý kvark nebo lepton má antičástici s opačným nábojem a barvou. Každý kvark nebo lepton má spin (vnitřní orbitální moment) 1/2 a každý má zápornou nebo kladnou paritu popisující chování částice při zrcadlení. Všechny hmotné kvarky a leptony mají kladnou paritu, což znamená, že jejich vlnová funkce při zrcadlení mění znaménko.

Nejhmotnější kvark "top" má hmotnost asi 180 GeV. Hmotnost kvarků a leptonů značně přesahuje hmotnost nejlehčího leptonu, kterým je elektronové neutrino. Pokud uvažujeme všechny kvarky se všemi barvami, existuje celkem 24 kvarků a leptonů a jejich částic, které musí teorie vysvětlit. Většina preonových modelů popisuje každý kvark a lepton jako kombinaci tří preonů. Podle Salamova a Patiova modelu kvark nebo lepton obsahuje jeden ze tří "somonů", které určují jeho generaci, jeden ze dvou "flavonů", které určují barvu a jeden ze čtyř "chromonů", které určují barvu. Somony jsou elektricky neutrální a bezbarvé. Flavony mají elektrický náboj +1/2 nebo -1/2 náboje protonu a jsou bezbarvé. Chromony jsou červené, zelené nebo modré a mají náboj +1/6. Bezbarvý chromon má náboj -1/2. Všechny možné kombinace 3.2.4 preonů dává všech 24 kvarků a leptonů v odpovídajících generacích, barvách a nábojích. Tento preonový model nevysvětluje hmotnost kvarků a pouze konstatuje, že větší generace somonů má větší hmotnost než flavony.

Electron Spin



Spin "up" and "down" allows two electrons for each set of [spatial quantum numbers](#).

$$n, \ell, m_\ell$$

An electron spin $s = 1/2$ is an intrinsic property of [electrons](#). Electrons have [intrinsic angular momentum](#) characterized by quantum number $1/2$. In the pattern of other [quantized angular momenta](#), this gives total angular momentum

$$S = \sqrt{\frac{1}{2}(\frac{1}{2} + 1)} \hbar = \frac{\sqrt{3}}{2} \hbar$$

The resulting [fine structure](#) which is observed corresponds to two possibilities for the z-component of the angular momentum.

$$S_z = \pm \frac{1}{2} \hbar$$

This causes an energy splitting because of the [magnetic moment](#) of the electron

$$\mu_s = -\frac{e}{2m} g S$$

[Further discussion](#)

[Index](#)

[Go Back](#)

Electron Spin

Two types of experimental evidence which arose in the 1920s suggested an additional property of the electron. One was the closely spaced splitting of the [hydrogen spectral lines](#), called [fine structure](#). The other was the [Stern-Gerlach experiment](#) which showed in 1922 that a beam of silver atoms directed through an inhomogeneous magnetic field would be forced into two beams. Both of these experimental situations were consistent with the possession of an [intrinsic angular momentum](#) and a [magnetic moment](#) by individual electrons. Classically this could occur if the electron were a spinning ball of charge, and this property was called electron spin.

[Index](#)

[Quantization of angular momentum](#) had already arisen for [orbital angular momentum](#), and if this electron spin behaved the same way, an angular momentum quantum number $s = 1/2$ was required to give just two states. This intrinsic electron property gives:

$$\begin{aligned} \text{Z-component of angular momentum: } S_z &= m_s \hbar, & m_s &= \pm \frac{1}{2} \\ \text{Magnetic moment: } \boldsymbol{\mu}_s &= -\frac{e}{2m} g \mathbf{S} \end{aligned}$$

Electron Intrinsic Angular Momentum

Experimental evidence like the [hydrogen fine structure](#) and the [Stern-Gerlach experiment](#) suggest that an electron has an intrinsic [angular momentum](#), independent of its [orbital angular momentum](#). These experiments suggest just two possible states for this angular momentum, and following the pattern of [quantized angular momentum](#), this requires an angular momentum quantum number of 1/2.

With this evidence, we say that the electron has spin 1/2. An angular momentum and a [magnetic moment](#) could indeed arise from a spinning sphere of charge, but this classical picture cannot fit the size or quantized nature of the electron spin. The property called electron spin must be considered to be a quantum concept without detailed classical analogy. The quantum numbers associated with electron spin follow the characteristic pattern:

$$S = \sqrt{s(s+1)} \hbar, \quad s = \frac{1}{2}, \quad m_s = \pm \frac{1}{2} \quad \text{Illustration}$$

[Index](#)

Electron Spin Magnetic Moment

Since the electron displays an [intrinsic angular momentum](#), one might expect a [magnetic moment](#) which follows the form of that for an [electron orbit](#). The z-component of magnetic moment associated with the [electron spin](#) would then be expected to be

$$\mu_z = \pm \frac{1}{2} \mu_B$$

but the measured value turns out to be about twice that. The measured value is written

$$\mu_z = \pm \frac{1}{2} g \mu_B$$

where g is called the gyromagnetic ratio and the [electron spin g-factor](#) has the value $g = 2.00232$ and $g=1$ for orbital angular momentum. The precise value of g was predicted by relativistic quantum mechanics in the Dirac equation and was measured in the [Lamb shift](#) experiment. A natural constant which arises in the treatment of magnetic effects is called the [Bohr magneton](#). The magnetic moment is usually expressed as a multiple of the Bohr magneton.

$$\mu_B = \text{Bohr magneton}$$

The term "electron spin" is not to be taken literally in the classical sense as a description of the origin of the magnetic moment described above. To be sure, a spinning sphere of charge can produce a magnetic moment, but the magnitude of the magnetic moment obtained above cannot be reasonably modeled by considering the electron as a spinning sphere. High energy scattering from electrons shows no "size" of the electron down to a resolution of about 10^{-3} fermis, and at that size a preposterously high spin rate of some 10^{32} radian/s would be required to match the observed angular momentum.

[Index](#)

3. Silnou jadernou interakci mezi kvarky (částicemi, z nichž jsou složeny hadrony) zprostředkovává osm kalibračních částic - gluonů. Odpovídající kvantové číslo se nazývá barva. Kvarky se mohou vyskytovat ve třech barvách a gluony mohou tuto barvu měnit, přičemž ostatní kvantová čísla (spin, izospin atd.) zůstávají beze změny. Odtud plyne i název teorie silných interakcí - kvantová chromodynamika (QCD). Tato teorie má nezvyklé

vlastnosti. Jsou-li kvarky blízko sebe, chovají se gluony jako volné částice a velikost silné interakce se blíží k nule. Pro rostoucí vzdálenosti (pokud překročí hodnotu 10^{-13} cm, což je rozměr protonů a neutronů) naopak velikost silné interakce vzrůstá. Kvarky nelze samostatně pozorovat jako volné částice. Grupa symetrií se v QCD označuje jako [SU \(3\)](#).

.-.-.-.-

Vlnění obecně představuje kmitavý stav jistého prostředí.- píše Podolský Jiří a dál, že:: V případě vln gravitačních kmitá sám prostor a čas...a lze totiž veškeré gravitační efekty vysvětlit jako důsledek zakřivení prostoročasu. Obecná teorie relativity předpovídá i existenci specifických kmitavých stavů prostoročasu

Změní-li hvězda náhle svůj tvar (například při výbuchu **supernovy**), změní se též okolní geometrie a vzniklý rozruch se bude předávat dále. Směrem od hvězdy se začnou šířit konečnou rychlostí gravitační vlny, ``poruchové" [vlnky křivosti prostoročasu](#) .

Na počátku byl totiž vesmír velmi žhavý, hmota byla ionizována a proto elektromagneticky neprůhledná. Teprve v době zhruba 100 000 let po velkém třesku ochladl natolik, že hmota zrekombinovala a elektromagnetické záření začalo žít svým vlastním životem odděleným od ostatní hmoty

.-.-.-.-

Každému elektronu přísluší **vlastní moment hybnosti částice, který se nazývá spin**. Nejjednodušší znázornění spinu je založeno na představě, že částice je podobná kuličce a její spin je způsoben rotací kuličky kolem vlastní osy.

Důsledné uplatnění zmíněné představy ovšem vede k vážným rozporům. Elektron má například svůj magnetický moment, který lze vysvětlit rotací nabitého předmětu kolem osy. Ale rotace elektronu by musela být tak vysoká, že rychlost bodů na jeho "rovníku" by značně přesáhla rychlost světla. Také není jasné, proč rotaci nelze zastavit. Velikost spinu částice je její trvalou charakteristikou.

Takovou veličinu v nerelativistické fyzice neznáme. Tam je moment hybnosti spjat s otáčivým pohybem tělesa kolem nějaké osy. Jestliže ustane pohyb nebo jestliže je hmotnost tělesa nulová, je nulový také moment hybnosti. ([Spin částice nebude momentem hybnosti s použitím „hmotnosti“](#), [ale „rotace vlny“](#) ...[rotace vlnobalíčku](#) ...[bude to vyjádření asymetrie veličin „uvnitř částice“](#) ?) Spin přísluší částici i v klidu, i částici s nulovou klidovou hmotností. K jeho určení není třeba zadat osu otáčení. Spin je v tomto smyslu veličinou, která se projevuje svým zákonem zachování a schopností přeměny v jiné známé druhy momentu hybnosti. Úhrnný moment hybnosti zůstává zachován.

Každá částice má svou stálou hodnotu spinu, kterou nikdy nemění. Spin může nabývat jen zcela určitých dovolených hodnot, které se řídí jednoduchým pravidlem. Spin podstatně určuje chování částice ve skupině stejných částic a jeho hodnota má vliv na počet stavů, v nichž se částice může nacházet.

Spin elektronu může nabývat jen dvou hodnot, protože elektron může pro danou myšlenou osu rotovat pouze dvěma směry. Obě hodnoty mají stejnou absolutní velikost. Fyzikové tyto dvě hodnoty spinu označují jako "horní" a "dolní".

Klíčovou vlastností spinu elektronu je, že nelze určit osu rotace. Stejně jako elektron se může vyskytovat na různých místech v prostoru, může mít libovolnou osu rotace. Nezávisle na tom, která osa rotace se použije, elektron má spin stále stejné hodnoty (tedy vždy jen buď "horní" nebo jen "dolní"). Měření tedy určuje osu rotace a před tímto měřením nelze tuto osu rotace určit.

Pokud atomový nebo jaderný systém rotuje, jeho úhlový moment má hodnotu, která je celým násobkem hodnoty spinu elektronu. Spin libovolné částice nebo systému částic je tedy kvantován.

Další kvantovou veličinou elektronu je elektrický náboj. Všechny částice mají buď kladný nebo záporný elektrický náboj, jehož velikost je rovna náboji elektronu. Náboj a spin částice jsou tedy kvantovány. Lze se proto ptát, zda mezi nimi existuje nějaký vztah.

Ve 40. letech 20. století teoretičtí fyzikové použili aparát matematiky kvantové teorie na popis geometrických rotací spinu v normálním trojrozměrném prostoru a pro popis chování náboje pomocí veličiny nazvané isospin. Isospin není trojrozměrným vektorem, ale vektorem ve vícerozměrném prostoru, jehož jedna dimenze se promítá do našeho prostoru. Šlo o užitečný teoretický koncept, který byl schopen vysvětlit, jak se neutrony v jádře atomu mohou měnit na protony a naopak, nebo jak souvisí elektrony a neutrina.

*****.

Mikroskop detekující jediný spin

Výzkumníci společnosti IBM detekovali spin elektronu pomocí mikroskopu MRFM (magnetic resonance force microscope), který kombinuje dvě výjimečné zobrazovací technologie: zobrazování magnetickou rezonancí (*MRI, magnetic resonance imaging*) a mikroskopii atomových sil (*AFM, atomic force microscopy*). Cílem technologie MRFM je mapovat vnitřní strukturu vzorků materiálu, jako je složitá struktura polovodičů nebo biomolekul s rozlišením na úrovni jednotlivých atomů.

K tomuto účelu mikroskop MRFM používá velmi jemný nástavec o délce 85 mikronů a tloušťce 150 nm s malým magnetickým hrotem a cívkou, která produkuje elektrické pole o radiové frekvenci a tím vytváří rezonanční zónu tvaru misky. Magnetická částice, jako je elektron nebo jádro atomu vodíku (proton), která prochází touto rezonanční zónou, může magneticky interagovat s nástavcem, jehož frekvence oscilací se změní. Tuto změnu lze detekovat a takto lze měřit spin jednotlivých částic. Spin zhruba řečeno odpovídá vnitřnímu rotačnímu momentu částice.

Rotační symetrie částice vede k zákonu zachování momentu hybnosti. V tomto případě jde o prostorovou rotaci ve třech rozměrech. Podobnou úlohu, jako má prostorová rotace, zastává Lorentzova transformace, kdy vlastně jde o rotaci v čtyřrozměrném prostoročase o imaginární úhel nazývaný rapidita. Symetrie částice vůči Lorentzově transformaci souvisí se zákonem zachování spinu. Spin má velmi podobné vlastnosti jako moment hybnosti, avšak nesmí být s ním zaměňován. Zhruba si můžeme moment hybnosti představit jako pohyb Země kolem Slunce a spin jako rotaci Země kolem vlastní osy. Ve skutečnosti však částice neobíhají kolem nějakého centra ani nerotují kolem nějaké vlastní osy. Celkový rotační stav částice je však dán momentem hybnosti (orbitálním momentem) a spinem (vnitřním momentem).



Částice s nenulovým spinem interagují s jinými magnetickými objekty. Klasicky řečeno, částice se spinem se chová jako malý magnet. Magnetické pole totiž souvisí s relativistickým chováním částic a tedy se spinem.

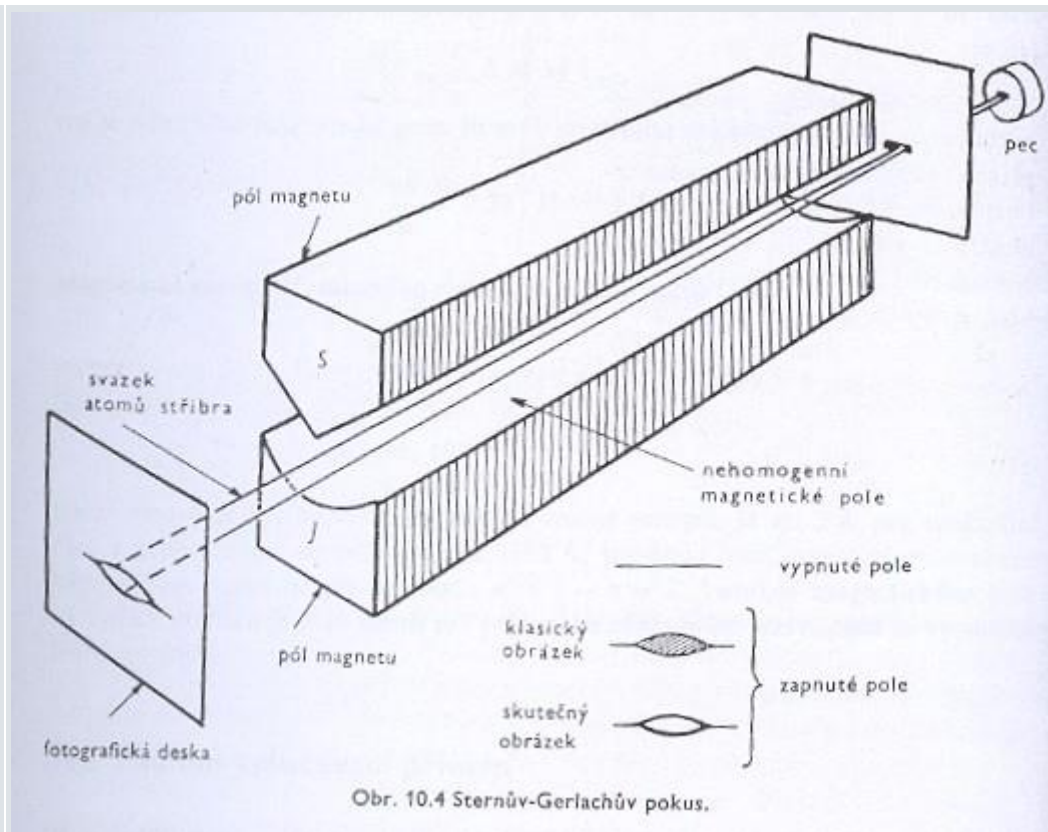
Snímkování pomocí MRFM nelze zaměňovat se snímkováním pomocí MRI. Zobrazování magnetickou rezonancí MRI totiž používá velmi propracované technologie, jimiž je signál získán ze všech různých trojrozměrných oblastí (voxelů) současně. MRFM je spíše bodový proces snímkování, následovaný procedurou rekonstrukce obrazu. MRFM však není pouze další formou mikroskopie, která nám říká, kde se nacházejí atomy a molekuly. V případě jaderných spinů je MRFM také určitou formou spektroskopie, která v principu může určit chemické prvky (přínejmenším ty prvky, jejichž jádra jsou magnetická). Mikroskopie MRFM dosud nemůže detekovat jednotlivá jádra atomů. Vnitřní magnetický moment jádra je příliš slabý, asi 650 krát slabší než magnetický moment elektronu. Pro detekci

jednotlivých spinů atomových jader bude nutné zvýšit citlivost nejméně tisíckrát. Současné zobrazování magnetickou resonancí MRI sice umožňuje zobrazovat spiny atomových jader, avšak potřebuje asi 10^{12} jader, aby vznikl dostatečně silný signál.

Velkým úspěchem výzkumníků IBM proto je detekce spinu jediného elektronu ve vzorku, v němž většina elektronů v atomech je párována s opačným spinem v elektronovém orbitu. 15. července 2004 **Dan Rugar** a jeho spolupracovníci v IBM Almaden (San Jose) publikovali v časopise Nature zprávu, podle níž jejich MRFM zařízení pracuje při teplotě 1,6 Kelvinu. Tato velmi nízká teplota umožnila výzkumníkům detekovat jednotlivé elektrony ve vzorku oxidu křemičitého. Prostorové rozlišení přinejmenším v jednom rozměru dosahuje až 25 nm. Začátkem roku 2004 byla publikována zpráva, podle níž technologie MRFM umožnila detekci několika milionů elektronů. Současné zařízení firmy IBM je asi 40 krát výkonnější než dosud nejlepší zařízení pro zobrazování magnetickou resonancí MRI. Nové zařízení MRFM bude zřejmě hrát důležitou roli v budoucích součástkách pro zpracování kvantové informace, protože umožní manipulovat a číst kvantové stavy jednotlivých spinů.

.....

Zoe	 Zaslal: so, 30. říjen 2004, 21:18 Předmět: Re: spin 
Založen: 30. 08. 2004 Příspěvky: 573 Bydliště: Praha	<p>Ohara napsal:</p> <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px;"><p>Nerozumím dobře spinu, mohl by někdo ukázat jak se vyslo z momentu setrvačnosti a dospelo ke spinu? Je možné ukázat nějakou analogii s momentem setrvačnosti, převést spin na klasický moment?</p><p>Předpokladám že to není jen násobek spinového čísla plankovou konstantou.</p></div> <p>Předně si tu asi pleteš moment setrvačnosti s momentem hybnosti. To jsou 2 diametrálně odlišné veličiny. Spin se poprvé experimentálně projevil tzv. anomálním Zeemanovým jevem, při němž se pozoruje tzv. jemná struktura spektrálních čar atomu vodíku. Kvantová mechanika před objevem spinu, uvažující pouze orbitální pohyb elektronu kolem jádra, předpovídala rozštěpení spektra na lichý počet hladin (Tzv. normální Zeemanův jev). Zpřesněná pozorování (viz obrázek) na počátku 20. let minulého století (Stern - Gerlachův experiment) však ukázala, že se každá z hladin jemně štěpí ještě na 2 podhladiny, takže celkový počet čar je ve skutečnosti vždy sudý.</p>



Ve snaze vysvětlit anomální Zeemanův jev navrhli S. A. Goudsmit a G. E. Uhlenbeck v roce 1925 hypotézu, podle níž má elektron kromě orbitálního momentu hybnosti (pohyb v okolí jádra atomu) ještě i vlastní vnitřní moment hybnosti (znázorňovaný zprvu jako rotace elektronu okolo vlastní osy - zřejmě v analogii s tehdy ještě poměrně živým planetárním modelem atomu) a s ním spojený magnetický moment. Goudsmit a Uhlenbeck tím měli na mysli klasický obraz elektronu coby nabitě kulíčky rotující okolo vlastní osy. S rotací je spojen moment hybnosti a protože je elektron záporně nabitý, má magnetický moment opačného směru než je vektor jeho momentu hybnosti. Tato klasická představa spinu přetrvávala až do roku 1928 kdy se P. A. M. Diracovi podařilo odvodit existenci spinu teoreticky, na základě své relativistické verze kvantové mechaniky (tzv. **Diracova rovnice**) která je pochopitelně obecnějším pohledem do zákonů mikrosvěta, než nerelativistický Schrodingerův popis (tzv. **Schrodingerova rovnice**). Z Diracovy teorie vyplynulea existence spinu částic přirozeně, bez nutnosti zaváděti jej do KM uměle, na základě experimentálních faktů. Podrobnosti viz: <http://www.phys.ualberta.ca/~qingrich/phys512/latex2html/node41.html> , <http://atoms.vuse.vanderbilt.edu/Elements/CompMeth/HF/node39.html> Zároveň se ale ukázalo, že to s klasickou rotací, jakou známe u makroskopických objektů, nemá mnoho společného. Že se jedná jen o další kvantové číslo (stupeň volnosti kvantových objektů), které nemá žádnou analogii v makrosvětě. Např. zatímco některé částice by se vrátily do původního stavu při rotaci o 2π (např. fotony), jiné již při rotaci o 1π (např. gravitony) a ještě jiné by se musely otočit naopak až o úhel 4π (např. elektrony). Klasická představa rotujících částic se již proto na školách dávno nevyučuje, stejně jako naivní Bohrova představa elektronů obíhajících jádro po přesně vymezených kruhových orbitách.

Posted By: Lumo (** Lumidek **) on 'CZscience'

Title: Spin elektronu

Date: Tue Feb 4 15:07:24 1997

Ahoj lidi,

v zajmu prejeduti nedorozumenim, pokusim se dat kratkou lekci **spinu castice** v kvantove mechanice. Budte pripraveni na prekvapiva tvrzeni, ale je to tak. ;-)

Nejlidovejsi predstava spinu je setrvacnik, rotace kolem osy. Tato predstava je chybna temer ve vsem, nicmene v jedne zasadni veci je zcela spravne: spin castic je zcela obycejnou soucasti celkoveho momentu hybnosti: pokud budete strilet same pravotocive elektrony (nebo treba fotony) smerem k volne poletujicimu setrvacniku, po urcite (dlouhe) dobe se vam opravdu roztoci.

Spin je tedy cast momentu hybnosti, je to tedy vektor. Pripomenme, ze pouzivame konvenci "pravidla prave ruky", tj. napriklad pohybujici se rucicka u hodinek ma moment hybnosti smerem dolu do hodinek.

Pro velke makroskopicke objekty se spin chova temer klasicky. Nejmensi mozna (kladna) hodnota spinu je $\hbar/2$ (\hbar je skrtle h tj. $1.054 \cdot 10^{-34}$ Js). Velke objekty vsak maji spin mnohokrat vetsi nez je tato zakladni jednotka, proto lze celkovy moment hybnosti velkych objektu povazovat za klasicky vektor.

My ale chceme tu zajimavejsi, kvantovou cast celeho pribehu. Zacneme u elektronu. Elektron ma spin $j=1/2$. Co to znamena? Znamena to pokazde, ze prumet spinu na libovolnou osu (mluvme zatim vzdy o ose z) je nektera z hodnot $-j$ az j (krok 1), vse v jednotkach \hbar .

Samotna hodnota j nam rika, jak je dlouhy cely vektor J . Druha mocnina delky vektoru je jak znamo $J^2 = J_x^2 + J_y^2 + J_z^2$ a tento operator nabyva v kvantove mechanice prave hodnot $j(j+1) \cdot \hbar^2$, kde j je spin systemu, coz je cislo z mnoziny $0, 1/2, 1, 3/2, \dots$ atd.

Tj. z -ova projekce spinu elektronu muze byt $-1/2$ nebo $1/2$, rikame, ze "spin ukazuje nahoru" nebo "spin ukazuje dolu".

Ted asi (zcasti pravem) namitnete, ze volba osy z byla nahodna a ze na teto volbe nesmi byt fyzika zavisla. Samozrejme, mate pravdu. Jaka je treba projekce spinu smerem na osu y , kdyz projekce na osu z je "nahoru"?

Jiste ocekavate, ze prumerne by mela byt nula. Ale verme nejprve, ze projekce spinu na kazdou osu je $-1/2$ nebo $+1/2$. Cili ocekavame, ze projekce na osu y budou obe stejne pravdepodobne.

Pravdepodobnost je vec, která vec spasi. :-) Klasicky vzdy musime rici, ze castice ma polohu x a hybnost p , respektive presne zadany spin.

Ale kvantovy popis je jiny: pro kazdou konfiguraci uplne mnoziny velicin - mluvime jen o spinu (pridani polohy apod. je trivialni) - musime zadat tzv. amplitudu pravdepodobnosti pro ruzne mozne hodnoty.

Co je to ta amplituda pravdepodobnosti? To je komplexni cislo a druha mocnina jeho absolutni hodnoty nam dava pravdepodobnost, ze je system v danem stavu.

NYNI MAME DVE AMPLITUDY PRAVDEPODOBNOTI (komplexni cisla) U, D (dohromady se jim rika spinor). $|U|^2$ je pravdepodobnost, ze elektron ma spin nahoru, podobne $|D|^2$ je pravdepodobnost, ze ma spin dolu ($-1/2$ vzhledem k ose z).

Vtip je v tom, ze tato dve komplexni cisla lze transformovat na jina dve komplexni cisla, která popisují amplitudy vzhledem k jine ose, zcela analogicky, jako lze prepocitat tri realna cisla tvorici vektor na jina tri realna cisla, urcující souradnice vektoru v jine soustave os.

Ted ale misto tri realnych mame dve komplexni cisla. Jak je tedy transformovat? K tomu slouzi tzv. Pauliho matice. Jen reknu, ze kdyz rotujeme kolem osy z , $|U|^2$ a $|D|^2$ se nam nesmi zmenit, tj. nesmi se zmenit absolutni hodnoty, tj. U a D mohou zmenit nejvyse fazi. (Nechci vam motat hlavu, ale fakt, ze rotace tri os se da znazornit pomoci nejakych transformaci dvou komplexnich cisel, je tvrzenim o stejnosti grup $SO(3)$ a $SU(2)/Z_2$.)

Pri rotaci o uhel ϕ kolem z se nasobi U komplexni fazi $\exp(i\phi/2)$, zatimco D se nasobi $\exp(-i\phi/2)$. Jiste jste si vsimli, ze pri rotaci o 2π se zmeni znamenko jak U tak D . Ano, je to tak, rotace o 360 stupnu kolem kterekoliv osy nevrati amplitudy elektronu na puvodni hodnoty, ale zmeni jim znamenko.

Tohle se samozrejme neprojevi na fyzice, protoze pravdepodobnosti jsou dany az ctvercem absolutni hodnoty, který se zmenou znamenska neovlivni.

Kdyz rotujeme rekname o uhel ϕ kolem osy y (a rotace kolem y, z nam staci na libovolnou rotaci), U a D se zmeni podle

$$U(\text{nove}) = \cos(\phi/2) U(\text{stare}) + \sin(\phi/2) D(\text{stare})$$

$$D(\text{nove}) = -\sin(\phi/2) U(\text{stare}) + \cos(\phi/2) D(\text{stare})$$

Opet vidíte, ze rotace o 360 stupnu zmeni znamenko U a D . Take muzete lehce overit, ze celkova pravdepodobnost $|U|^2 + |D|^2$ zustane zachovana (napr. 1). Celkove, i kdyz jste mne treba nerozumeli, vezte, ze projekce spinu elektronu

na každou osu může být jen $-1/2$ nebo $1/2$, protože v kvantové mechanice je stav popsán dvěma komplexními čísly (pro každou projekci jedno), které lze pretransformovat do jiné soustavy souřadnic.

//// Superstring/M-theory is the language in which God wrote the world.

/// O _ Your Lumidek. <mailto:lmot2220@menza.mff.cuni.cz>

/// -----

/// _____/ <http://www.kolej.mff.cuni.cz/~lumo/>

The most incomprehensible thing about the world is that it's comprehensible. AE
