

فصل ۱۰

خواص مغناطیسی



عناوین

۱- مقدمه

۲- مروری بر مفاهیم پایه

۳- پذیرفتاری مغناطیسی

۴- طبقه بندی مواد

مقدمه

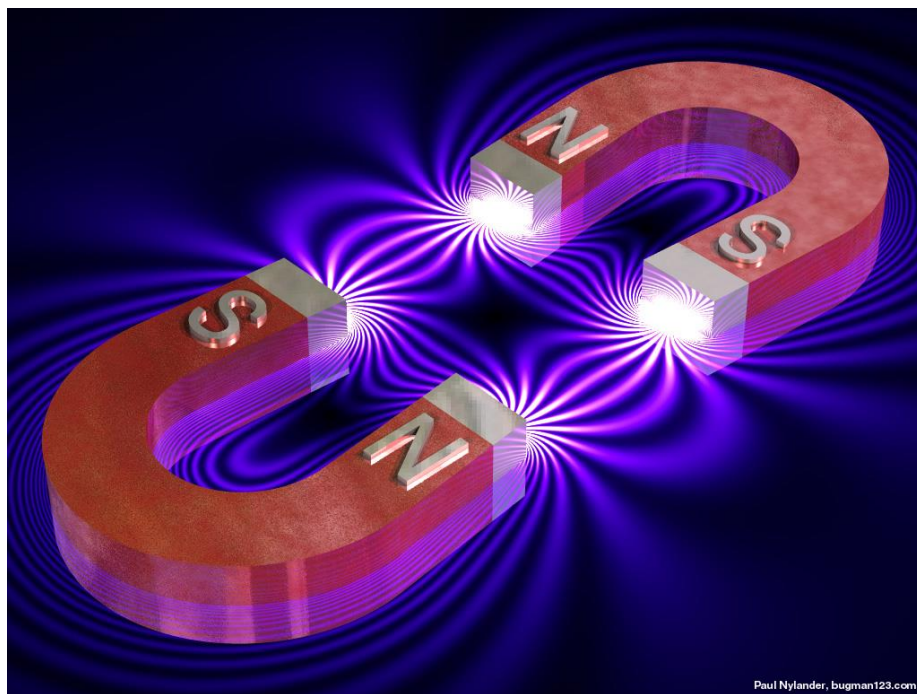
خواص مغناطیسی مواد، توجه فیزیک‌دان‌ها، شیمی‌دان‌ها و مهندسين را برای سالیان متمادی به خود معطوف داشته است. به خصوص در دوران اخیر، این خواص از آن جهت مورد علاقه قرار گرفتند که اطلاعاتی راجع به اجزاء تشکیل دهنده‌ی مواد و برهم‌کنش بین آن‌ها به دست می‌دهد. این اطلاعات نه تنها برای فیزیک‌دان‌ها بلکه برای دیگر دانشمندان و مهندسين نیز جالب توجه است. مواد مغناطیسی کاربردهای تکنولوژیکی وسیعی دارند. این کاربردها؛ از هسته‌های ترانسفورماتورها در ماشین‌های الکتریکی تا نوارها و حافظه‌های مغناطیسی در کامپیوترها گسترش دارد.

در این فصل بعد از مروری مقدماتی، ابتدا بحثی راجع به رفتار مغناطیسی اتم‌های مستقل آزاد خواهیم داشت و سپس خواص مغناطیسی الکترون‌های رسانش را بررسی می‌کنیم. پس از آن راجع به فلزات و عایق‌های فرومغناطیس و با تأکید بر میدان مغناطیسی داخلی که عامل فرومغناطیس است، صحبت می‌کنیم. همچنین موارد عملی حوزه‌های مغناطیسی و نقش آن‌ها در فرآیند مغناطش را مطالعه می‌کنیم.

مروری بر مفاهیم پایه

✓ مغناطیس پدیده‌ای است که توسط آن مواد از خود، یک نیروی جاذبه یا دافعه را نشان می‌دهند یا بر روی مواد دیگر تاثیر می‌گذارند.

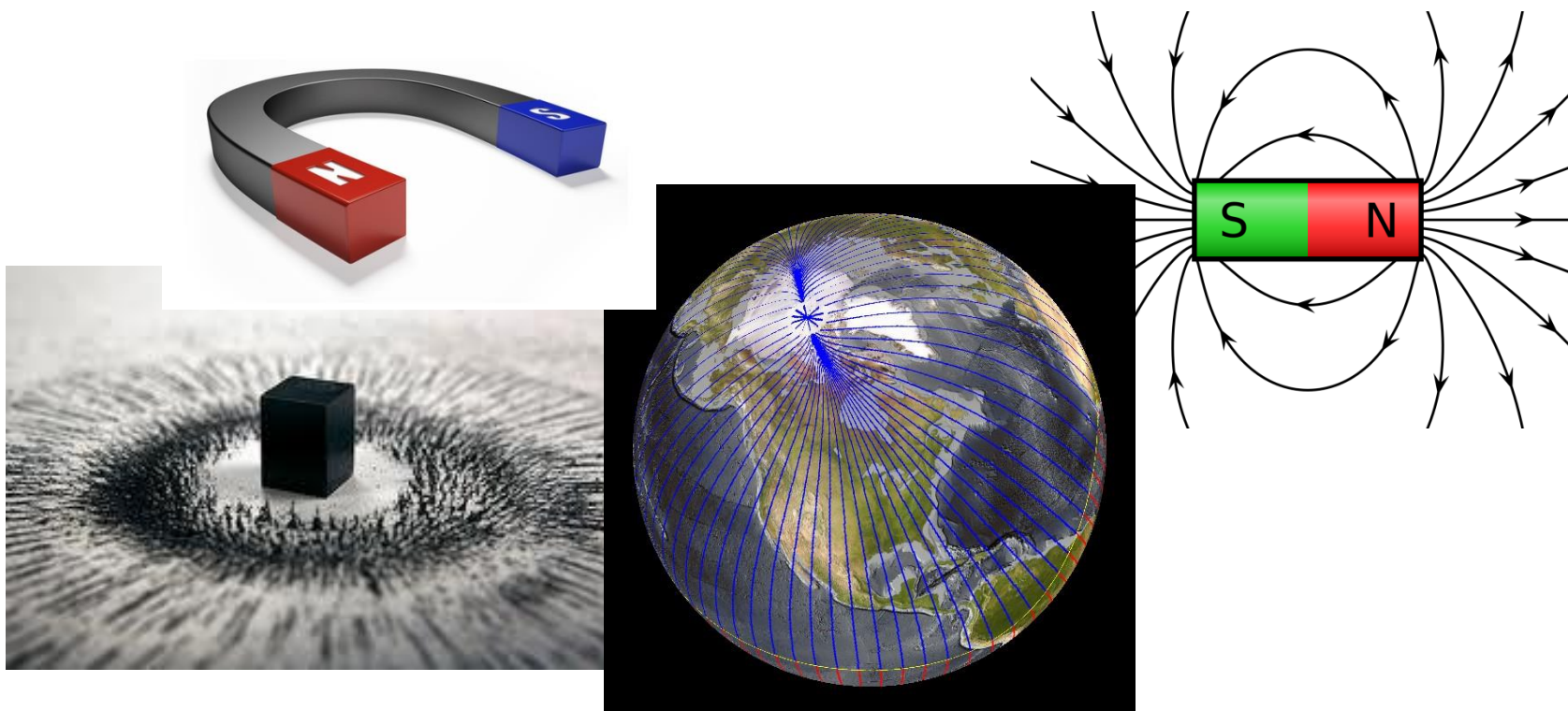
✓ قوانین اصلی و مکانیزم‌هایی که پدیده مغناطیسی را توضیح می‌دهد، پیچیده و دقیق می‌باشند و باعث شده که دانشمندان تا زمان‌های نسبتاً اخیر از درک آنها، دوری جویند.



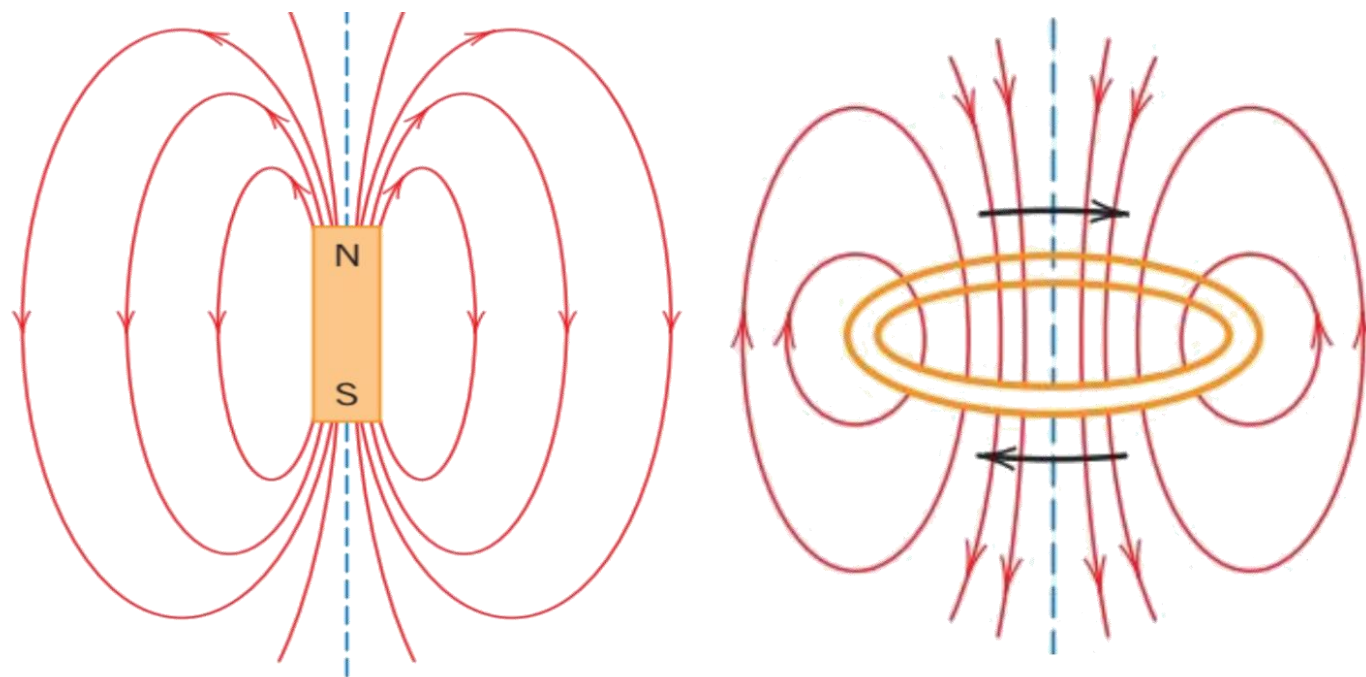
✓ بسیاری از وسایل فناوری مدرن، به مغناطیس و مواد مغناطیسی تکیه دارند؛ این وسایل شامل ژنراتورهای الکتریکی، ترانسفورماتورها، موتورهای الکتریکی، کامپیوترها، رادیو، تلویزیون و اجزاء سیستم‌های تولید صدا و تصویر می‌باشند.

همان طور که می دانیم نیروهای مغناطیسی توسط حرکت ذرات باردار الکتریکی ایجاد می گردند.

میدان مغناطیسی یک میدان مرکزی نیست، یعنی تک قطبی مغناطیسی وجود ندارد.

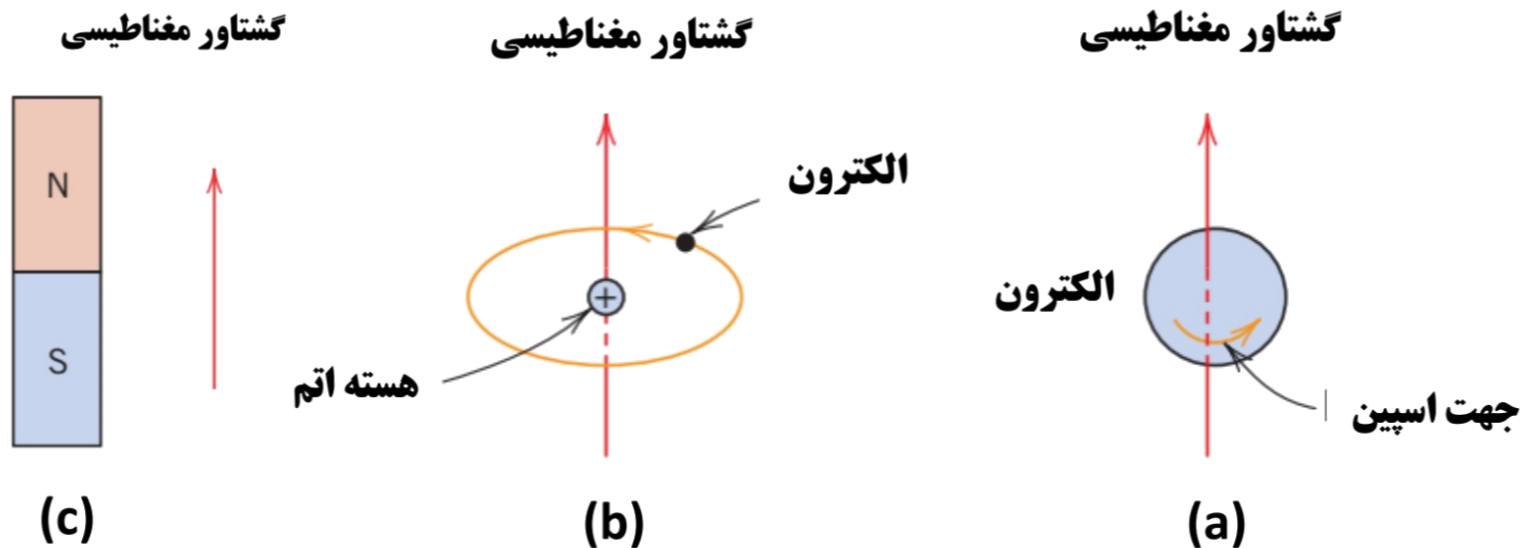


حرکت شتابدار در ذرات باردار موجب ایجاد میدان مغناطیسی می‌شود. ایجاد میدان مغناطیسی در یک سیم پیچ حامل جریان نیز به همین دلیل است. شکل زیر مشابهت آن را با یک آهنربا نشان می‌دهد.



□ حرکت مداری، حرکت الکترون‌ها به دور هسته است.

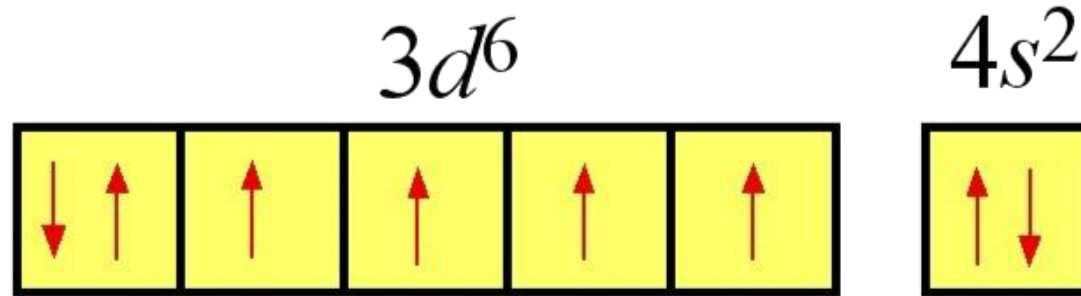
□ حرکت اسپینی یک پدیده کوانتوم مکانیکی است که می‌توان آن را به شکل چرخش الکترون‌ها به دور خود در نظر گرفت.



(a) نمایش نحوه حرکت اسپینی و گشتاور مغناطیس ناشی از آن، (b) نمایش حرکت مداری و گشتاور مغناطیسی ناشی از آن، (c) گشتاور مغناطیسی یک آهنربا

علت میکروسکوپی خواص مغناطیسی

□ اوربیتال‌های پر خاصیت مغناطیسی ندارند اما اوربیتال‌های نیمه پر اساس خاصیت مغناطیسی مواد هستند.



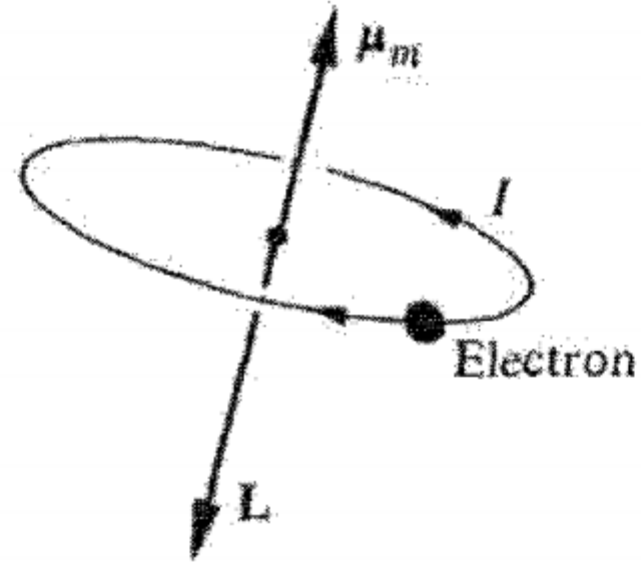
نمایش اوربیتال‌های نیمه‌پر و عامل خاصیت مغناطیسی در عنصر آهن

از فیزیک عمومی

یادآوری می‌کنیم که یک حلقه جریان الکتریکی مانند یک گشتاور دوقطبی مغناطیسی عمل می‌کند.

$$\mu_m = IA \quad (9-5)$$

که I جریان الکتریکی و A مساحت حلقه است. جهت μ_m (که یک بردار است) عمود بر صفحه‌ی حلقه است و جهت آن به گونه‌ای است که ناظر ایستاده در امتداد μ_B ، جریان الکتریکی را در جهت ساعت گرد ملاحظه می‌نماید (شکل ۹-۲).



شکل ۹-۲ گشتاور دو قطبی مغناطیسی m مربوط به یک حلقه‌ی جریان؛ I نمایانگر جریان الکتریکی است. بردار L اندازه حرکت زاویه‌ای الکترونی است که جریان را تولید می‌کند.

حلقه‌های جریان در یک اتم از الکترون‌های چرخان تشکیل شده‌اند. در این حالت می‌توان رابطه‌ی ساده‌ای بین μ_m و اندازه حرکت زاویه‌ای الکترون L برقرار نمود. داریم:

$$\mu_m = IA \quad , \quad A = \pi r^2$$

$$I = q/T \quad , \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \quad \Rightarrow \quad I = e \left(\frac{\omega}{2\pi} \right)$$

$$\mu_m = e \left(\frac{\omega}{2\pi} \right) \pi r^2$$

$$L = r \times p = rp = rmv = rm(r\omega) = mr^2\omega$$

با تقسیم دو رابطه اخیر می توان نشان داد

$$\mu_m = \left(-\frac{e}{2m} \right) L \quad (9-6)$$

علامت منفی نشان می دهد که μ_m در خلاف جهت L است. ضریبی که μ_m و L را به هم مربوط می کند، نسبت ژیرومغناطیسی نامیده می شود.

یکای گشتاور مغناطیسی الکترون

در فیزیک اتمی، مگنتون بور (μ_B) یک ثابت فیزیکی و یکای طبیعی برای گشتاور مغناطیسی یک الکترون است مگنتون بور در دستگاه بین‌المللی یکاها (SI) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$$

e بار الکترون، \hbar ثابت پلانک، m_e جرم سکون الکترون است

گشتاور مغناطیسی اسپینی الکترون تقریباً برابر با ۱ مگنتون بور است.

$$1 \text{ مگنتون بور} = 9.274\,009\,994(57) \times 10^{-24} \text{ J}\cdot\text{T}^{-1}$$

پذیرفتاری مغناطیسی

یک میدان مغناطیسی را می‌توان با یکی از دو بردار زیر توصیف کرد: اندوکسیون مغناطیسی B یا شدت میدان مغناطیسی H . در خلاء این دو بردار به صورت زیر بهم مربوط اند.

$$B = \mu_0 H \quad (9-16)$$

تراوایی مغناطیسی یکی از ویژگی‌های هر محیط است که به آن ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نیز می‌گویند.

که $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ تراوایی مغناطیسی خلاء است.

وقتی یک ماده‌ی مغناطیسی در میدان مغناطیسی قرار گیرد؛ ماده مغناطیده می‌شود. این مغناطیدگی با بردار مغناطش M ، که گشتاور دو قطبی واحد حجم است، توصیف می‌شود. اندوکسیون مغناطیسی داخل ماده با عبارت زیر بیان می‌شود.

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \quad (9-17)$$

اندوکیون متشکل از دو جزء است: جزء $\mu_0 H$ که توسط چشمه‌های خارجی تولید می‌شود و جزء $\mu_0 M$ که مربوط به مغناطیدگی ماده است.

از آن جا که مغناطش توسط میدان القا می‌شود، می‌توان فرض کرد که M متناسب با H است، یعنی

$$M = \chi H \quad (9-18)$$

ثابت تناسب، χ پذیرفتاری مغناطیسی محیط نامیده می‌شود. اگر این عبارت M را در رابطه (9-17) قرار دهیم.

$$B = \mu_0 (1 + \chi) H \quad (9-19)$$

بنابراین بردارهای B و H با یکدیگر متناسب اند.

$$B = \mu H \quad (9-20)$$

و ثابت تناسب، تراوایی محیط نامیده می شود:

$$\mu = \mu_0 (1 + \chi) \quad (9-21)$$

اغلب مناسب تر است که تراوایی نسبی μ_r به کار رود که به صورت $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$ تعریف می شود.
بنابراین

$$\mu_r = 1 + \chi \quad (9-22)$$

رابطه ای است که تراوایی و پذیرفتاری محیط را به هم مربوط می کند.

Periodic Table of the Elements

1 H Hydrogen 1.007 94																	2 He Helium 4.002 60
Group 1	Group 2											Group 13	Group 14	Group 15	Group 16	Group 17	Group 18
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012 182											5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.0107	7 N Nitrogen 14.0067	8 O Oxygen 15.9994	9 F Fluorine 18.998 4032	10 Ne Neon 20.1797
11 Na Sodium 22.989 769 28	12 Mg Magnesium 24.3050	Group 3	Group 4	Group 5	Group 6	Group 7	Group 8	Group 9	Group 10	Group 11	Group 12	13 Al Aluminum 26.981 5386	14 Si Silicon 28.0855	15 P Phosphorus 30.973 762	16 S Sulfur 32.065	17 Cl Chlorine 35.453	18 Ar Argon 39.948
19 K Potassium 39.0983	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.955 912	22 Ti Titanium 47.867	23 V Vanadium 50.9415	24 Cr Chromium 51.9961	25 Mn Manganese 54.938 045	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933 195	28 Ni Nickel 58.6934	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.409	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.64	33 As Arsenic 74.921 60	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.798
37 Rb Rubidium 85.4678	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.905 85	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.906 38	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium (98)	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.905 50	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.8682	48 Cd Cadmium 112.411	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.710	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.904 47	54 Xe Xenon 131.293
55 Cs Cesium 132.905 4519	56 Ba Barium 137.327	57 La Lanthanum 138.905 47	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.947 88	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.217	78 Pt Platinum 195.084	79 Au Gold 196.966 569	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.3833	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.980 40	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)
87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89 Ac Actinium (227)	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (266)	107 Bh Bohrium (264)	108 Hs Hassium (277)	109 Mt Meitnerium (268)	110 Ds Darmstadtium (271)	111 Rg Roentgenium (272)	112 Uub* Ununbium (285)		114 Uuq* Ununquadium (289)		116 Uuh* Ununhexium (292)		

Atomic Number **6**
Symbol **C**
Name **Carbon**
Average Atomic Mass **12.0107**

- Hydrogen
- Semiconductors (also known as metalloids)
- Metals
 - Alkali metals
 - Alkaline-earth metals
 - Transition metals
 - Other metals
- Nonmetals
 - Halogens
 - Noble gases
 - Other nonmetals

* The systematic names and symbols for elements greater than 111 will be used until the approval of trivial names by the IUPAC.

The discoveries of elements with atomic numbers 112, 114, and 116 have been reported but not fully confirmed.

58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.907 65	60 Nd Neodymium 144.242	61 Pm Promethium (145)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.925 35	66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.930 32	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.934 21	70 Yb Ytterbium 173.04	71 Lu Lutetium 174.967
90 Th Thorium 232.038 06	91 Pa Protactinium 231.036 88	92 U Uranium 238.028 91	93 Np Neptunium (237)	94 Pu Plutonium (244)	95 Am Americium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkelium (247)	98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendelevium (258)	102 No Nobelium (259)	103 Lr Lawrencium (262)

The atomic masses listed in this table reflect the precision of current measurements. (Each value listed in parentheses is the mass number of that radioactive element's most stable or most common isotope.)

طبقه بندی مواد

مواد را با توجه به علامت و بزرگی پذیرفتاری آنها، می توان در سه دسته طبقه بندی کرد. موادی که در آنها χ مثبت است، یعنی M موازی با H است، پارامغناطیس نامیده می شوند. موادی که در آنها χ منفی است و M در خلاف جهت H است به نام دیامغناطیس خوانده می شوند. پذیرفتاری مغناطیسی بعضی از مواد در جدول ۱-۹ آمده است. به کوچکی مقدار χ توجه نمایید.

(۱) مواد پارامغناطیس: بهترین مثال برای مواد پارامغناطیس، یونهای عناصر واسطه و یونهای عناصر خاکی نادر هستند. این یونها، لایه های اتمی کامل نشده دارند و همین لایه ها مسئول رفتار پارامغناطیسی این موادند.

(۲) مواد دیامغناطیس: بلورهای یونی و کووالان دیامغناطیس هستند. این مواد اتمها یا یونهایی با لایه های کامل دارند و خاصیت دیامغناطیسی آنها مربوط به این واقعیت است که اعمال میدان مغناطیسی، حرکت مداری آنها را آشفته می کند.

۳) مواد فرومغناطیس: پذیرفتاری مغناطیسی مواد فرومغناطیس خیلی بزرگ است (10^5 Cm^{-3}). یک ماده مغناطیسی در زیر دمای معینی به طور لحظه‌ای مغناطیده می‌شود. مثال‌هایی از فلزات فرومغناطیس، Fe، Co، Ni و آلیاژهای آنها هستند. راجع به این مواد و پدیده‌های جالبی که این مواد از خود نشان می‌دهند، بعداً در این فصل بیان خواهیم کرد.

جدول ۱-۹: پذیرفتاری مغناطیسی (بر cm^{-3})

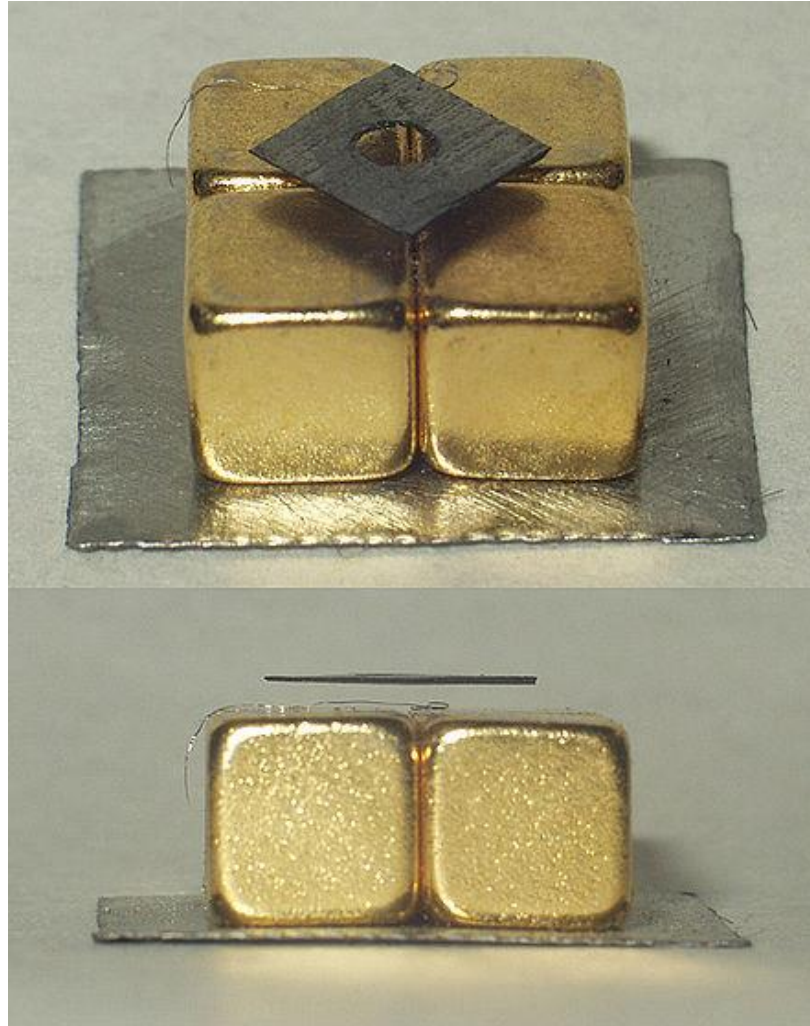
مواد	χ
پارامغناطیس	
Al	$+220 \times 10^{-5}$
Mn	+98
W	+36
دیامغناطیس	
Cu	$-1/0 \times 10^{-5}$
Au	-3/6
Hg	-3/2
آب	-9/0
H	$-0/2 \times 10^{-8}$

مواد دیامغناطیس

مواد **دیامغناطیس**، موادی هستند که در اثر اعمال یک میدان مغناطیسی خارجی در آنها یک میدان مغناطیسی القایی در جهت مخالف ایجاد شده و توسط میدان دفع می شوند. مواد پارامغناطیس برعکس این رفتار را از خود نشان می دهند. دیامغناطیس شدن یک خاصیت مکانیک کوانتومی است که در تمام مواد رخ می دهد. در مواد پارا و فرومغناطیس این خاصیت مغلوب نیروی جاذبه دوقطبی های مغناطیسی می شود.

نفوذپذیری مغناطیسی آنها کمتر از نفوذپذیری خلأ می باشد؛ در نتیجه دیامغناطیس ها شکلی از مغناطیس هستند که تنها با یک ماده در حضور یک میدان مغناطیس خارجی به کار گرفته شده ایجاد می شوند. در بیشتر مواد، دیامغناطیس کاملاً یک اثر ضعیف دارد که در آزمایشگاهها با ابزارهای حساسی می توان به آنها پی برد ابر رساناها بعنوان دیامغناطیس قوی ایی عمل می کنند چون بطور کلی میدان مغناطیسی را از درون خود دفع می کنند.


[Pyrolytic carbon](#) has one of the largest diamagnetic constants of any room temperature material. Here a pyrolytic carbon sheet is levitated by its repulsion from the strong magnetic field of [neodymium magnets](#).



Notable diamagnetic materials

Material	χ_v [$\times 10^{-5}$ (SI units)]
Superconductor	-10^5
Pyrolytic carbon	-40.9
Bismuth	-16.6
Mercury	-2.9
Silver	-2.6
Carbon (diamond)	-2.1
Lead	-1.8
Carbon (graphite)	-1.6
Copper	-1.0
Water	-0.91



A live frog levitates inside a 32 mm  (1.26 in) diameter vertical bore of a Bitter solenoid in a magnetic field of about 16 teslas at the Nijmegen High Field Magnet Laboratory.^[8]