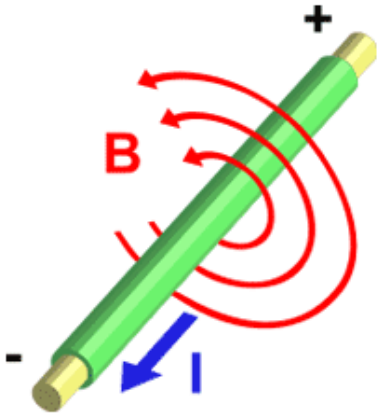
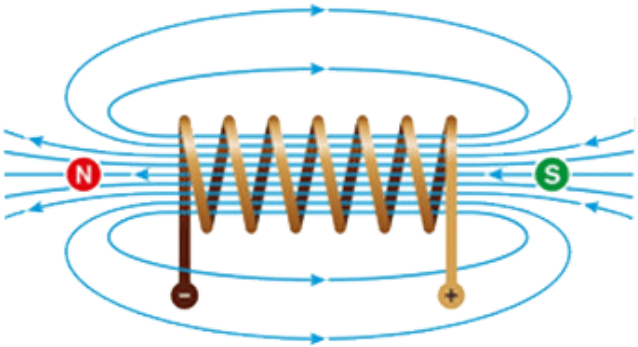
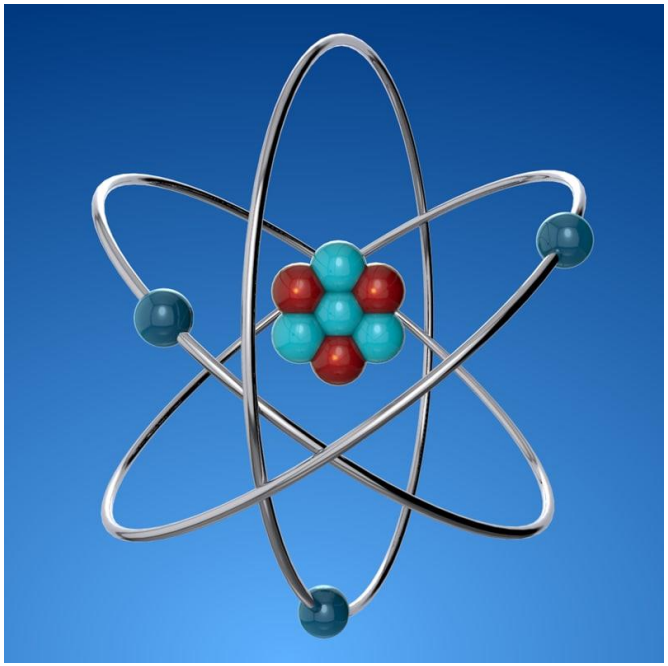
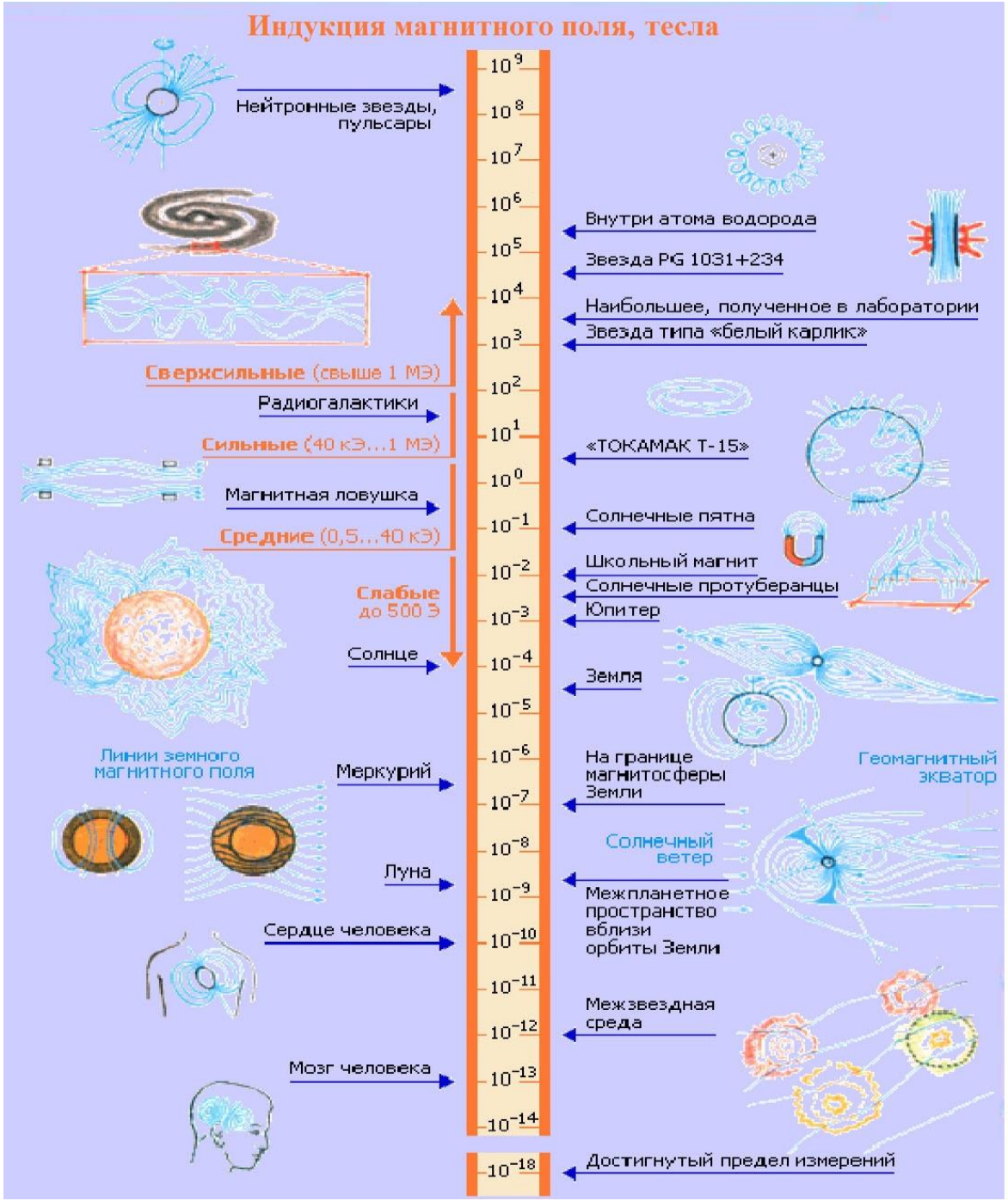
Магнетизм: от атома до галактики

Шапаева Т. Б.
физический
факультет МГУ

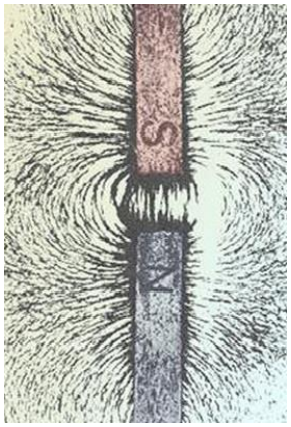


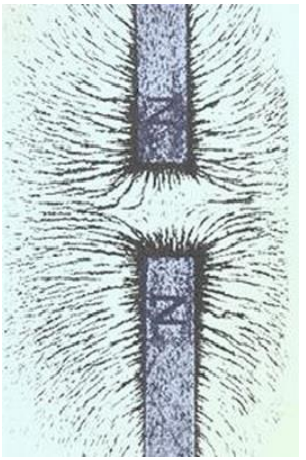






Индукция магнитного поля





СИ

$$F_A = I \cdot l \cdot B$$

если

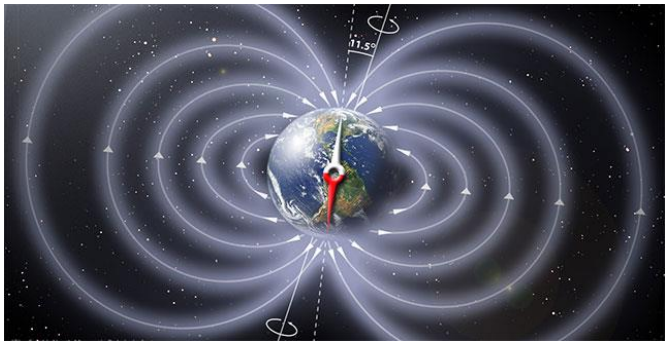
$$\vec{l} \perp \vec{B}$$

$$B = \frac{F_A}{I \cdot l}$$

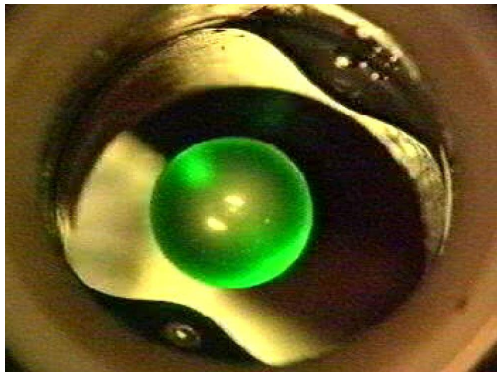
$$Тл = \frac{Н}{А \cdot м}$$

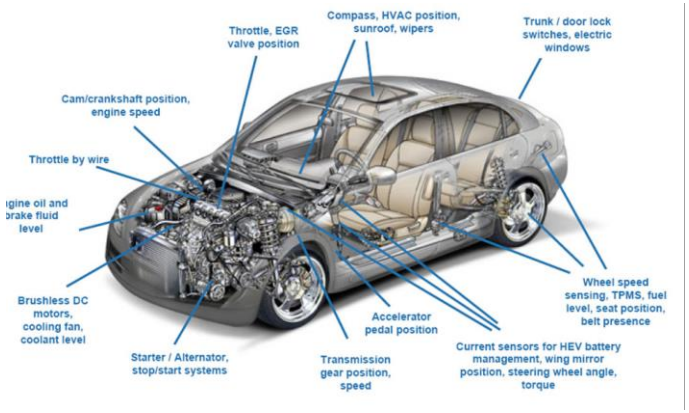
Магнетизм: от атома до галактики

Шапаева Т.Б., физический факультет МГУ

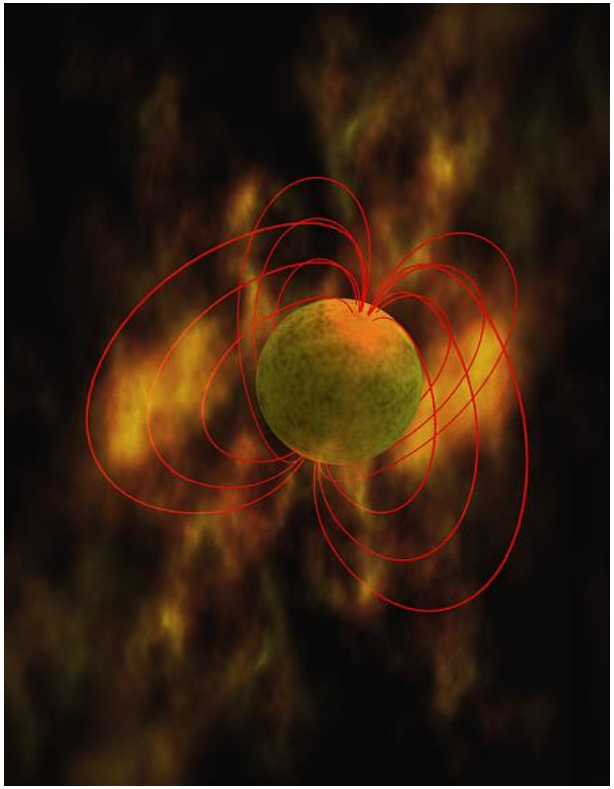


- ✓ Магнитное поле нейтронных звезд
- ✓ Планета Земля
- ✓ Большой адронный коллайдер – самая крупная экспериментальная установка
- ✓ Транспорт на магнитной подушке
- ✓ Магнитная защита денег пластиковых карт
- ✓ Закон Фарадея – основа современной энергетики
- ✓ Человек как магнитный материал
- ✓ Природа магнетизма



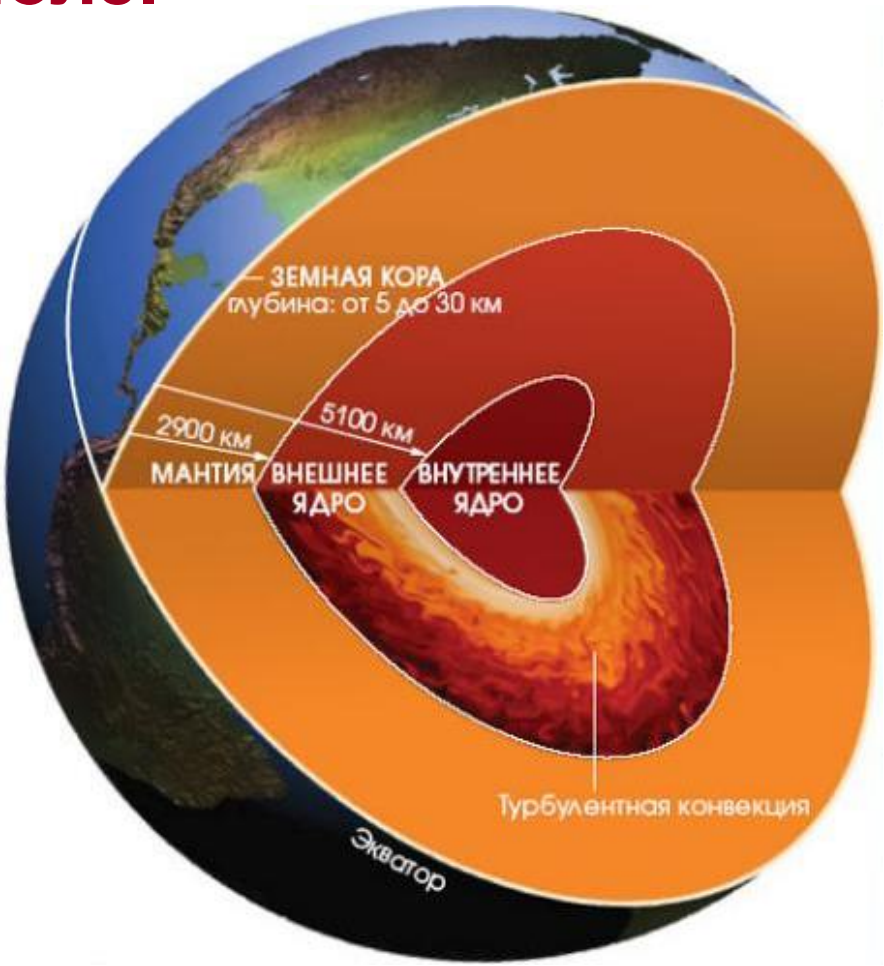


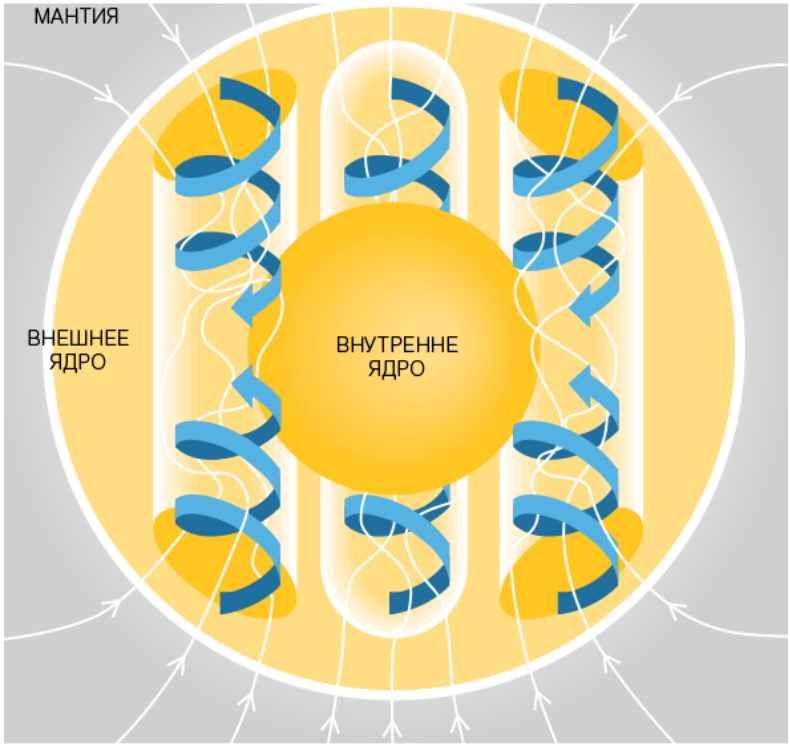
Магнитар (магнетар (magnetar)) — нейтронная звезда, обладающая самым сильным магнитным полем (до 10^{11} Тл). Теоретически существование магнитаров было предсказано в 1992 году, а первое свидетельство их реального существования получено в 1998 году при наблюдении мощной вспышки в созвездии Орла. По состоянию на апрель 2025 года подтверждено существование 30 магнитаров.



Диаметр магнитаров около 20—30 км, массы большинства превышают массу Солнца. Магнитар настолько сжат, что горошина его материи весила бы более 100 миллионов тонн.

Во внутреннем строении Земли выделяется расплавленное внешнее ядро, где сложная турбулентная конвекция создает геомагнитное поле.

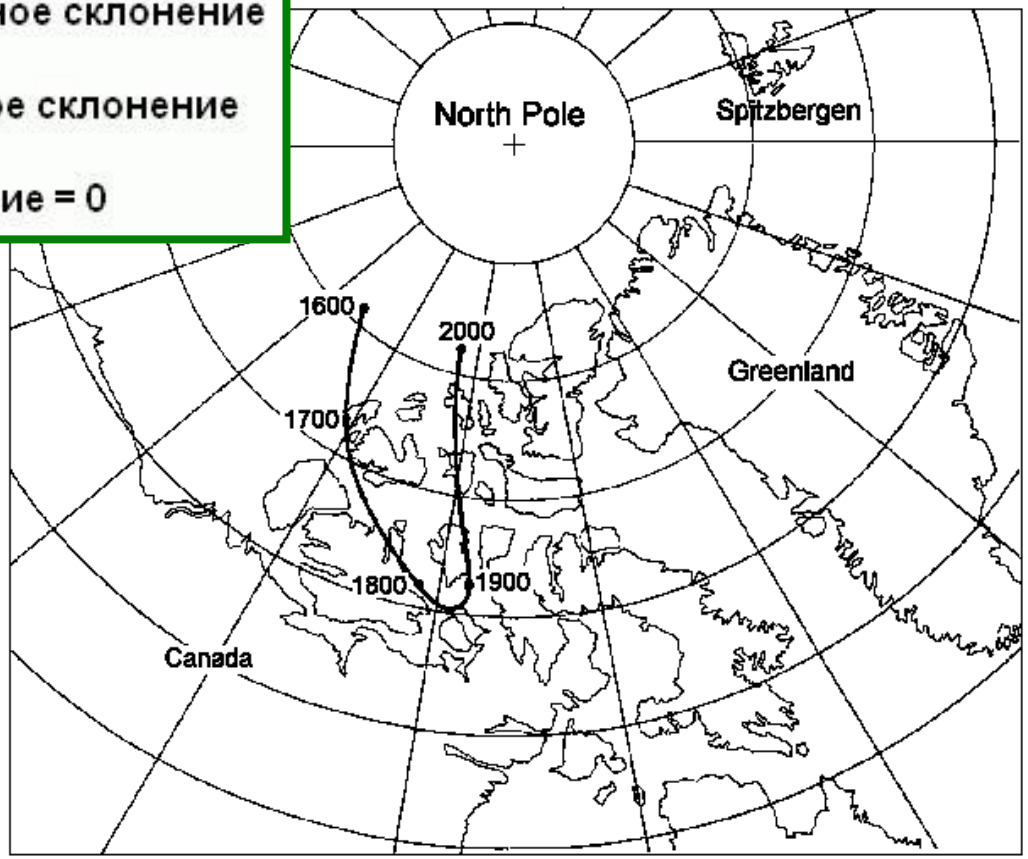




Магнитное склонение (открыл Х. Колумб в 1492 г.)

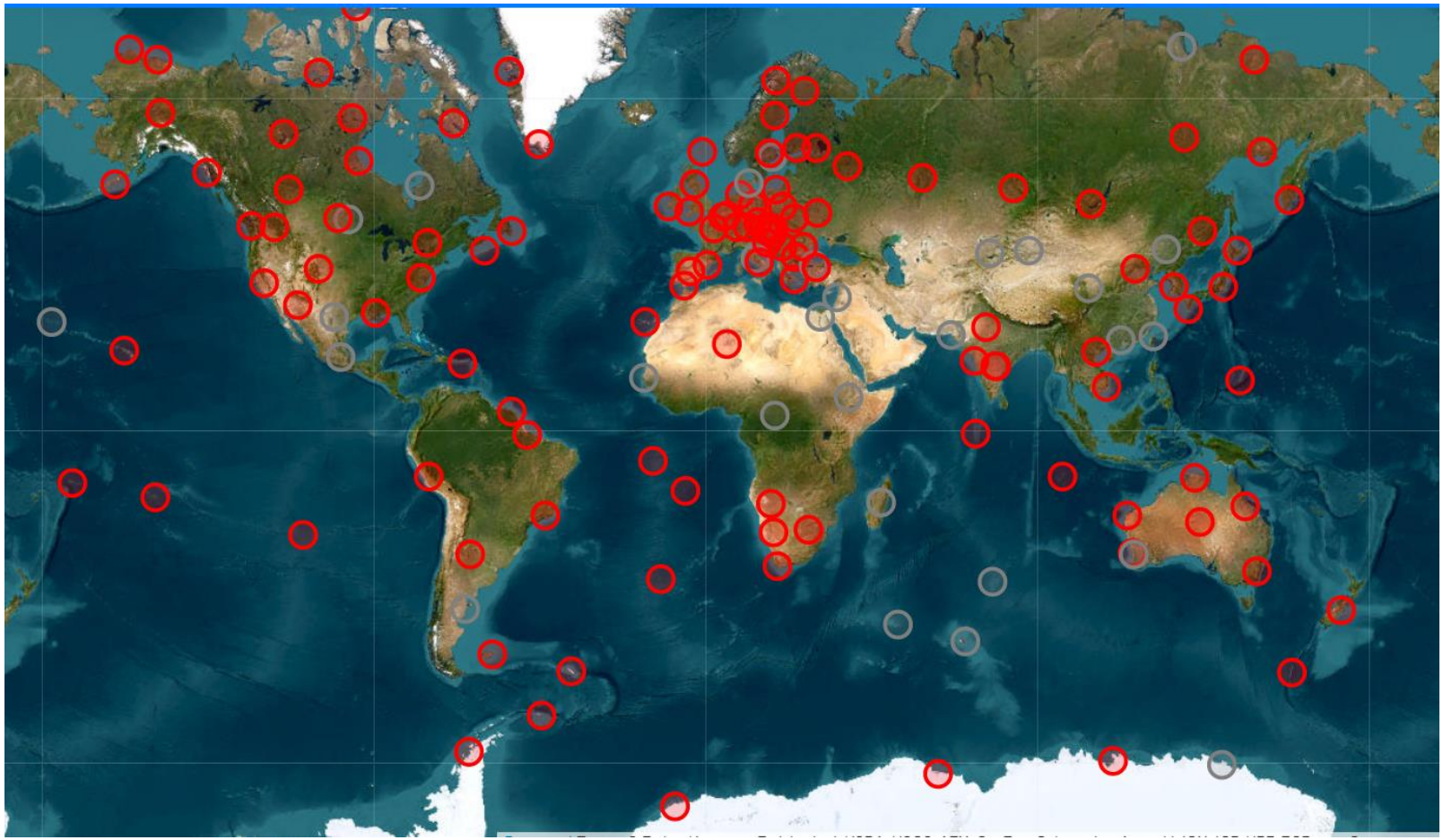
Магнитная ось составляет угол 11,5° с осью вращения Земли

Положение географического и магнитного полюсов Земли за последние 400 лет.



Скорость перемещения магнитного полюса увеличилась с 15 км в год в 2000 году до 55 км в год в 2019 году.

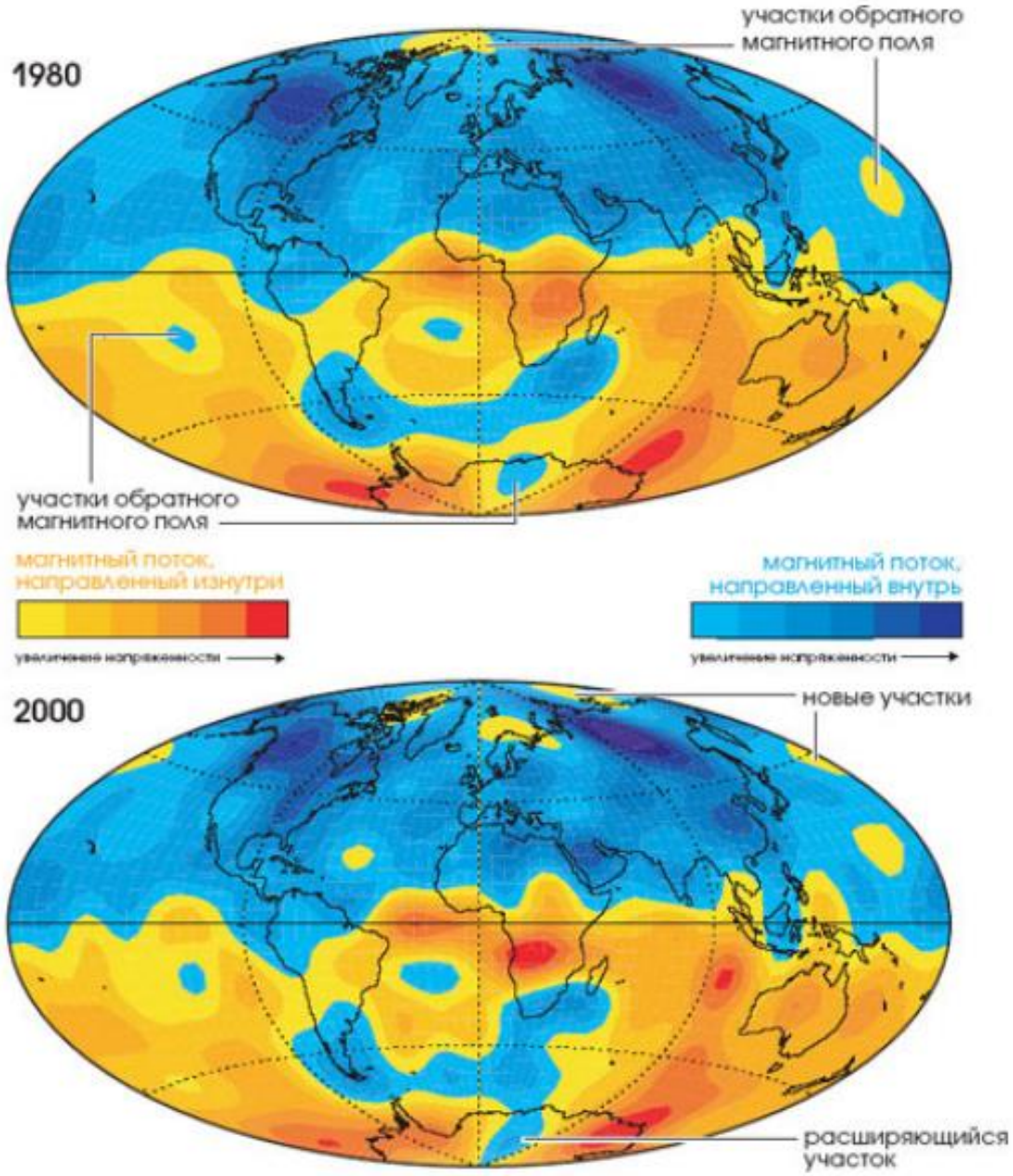
Карта геомагнитных обсерваторий



В России к 1829 г. Магнитные обсерватории (МО) были построены в Петербурге и Казани (они были первыми в Европе), затем МО были созданы в Нерчинске, Барнауле, Колывани, Екатеринбурге, Тбилиси и др. Первая в мире полярная МО открыта в 1924 г. в проливе Маточкин Шар на Новой Земле.

В настоящее время в мире насчитывается свыше сотни постоянно действующих магнитных обсерваторий. 29 российских и 90 зарубежных МО регулярно направляют информацию о состоянии магнитного поля и ионосферы Земли в Международные центры, которые находятся в России, США, Великобритании, Канаде и Японии.

https://intermagnet.github.io/metadata/#/map

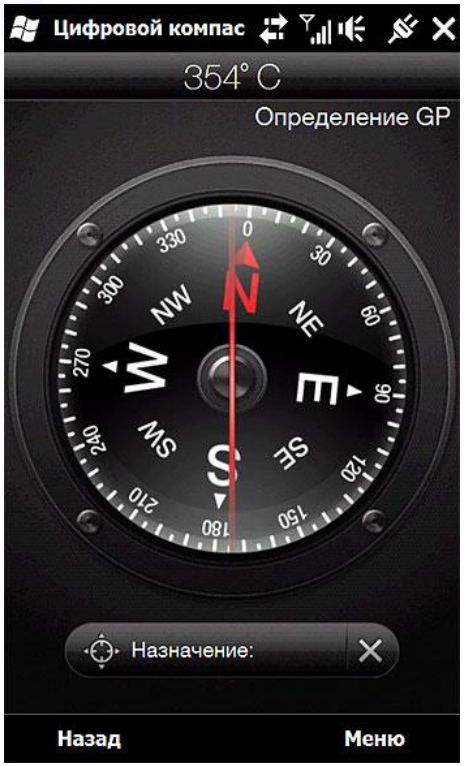


Карты магнитного поля за 1980 и 2000 гг.

Он-лайн калькуляторы для оценки текущих и прошлых значений магнитного поля.

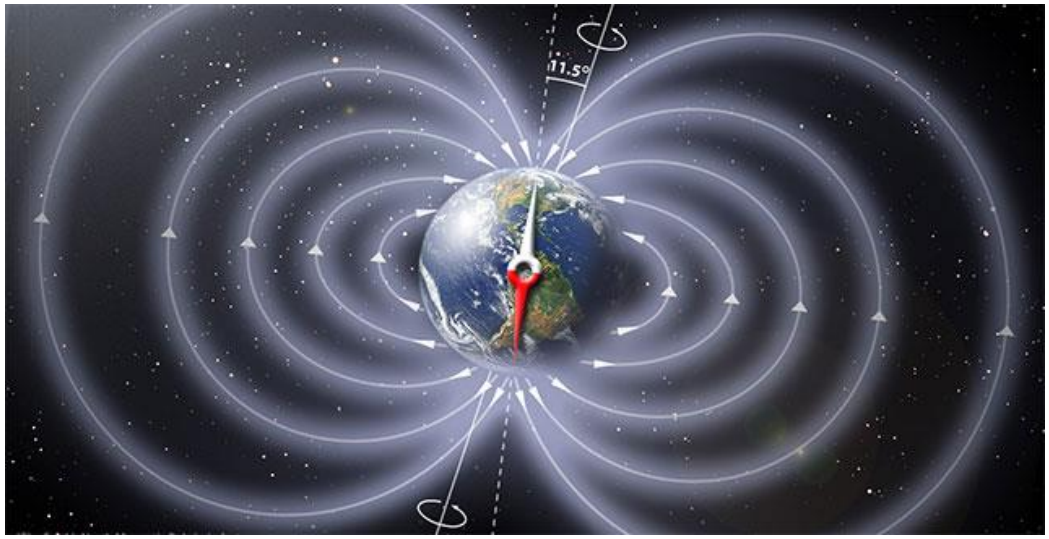
https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/image.shtml

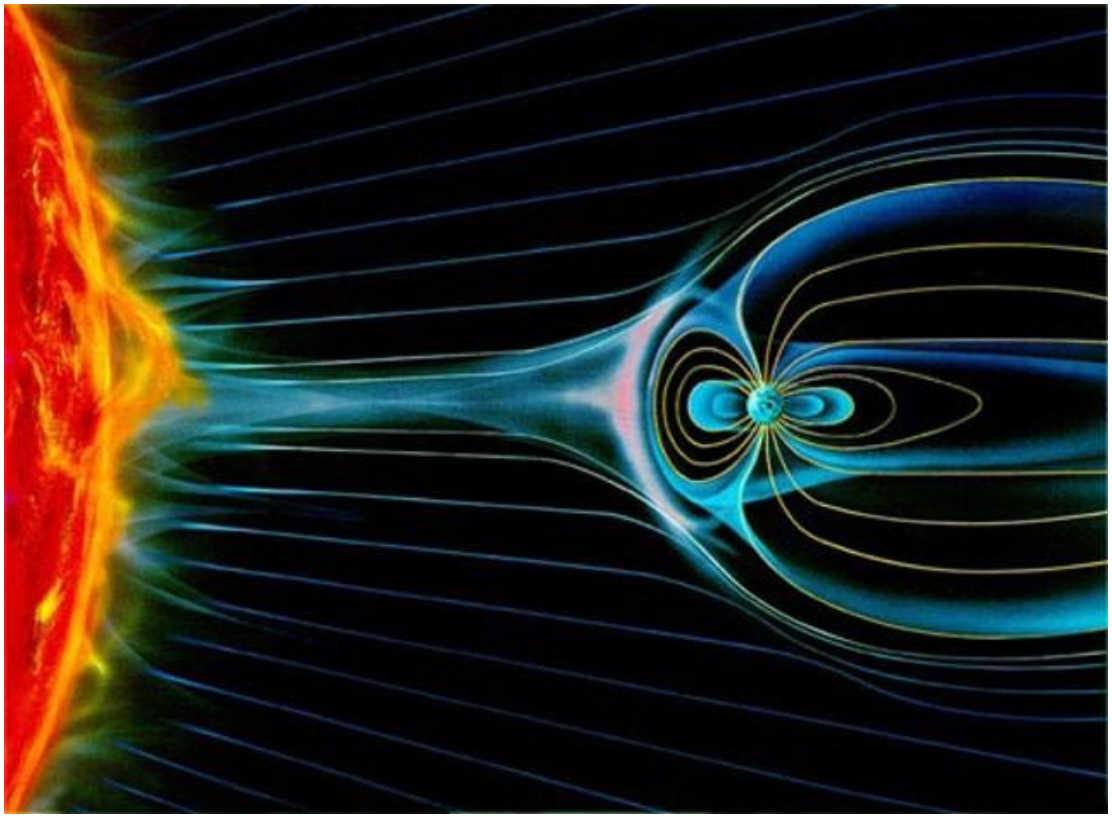
Компас



Модель китайского компаса периода династии Хань (206 до н.э. – 220 до н.э.)

Солнечный ветер — поток ионизированных частиц, истекающий из солнечной короны со скоростью 300—1200 км/с.

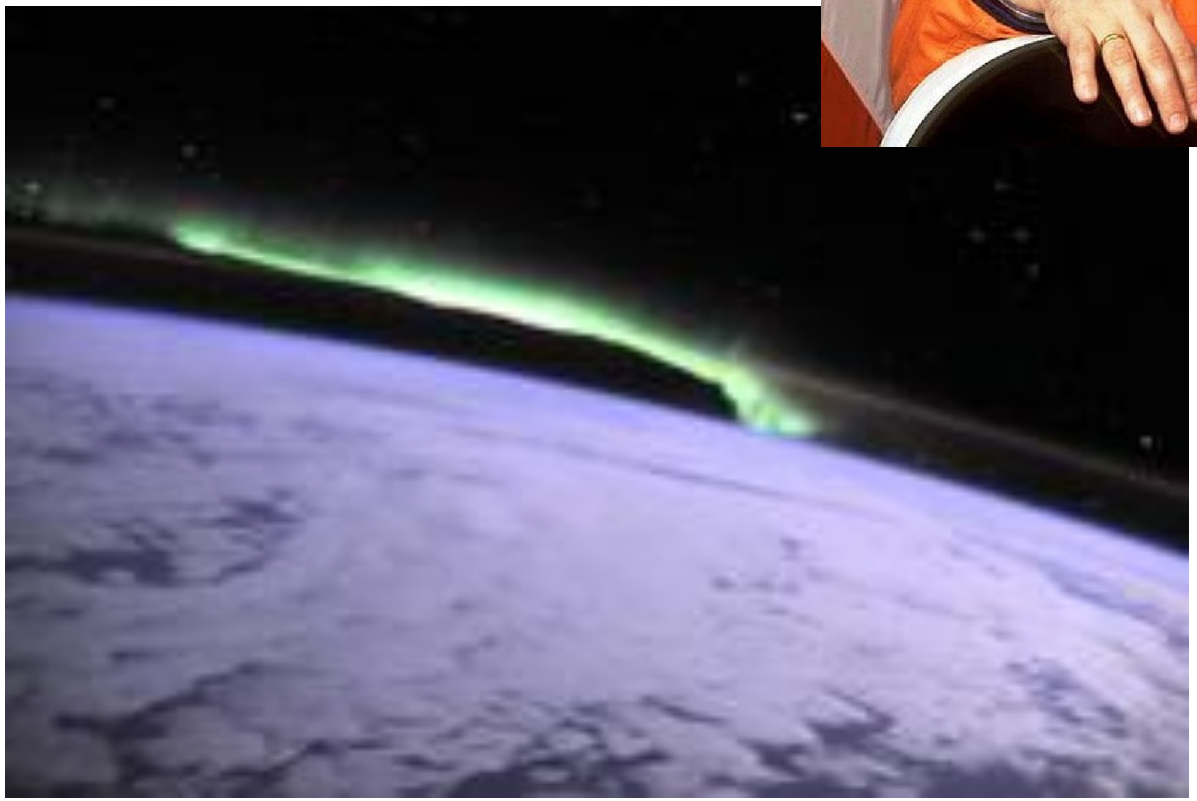




Магнитные поля некоторых планет Солнечной системы (мкТл)

Меркурий	**0,35**
Венера	**0,003**
Земля	**30 – 60**
Луна	**0,001**
Марс	**0,05**
Юпитер	**420**
Сатурн	**20**
Уран	**13**
Нептун	**6,5**

Полярное сияние на Земле.

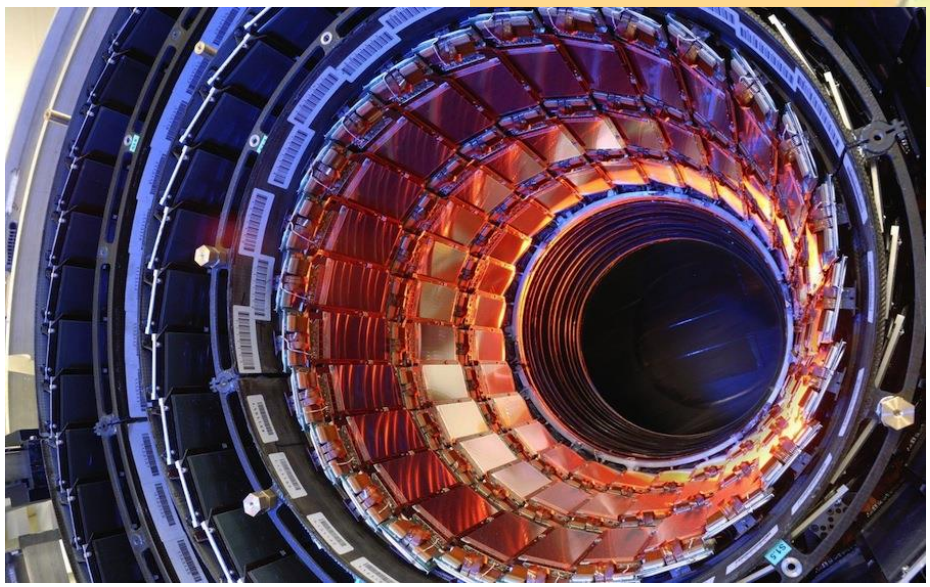


Фотография летчика-космонавта героя России Фёдора Николаевича Юрчихина

Полярные сияния чаще возникают весной и осенью.

За одно из зарегистрированных в 2007 году возмущений выделилось $5 \cdot 10^{14}$ Дж

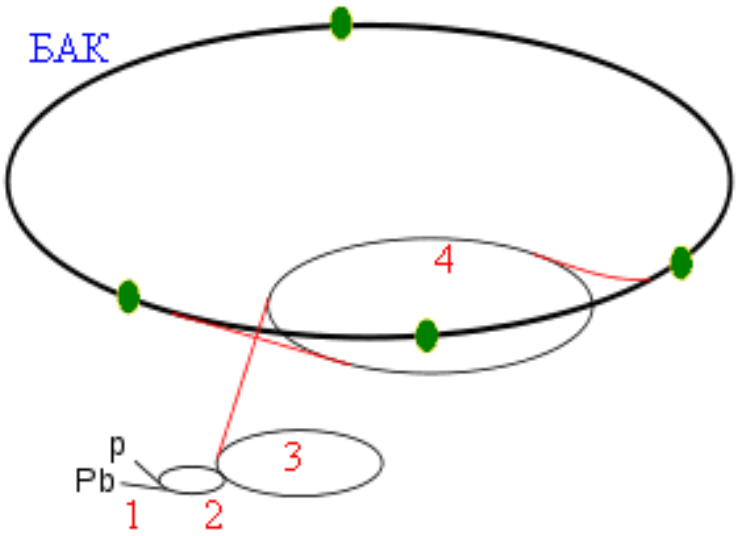
Большой адронный коллайдер.



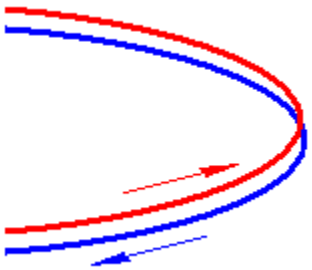
- ✓ Идея проекта 1984 г.
- ✓ Строительство 2001 – 2006 г.г.
- ✓ Официальный пуск 2008 г.
- ✓ В 2014 году начато изучение возможности строительства коллайдера периметром до 100 км.
- ✓ Считается что с учётом всех модернизаций БАК проработает до 2034 года,

https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider

Большой адронный коллайдер



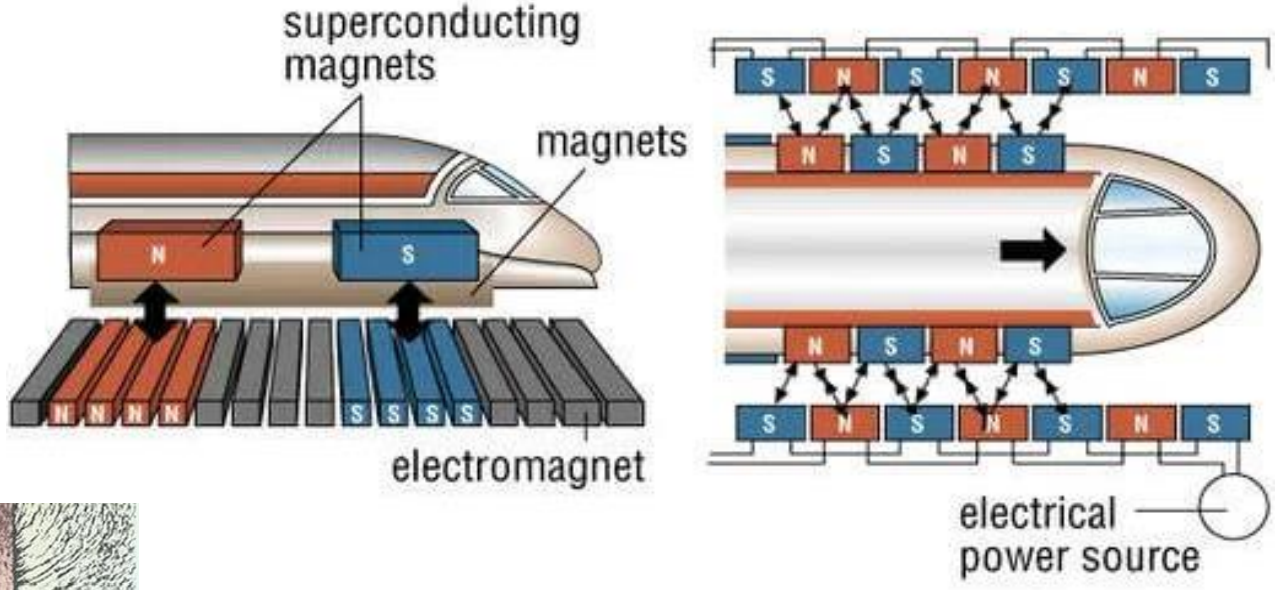
1 – линейный ускоритель. Скорость протонов на выходе =1/3 с
2 – кольцо (L_2=157 м), скорость на выходе **0,96 с**
3 – протонный синхротрон (L_3=628 м) скорость на выходе **0,999 с**, масса в 75 раз больше массы покоя
4 – L_4=7 км, энергия на выходе такая, что масса частицы в 1350 раз больше массы покоя

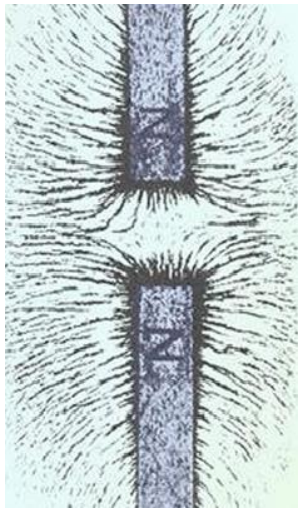


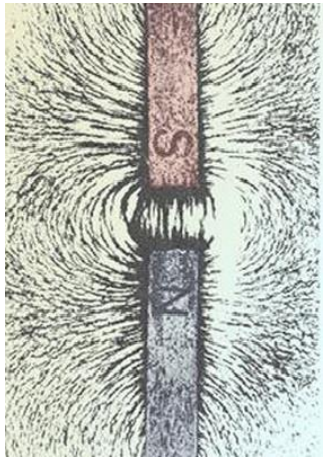
Большое кольцо БАК – L=27 км. Пучки протонов могут двигаться в противоположных направлениях и пересекаются в 4 точках. Энергия протонов 7 ТэВ, масса в 7000 раз больше массы покоя.

Анализ данных может помочь понять, как появилась Вселенная, как она развивалась, что управляет ей сегодня, и что ждет ее в будущем.

Поезд на магнитной подушке (маглев)







Поезд на магнитной подушке маглев (magnetic levitation) — это поезд или трамвай, который удерживается над полотном дороги, его движением управляет электромагнитное поле.

Такой состав, в процессе движения не касается поверхности рельса. Так как между поездом и поверхностью полотна существует зазор, трение между ними исключается, и единственной тормозящей силой является аэродинамическое сопротивление.

Скорость, достигаемая поездом на магнитной подушке, сравнима со скоростью самолёта и позволяет составить конкуренцию воздушному транспорту на расстоянии до 1000 км.

Поезд на магнитной подушке (маглев)

Первая публичная система маглев (M-Bahn) была открыта в Берлине 28 августа 1989 года. Поезда могли достигать скорости 80 км/ч и вмещали до 130 пассажиров. Берлина.

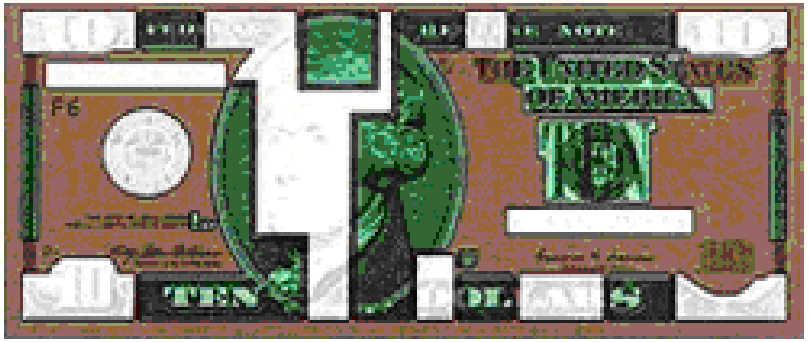
- ✓ В Южной Корее в 2016 г., используя технологии компании Hyundai, открыта дорога длиной 6,1 км, максимальная скорость движения 110 км/ч.
- ✓ В Японии, используя собственные технологии, в 2015 были запущены поезда, демонстрирующие скорость свыше 600 км/ч.
- ✓ В июле 2021 г. в Китае, используя собственные разработки, запустили поезд, скорость которого может достигать 600 км/ч.
- ✓ **В настоящее время это самый быстрый наземный транспорт в мире.**

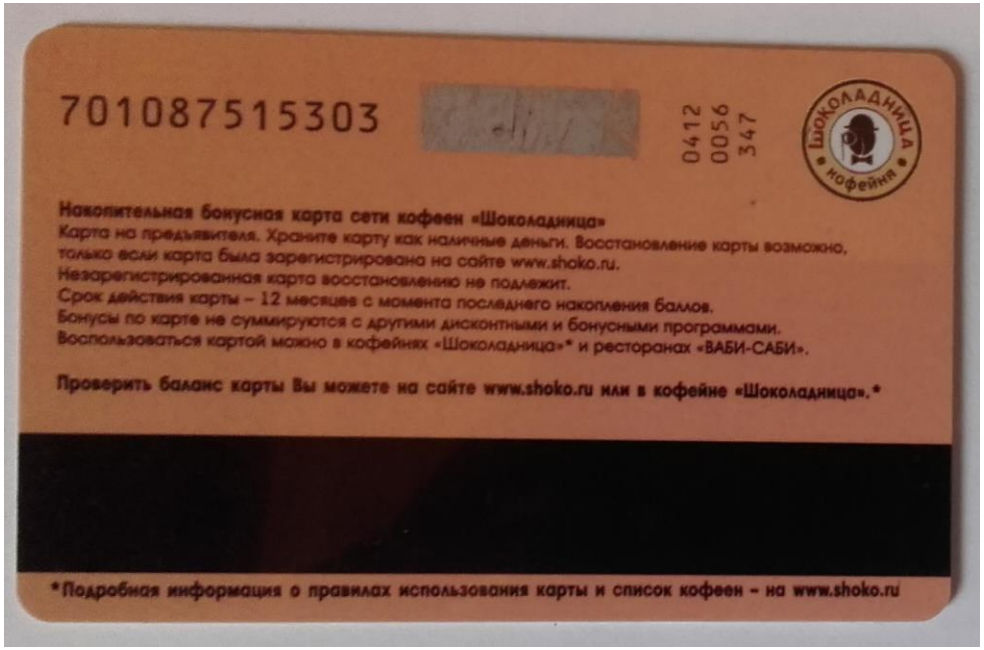
500 рублей 2010 г выпуска

Магнитная защита денег и пластиковых карт

1000 рублей

Магнитная защита банкнот обеспечивается благодаря краскам, содержащим ферромагнитный пигмент.

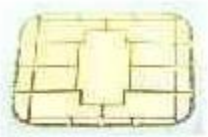




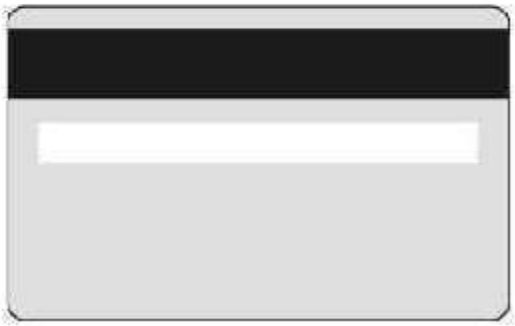
Магнитная защита денег и пластиковых карт

Пластиковая карта содержит магнитную полосу с объемом информации около 100 байт, на ней записана информация об имени владельца и номере его счета.

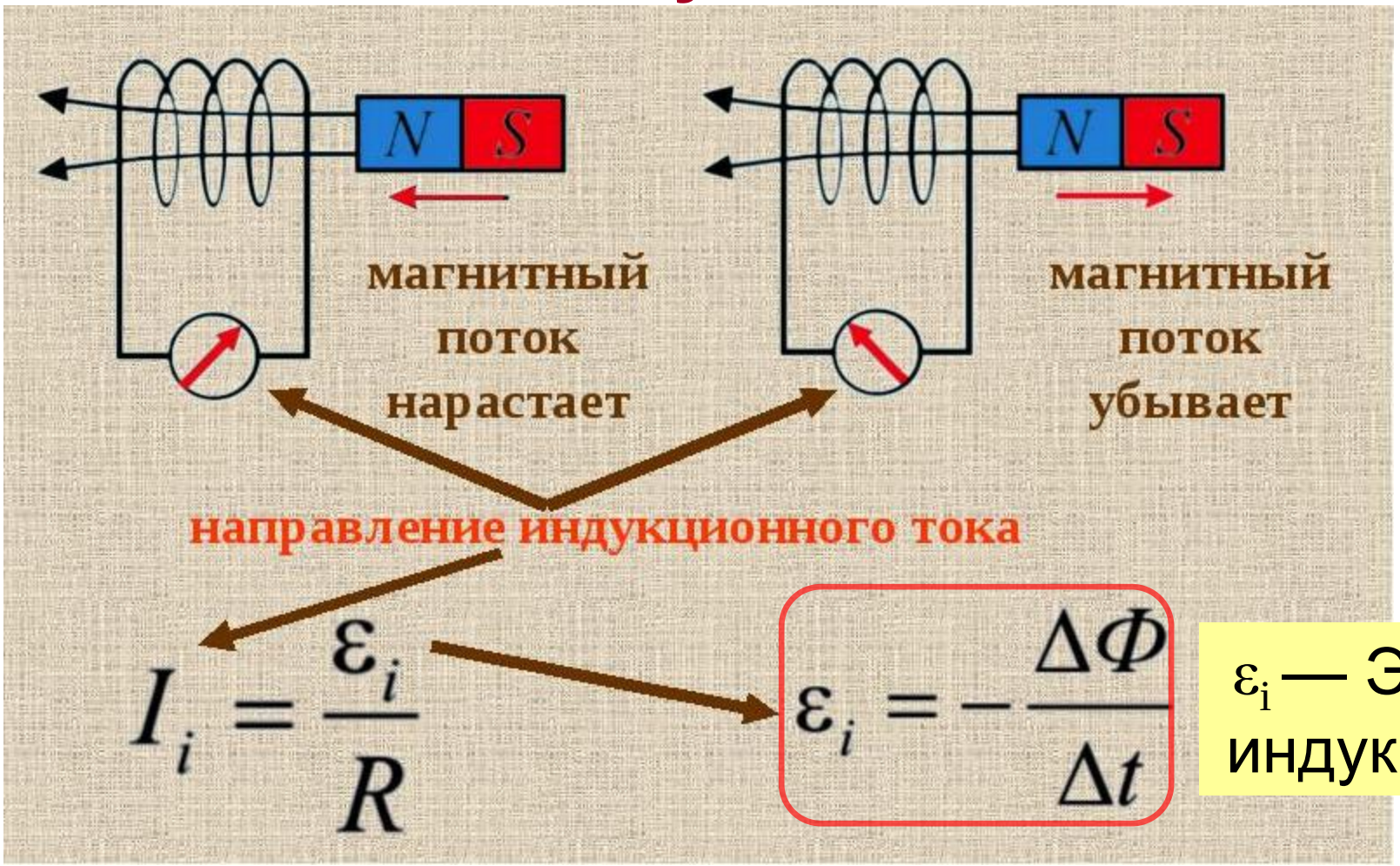
В современных картах магнитные полосы изготовлены из материалов, требующих сильных полей для записи информации.
Магнитные ленты чувствительны к влаге, загрязнению и царапинам.



Магнитные карты, содержащие чип, защищены сильнее



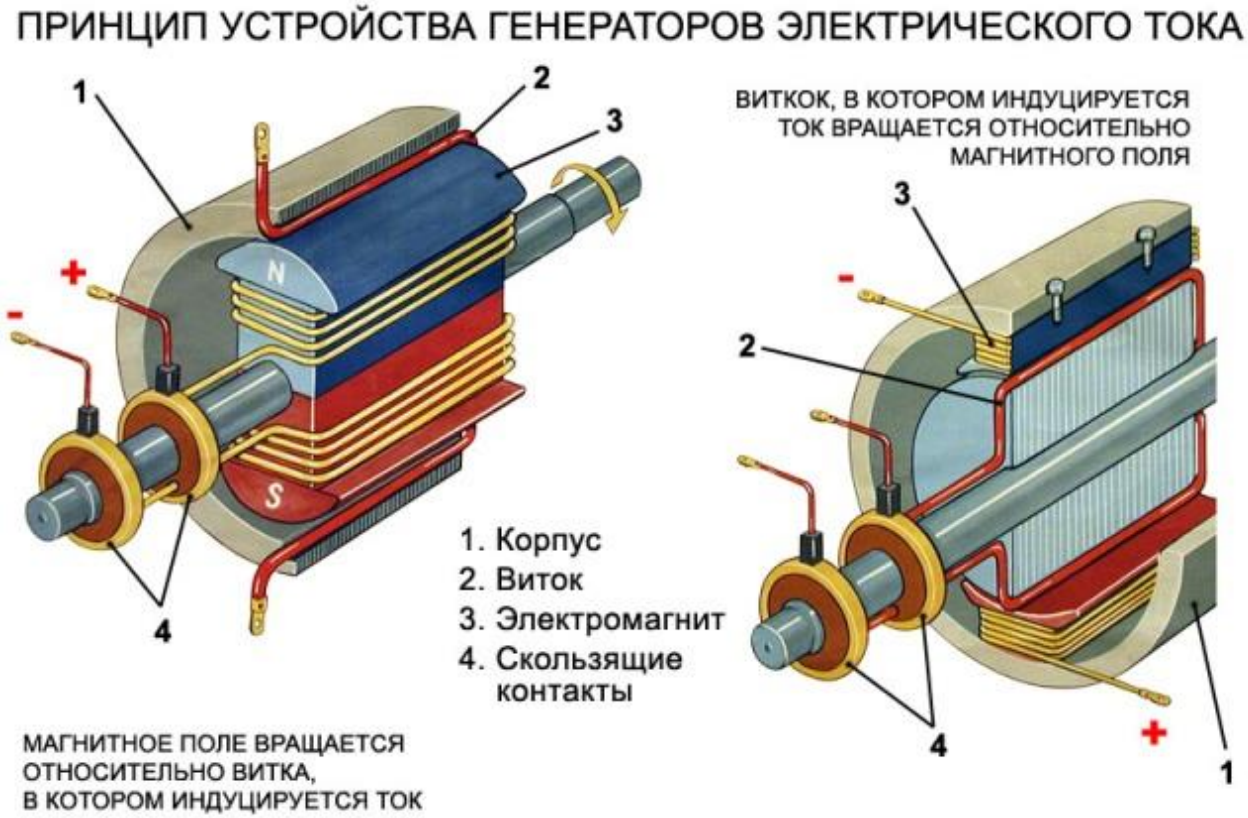
Основа современной энергетики – закон Фарадея для электромагнитной индукции



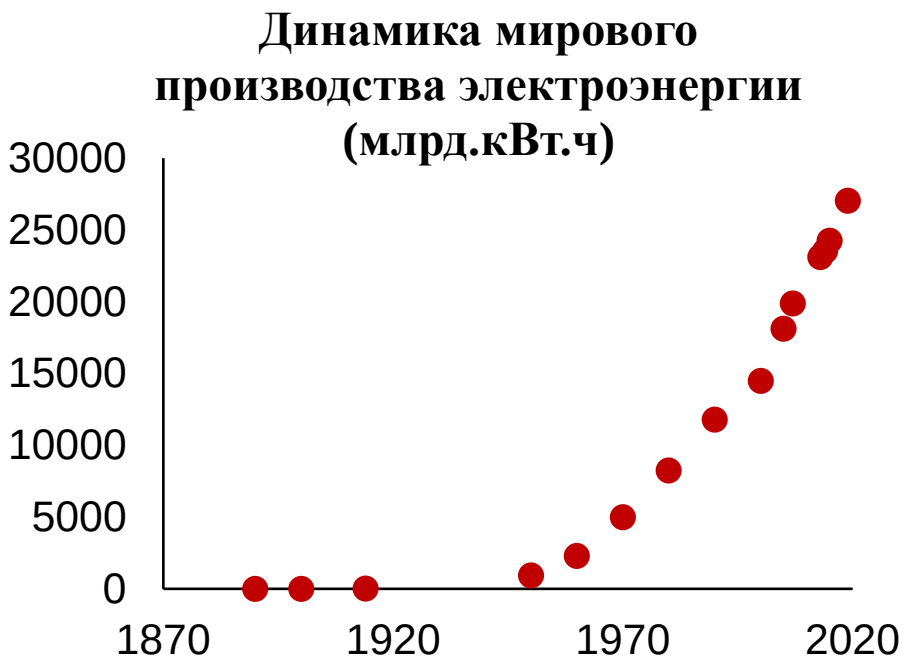
ε_i — ЭДС индукции

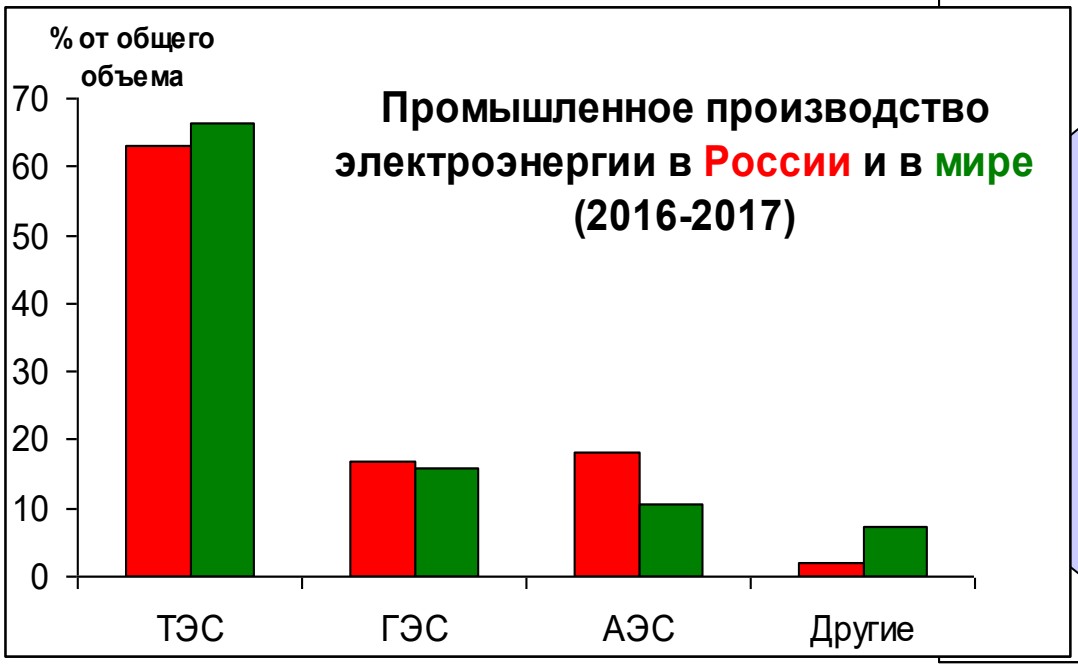
Ф — магнитный поток

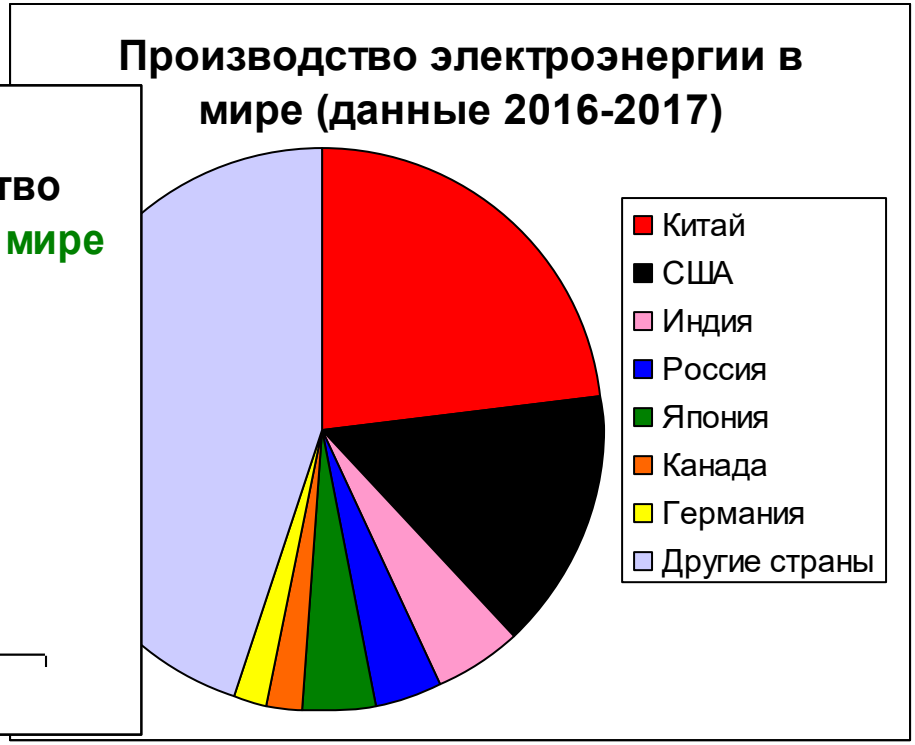
- ✓ Электромагнитная индукция была обнаружена независимо друг от друга **Майклом Фарадеем и Джозефом Генри в 1831 году**, однако Фарадей первым опубликовал результаты своих исследований
- ✓ Первый генератор электрического тока, основанный на явлении электромагнитной индукции, был построен в 1832 г. парижскими техниками братьями Пиксин.



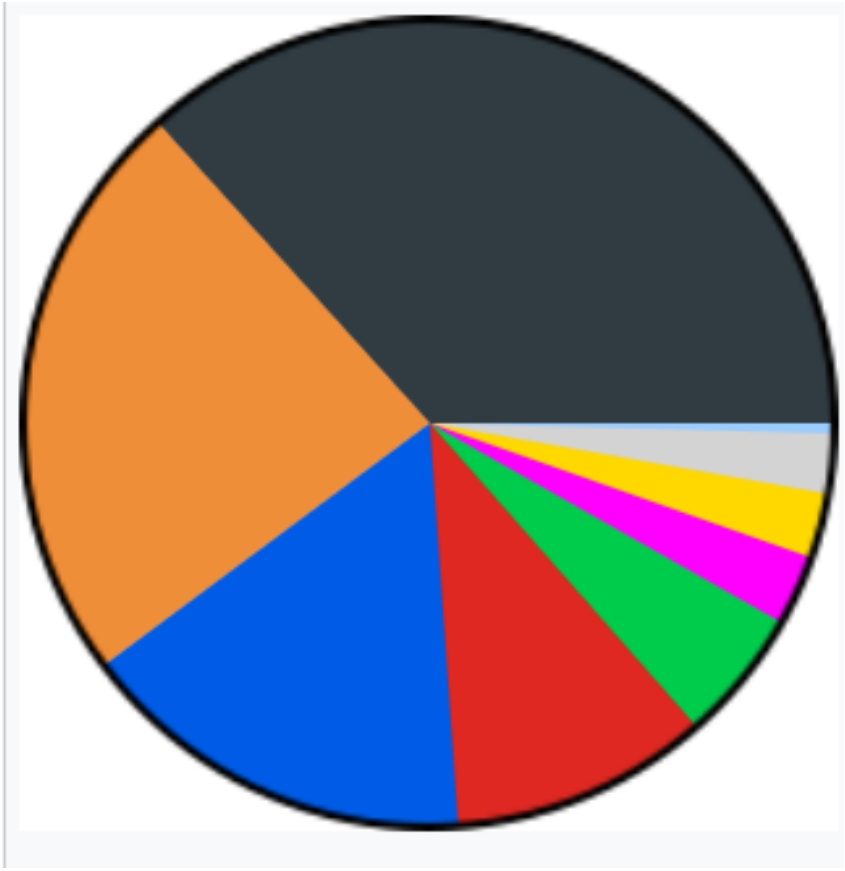
Мировая энергетика







Доли в % различных источников в мировом производстве электроэнергии в 2019 году по данным Международного Энергетического Агентства (МЭА)

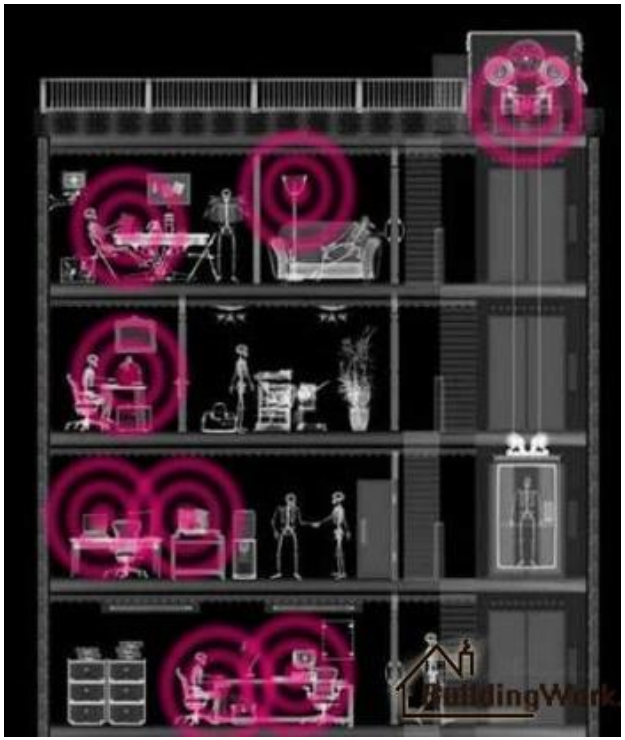


- Уголь/Торф (36,7 %)
- Природный газ (23,5 %)
- Гидро (16,0 %)
- Ядерная (10,3 %)
- Ветровая (5,3 %)
- Нефть (2,8 %)
- Солнечная (2,6 %)
- Биотопливо и энергия из отходов (2,4 %)
- Геотермальная, приливная и прочие (0,5 %)

Электромагнитная индукция – основа современной энергетики

Человек как магнитный материал

- **Почему некоторые люди чувствуют себя неуверенно во время магнитных бурь?**
- **Почему существует корреляция между уровнем электромагнитного шума и вероятностью раковых заболеваний?**
- **Почему так много медицинских центров используют электромагнитное излучение для терапии широкого круга заболеваний человека?**



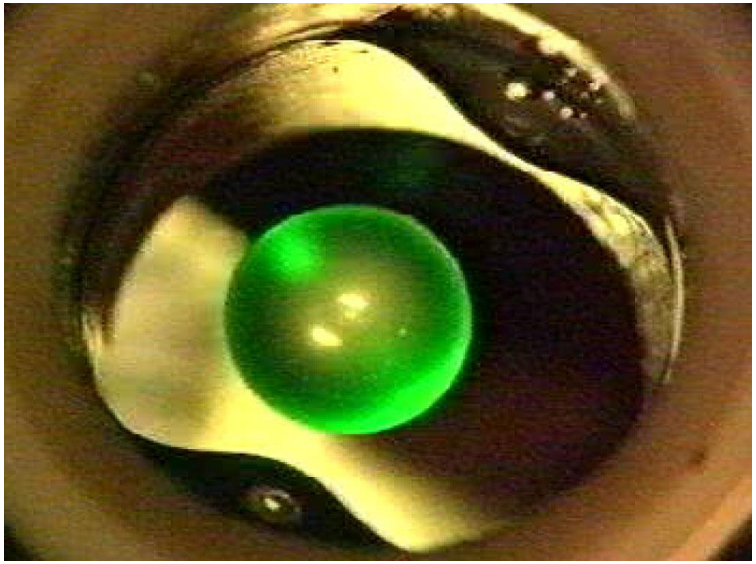
Линии электропередач, бытовые электроприборы и мобильные телефоны… Люди постоянно находятся в естественных и техногенных электромагнитных полях. Они не безразличны к этим полям так же как и другие живые организмы. Этот факт подтвержден огромным числом научных работ. Однако большинство авторов отмечают, что физическая причина этого явления до сих пор **неизвестна и парадоксальна.**

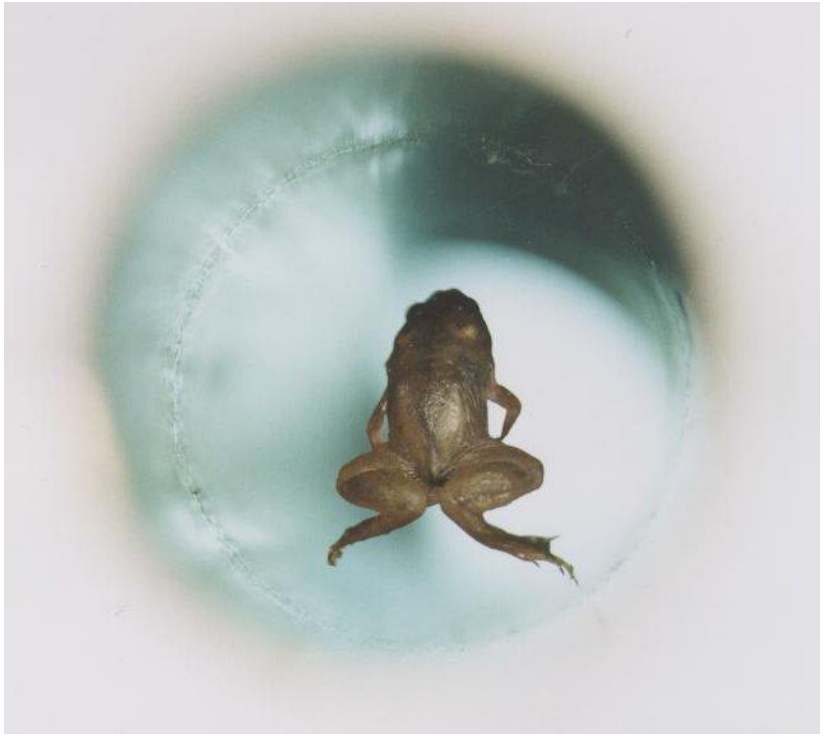
Максимум активности разных органов лежит в разных диапазонах частот, а величина амплитуды характеризует состояние органа.

Функционирование многих органов сопровождается генерацией переменных электромагнитных полей, регистрация которых на поверхности тела широко используется в медицине для диагностики.

1 Гс = 10^{-4} Тл

Материалы, формирующие части живого организма, на 95 % состоят из атомов 4 элементов: углерода, водорода, кислорода и азота.





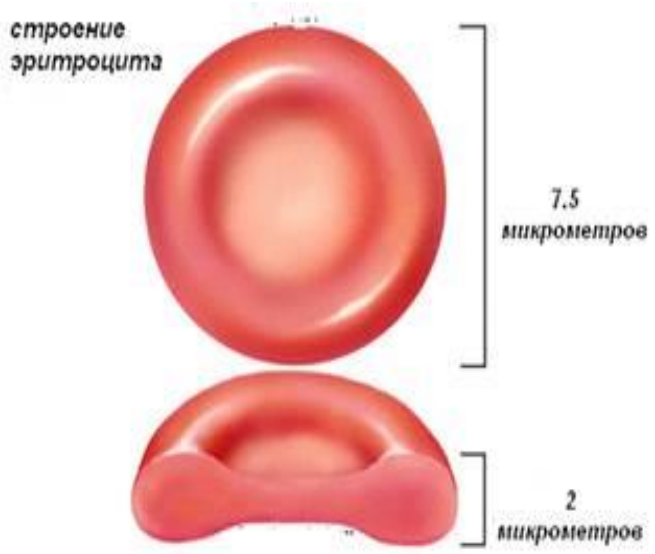
Капля воды, лягушка и жук, левитирующие в сильном магнитном поле

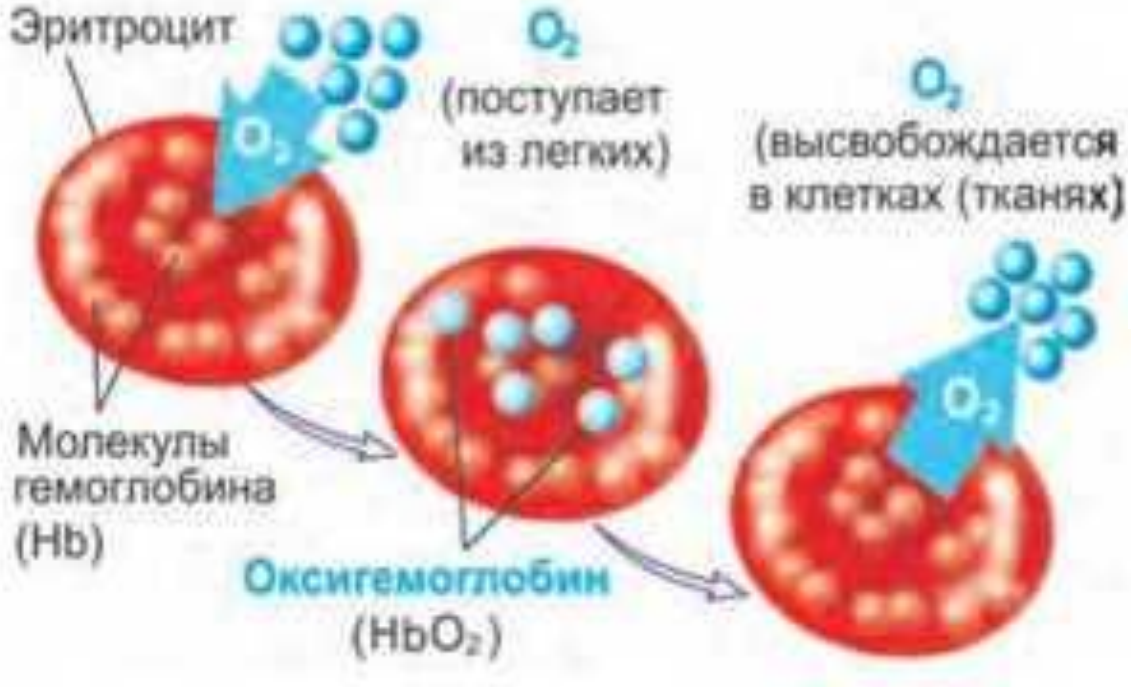
В организме взрослого человека (70 кг) содержится 4 – 5 г железа

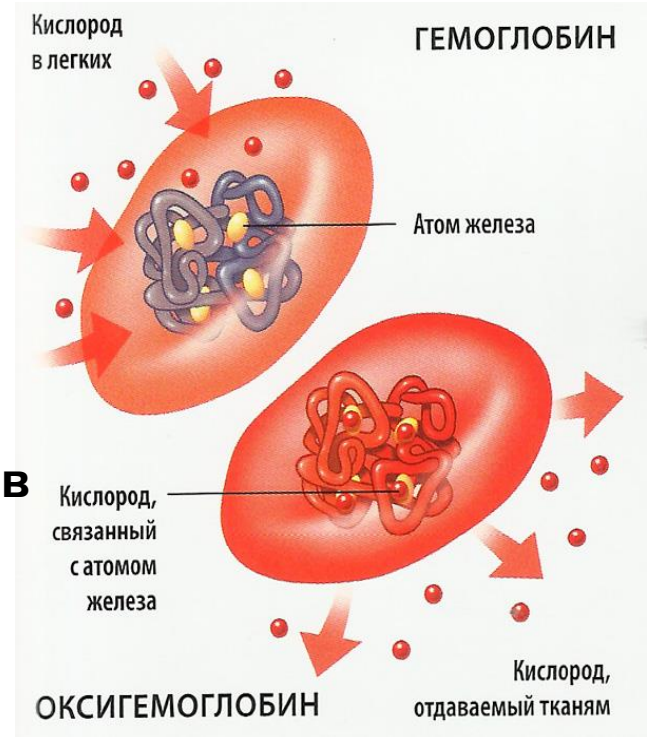
Железо в организме:

- **около 2/3 всего железа входит в состав гемоглобина**
- **примерно 25% всего железа запасено (в комплексе с белком ферритином) в селезенке, костном мозге, печени**
- **только 0,1% железа находится в плазме крови.**

Эритроциты имеют размер около 8 мкм. Это двояковыпуклый диск, внутри очень гибкой оболочки находится раствор гемоглобина и его соединений.







Электромагнитные параметры клеток крови определяют кинетику и вязкость крови, процессы свертывания, тромбирования сосудов и др. Даже слабые электромагнитные свойства клеток используются в биологических, микробиологических и фармацевтических аппаратах.

Магнитная восприимчивость χ

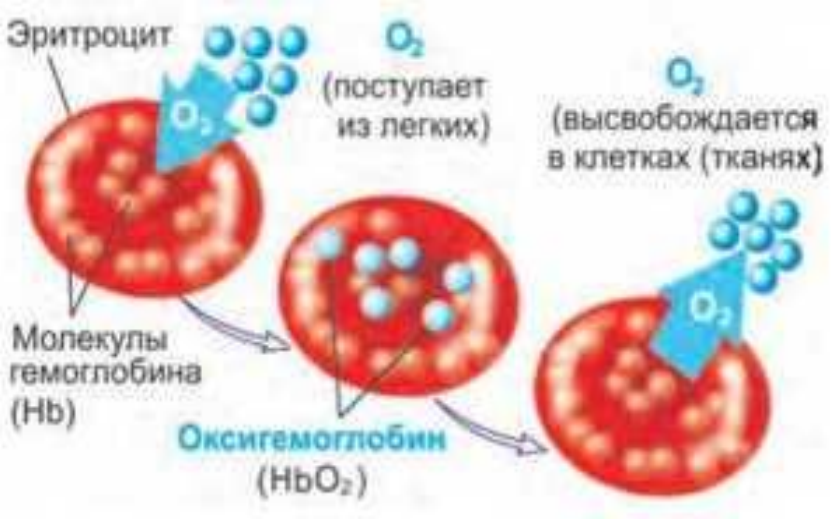
Вещество	$\chi \cdot 10^{-6}$
Воздух	+0,34
Вода	–9,05
Артериальная кровь	–9,01
Венозная кровь	–8,04
Эритроциты, обогащенные кислородом	–9,03
Эритроциты, необогащенные кислородом	+3,88
Легкие на вдохе	–3,9
Легкие на выдохе	–4,1
Мускульная ткань	–9,0
Печень	–8,8
Костная ткань	–10

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

$$\mu = 1 + \chi$$

B – индукция магнитного поля,
H – напряженность магнитного поля,
μ – магнитная проницаемость

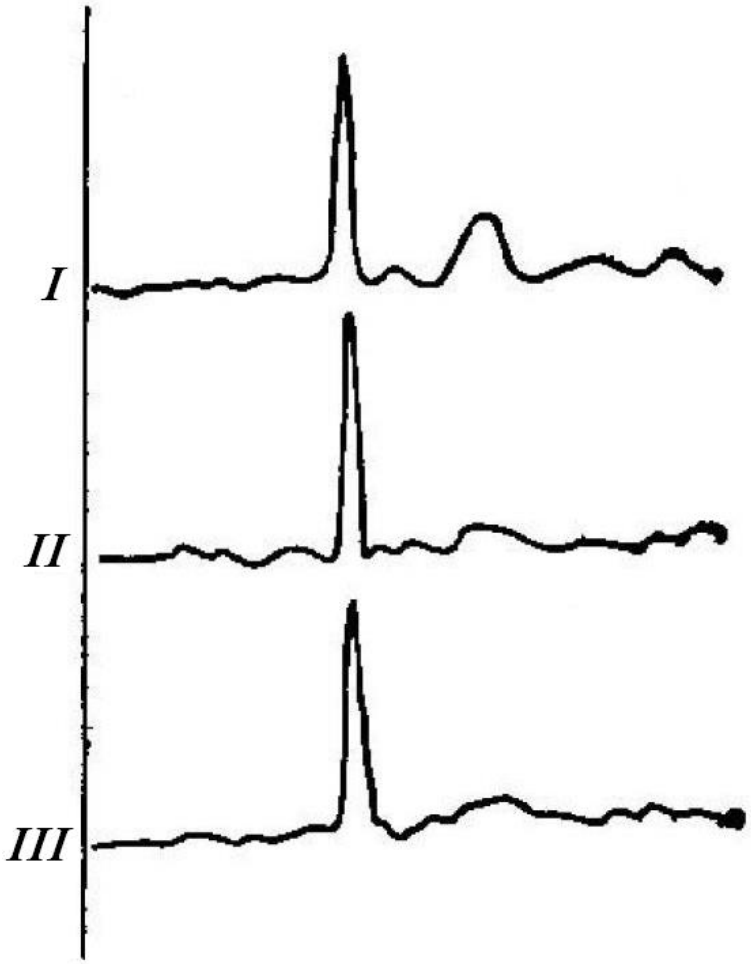
Относительная магнитная проницаемость μ тканей близка к 1, т.к. их основными компонентами являются вода, углеводы и липиды, которые являются диамагнетиками



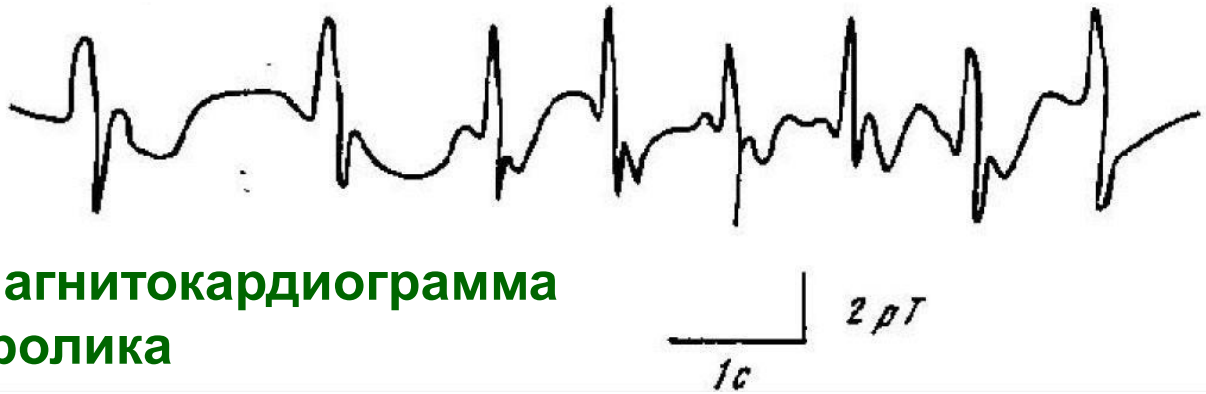
Эритроциты парамагнитны или диамагнитны, т.к. центральное положение в молекуле гемоглобина занимает железо, которое может находиться в разном состоянии

МРТ (магнито-резонансная томография)

1973 год Пол Лотербург.
2003 г. Нобелевская премия по физиологии и медицине Пол Лотербург и Питер Мэнсфилд

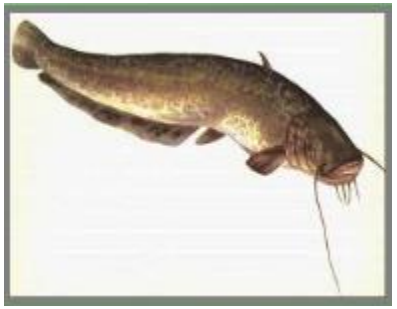


Магнитокардиограмма человека при нормальном внешнем магнитном поле Земли (II – 50 мкТл), при искусственном увеличении магнитного поля (I – 110 мкТл) и при его уменьшении (III – 0).



Магнитокардиограмма кролика

Ученые насчитывают около 50 видов живых существ – млекопитающих, птиц, земноводных пресмыкающихся, рыб и даже насекомых, которые могут пользоваться магнитным полем Земли для навигации



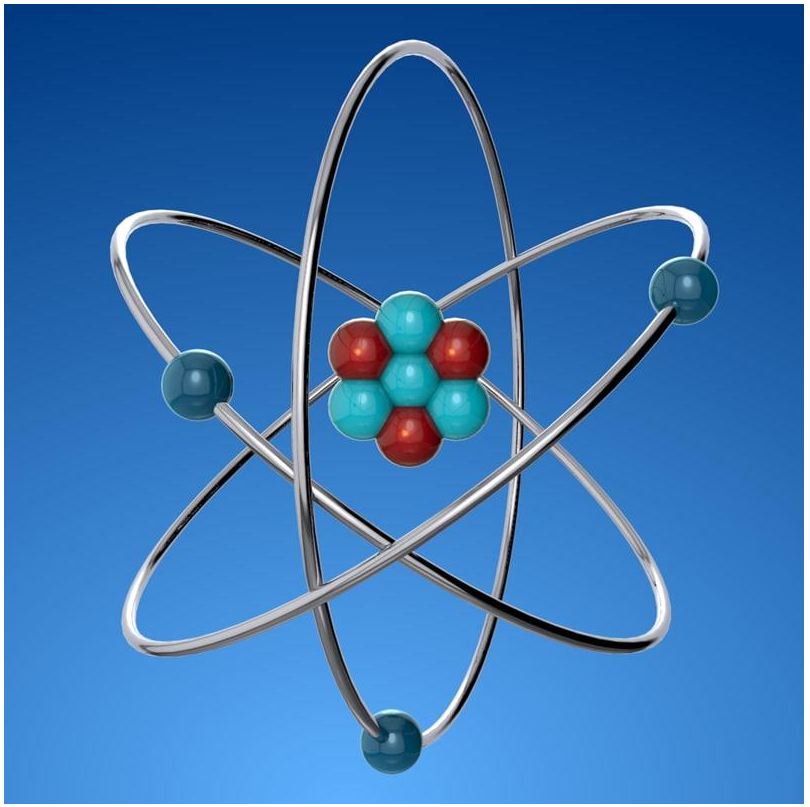
Когда внешнее магнитное поле ослаблено или, отсутствует, организм оказывается в критической ситуации.
В эксперименте группы российских ученых, мышей поместили в камеры, экранированные от магнитного поля Земли. Уже через сутки у них началось разложение тканей. Детеныши таких мышей рождались лысыми и росли больными.

Магнитный момент атома

Магнитный момент ядра

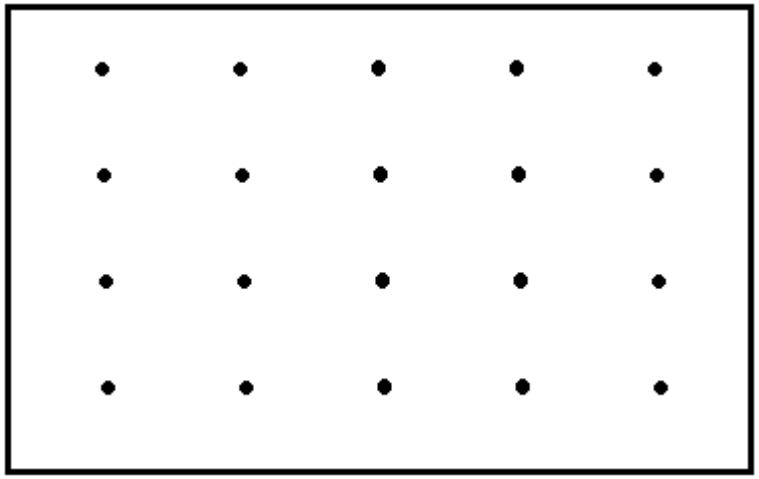
+

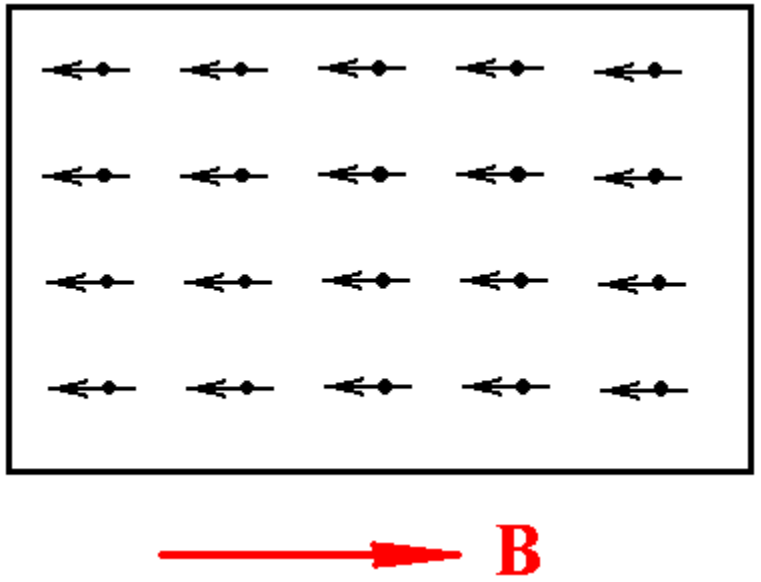
Орбитальный и спиновый момент электронов (основной вклад!)



Атом состоит из небольшого положительно заряженного ядра, в котором сосредоточена почти вся масса атома, вокруг которого движутся электроны, — подобно тому, как планеты движутся вокруг Солнца.

Диамагнетики



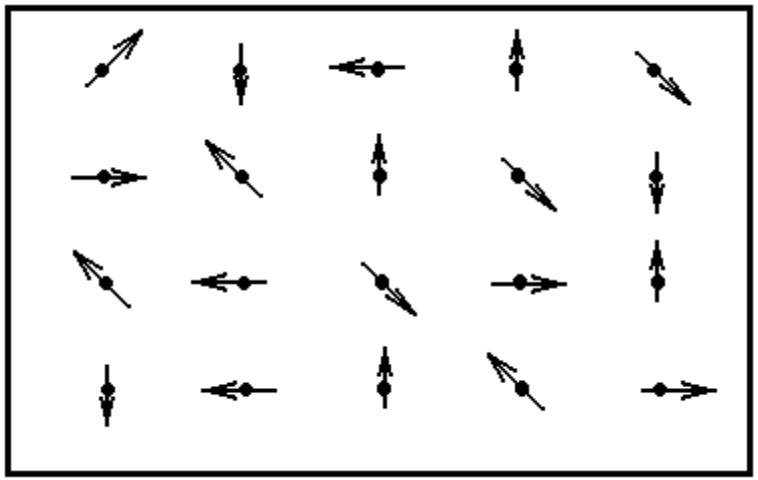


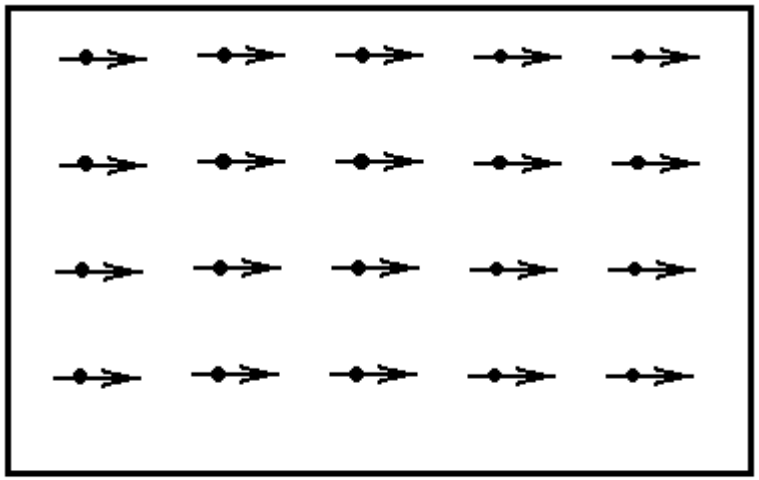
Магнитный момент атома =0

(графит, медь, золото, серебро, азот, водород, вода, поваренная соль …)

При попадании в магнитное поле у атомов возникают магнитные моменты, ориентированные против поля. Поэтому диамагнетики ослабляют внешнее магнитное поле.

Парамагнетики



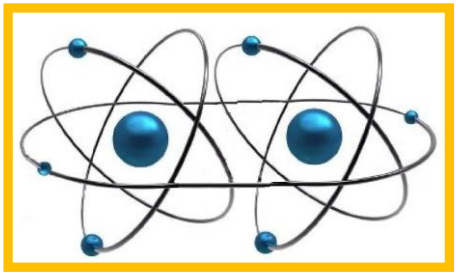


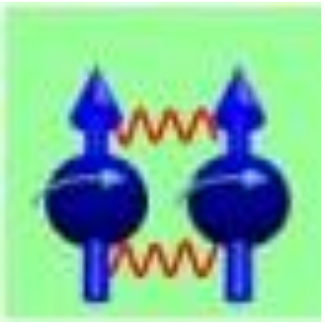
Магнитные моменты атомов ≠0, ориентированы хаотично

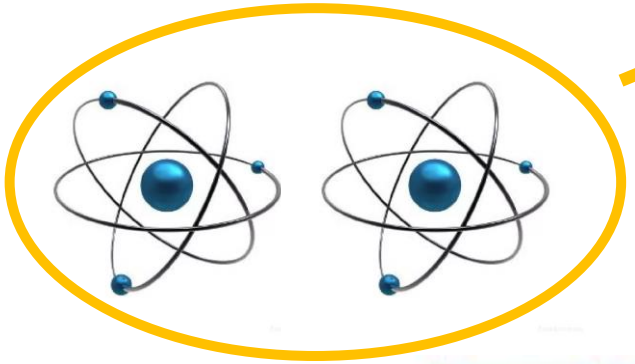
(кислород, алюминий…)

При попадании в магнитное поле магнитные моменты атомов ориентируются вдоль поля, усиливая его.

Ферромагнетики (железо, никель, кобальт…)

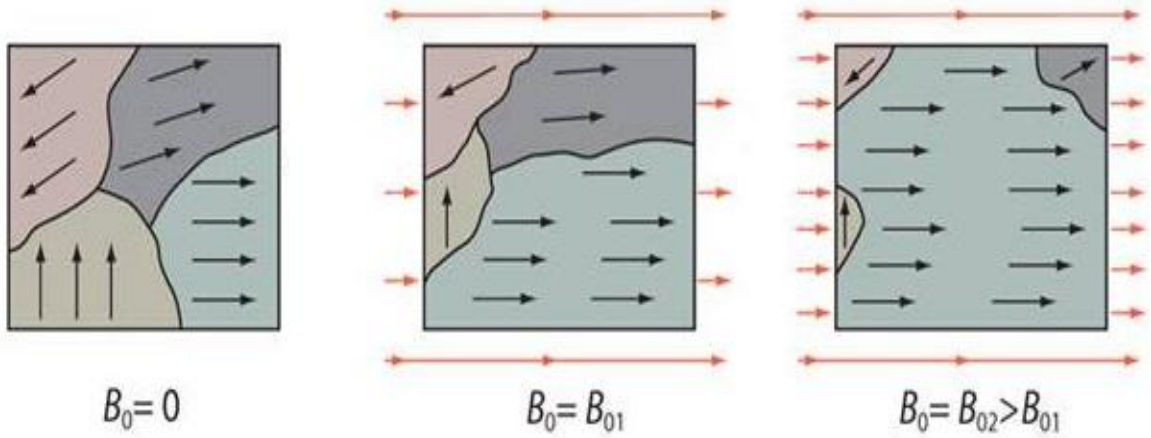


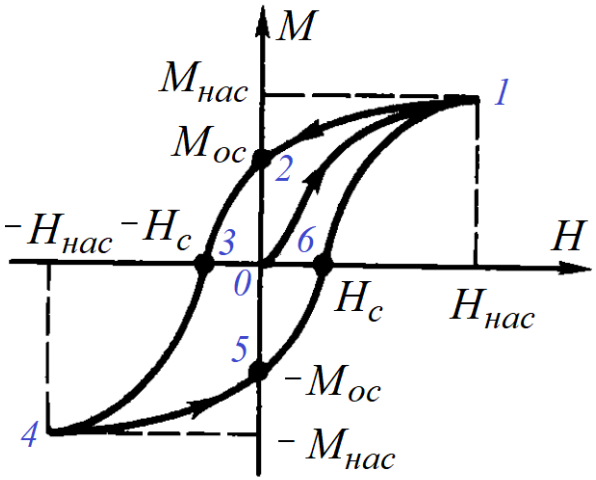




Сильно взаимодействующие атомы

Кривая намагничивания и петля гистерезиса



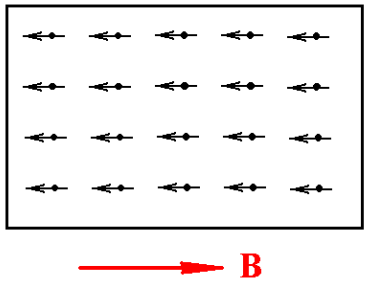


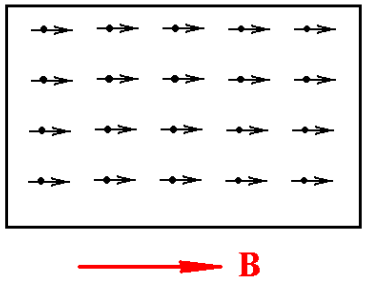
Магнитные моменты атомов ≠0, ориентированы упорядочено

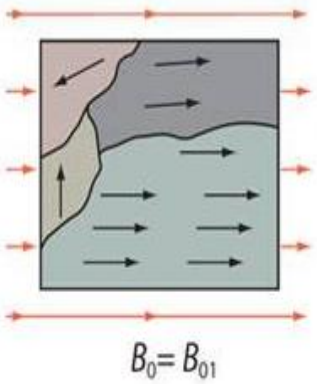
При попадании в магнитное поле магнитные моменты атомов ориентируются вдоль поля, многократно усиливая его.

Молярная магнитная восприимчивость (СГС) и магнитный момент атома

	Вещество	$\chi \cdot 10^{-6}$	Магнитной момент атома, $\mu_Б$
Диамагнетики	Гелий	– 2	0
	Водород	– 4	0
Парамагнетики	Литий	24,6	1
	Натрий	16,1	1/2
Ферромагнетики	Железо	$\sim 10^{10} - 10^{11}$	6
	Никель		5
	Кобальт		6



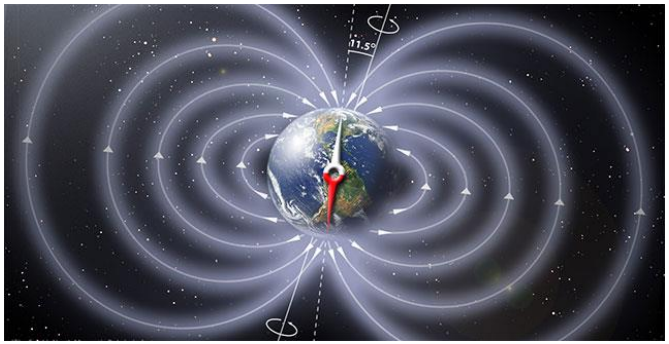
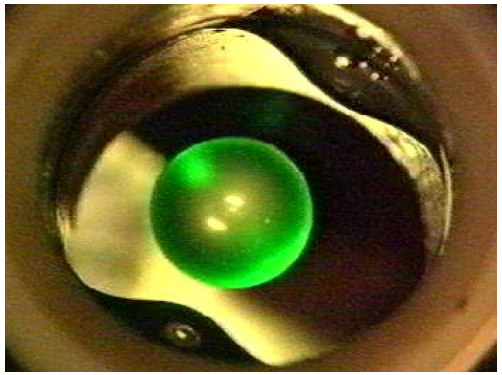
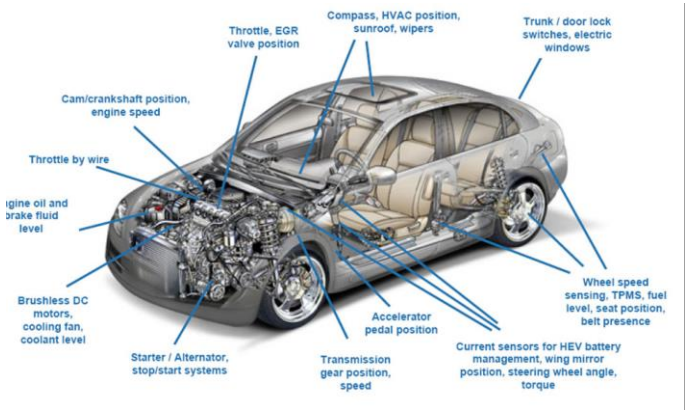




Ферромагнетизм – явление коллективное, квантовое, которое разрушается при нагревании!

Магнетизм: от атома до галактики

Шапаева Т.Б., физический факультет МГУ



- ✓ Магнитное поле нейтронных звезд
- ✓ Планета Земля
- ✓ Большой адронный коллайдер – самая крупная экспериментальная установка
- ✓ Транспорт на магнитной подушке
- ✓ Магнитная защита денег пластиковых карт
- ✓ Закон Фарадея – основа современной энергетики
- ✓ Человек как магнитный материал
- ✓ Природа магнетизма