

Wanted



Нарушил прямые указания начальства. Использовал лабораторное оборудование во время отпуска шефа для изучения расщепления спектральных линий магнитным полем.

В 1902 году получил Нобелевскую премию по физике за...



Эффект Зеемана

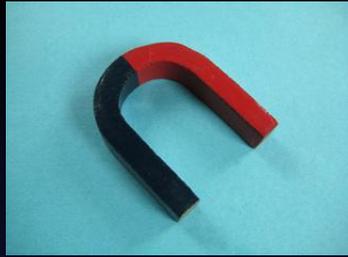
«В пламя между полюсами электромагнита я поместил волокно асбеста, пропитанное обычной солью.

Свет пламени изучался с помощью дифракционной решетки Роуланда.

При каждом замыкании цепи, обе D-линии натрия уширялись»

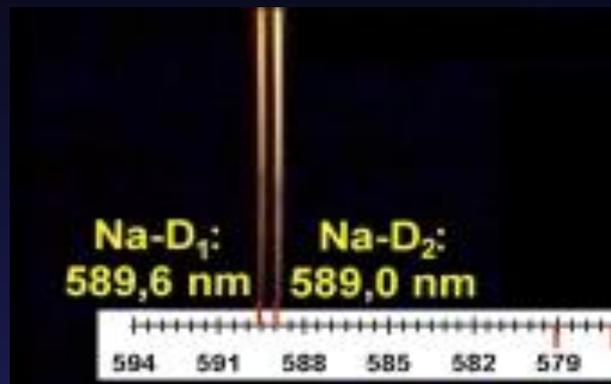
Петер Зееман, Nature, 1897

Какой из магнитов использовал Зееман?



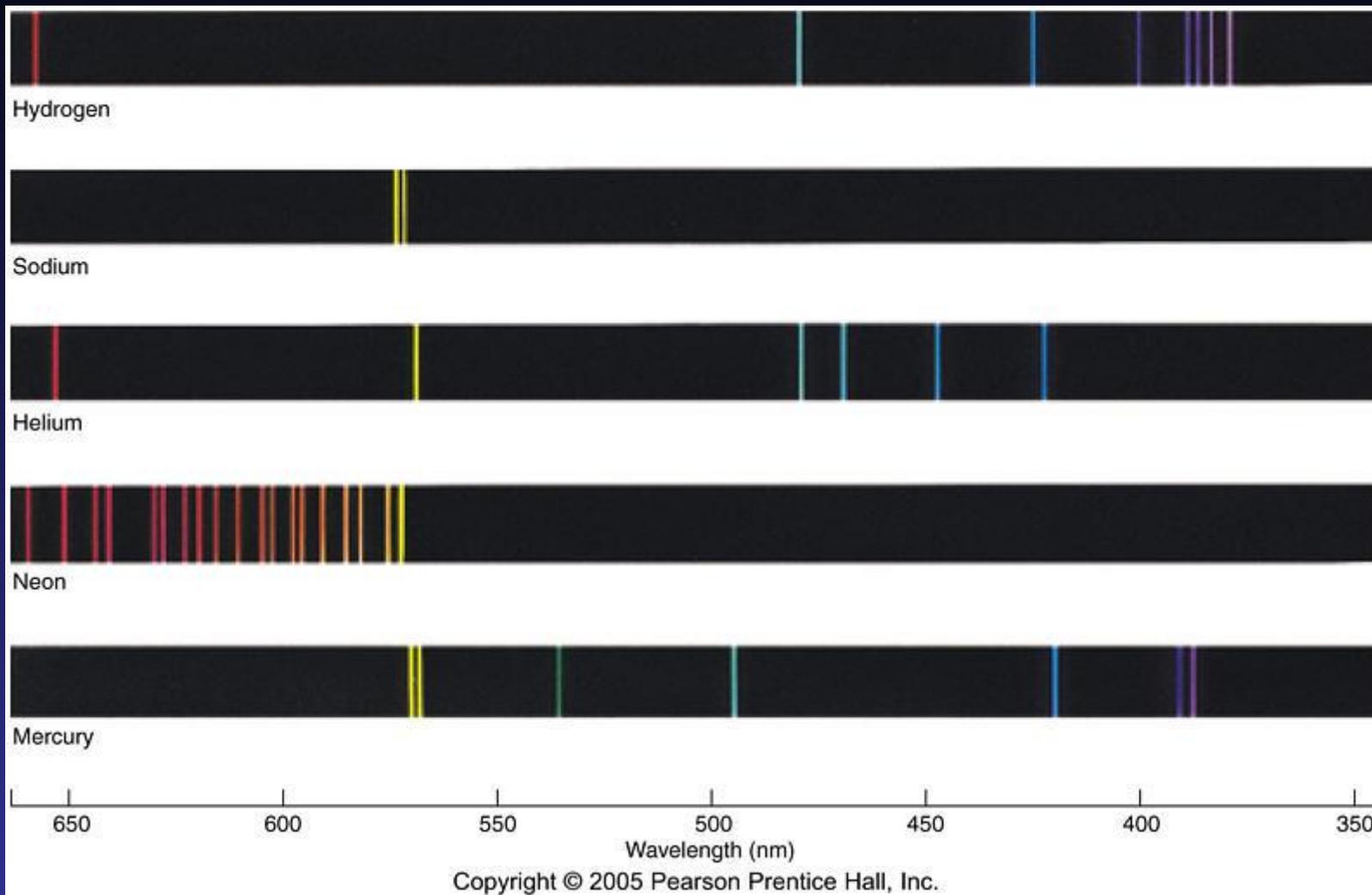
электромагнит из знаменитого эксперимента
хранится в музее Лейдена ([here](#))

D-линии натрия

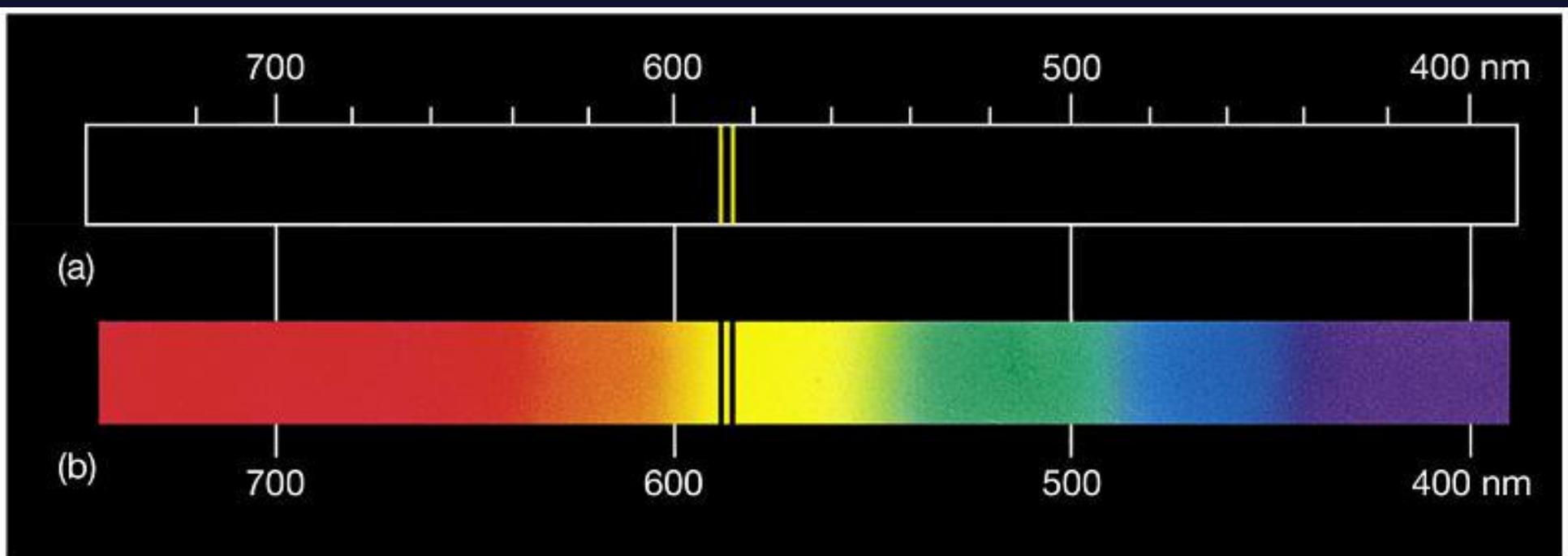


В спектре натрия доминирует яркий дублет, т.н. D-линии с длинами волн 588.9950 и 589.5924 нанометров. Линия 589.0 нм в два раза интенсивнее линии 589.6 нм. В видимом диапазоне 400-700 нм следующая по интенсивности линия на 568.8205 нм дает только 0.7% по интенсивности в сравнении с линией D₁. Все остальные линии в сотни раз слабее, практически весь свет от светящегося натрия – это свет прославленных D-линий.

Укажите спектр натрия



Где спектр поглощения натрия и где спектр испускания натрия?



Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

Реконструкция экспе

О дрожи. В 60-ые годы физик Дикке предположил, что гравитационная постоянная ИЗМЕНЯЕТСЯ. Поставил эксперимент – ИЗМЕНЯЕТСЯ! Изменение постоянной совпадало с расписанием поездов на близлежащей ветке...



Эта установка, конечно, реконструкция...Но!

- чтобы капризная дифракционная решетка Роуланда не дрожала, прототип располагался на большом монолите
- магнит справа использовался Зееманом, но позже, после переезда в Амстердам
- Хотя у них там на празднике в 2002 Хендрик Лоренц (1858-1928) разгуливал и на вопросы отвечал, чему удивляться?

эфффект Зеемана

- История
- Объяснение Лоренца
- Применение
- Установка «эфффект Зеемана»
- Вопросы и литература

□ Предчувствие эффекта

- В 1862 году Фарадей проводил свой последний эксперимент. Он искал изменения в спектре натрия при появлении магнитного поля.
- Эффекта Фарадей не обнаружил и результаты неудачного эксперимента не опубликовал (его лабораторные записи позднее опубликованы Максвеллом).
- И первые эксперименты Зеемана в 1891 году были НЕУДАЧНЫМИ. Эффекта не было!
- Но когда Зееман узнал о неудаче Фарадея, он подумал «Если и Фарадей предполагал возможность такой взаимосвязи...» и «засучил рукава»

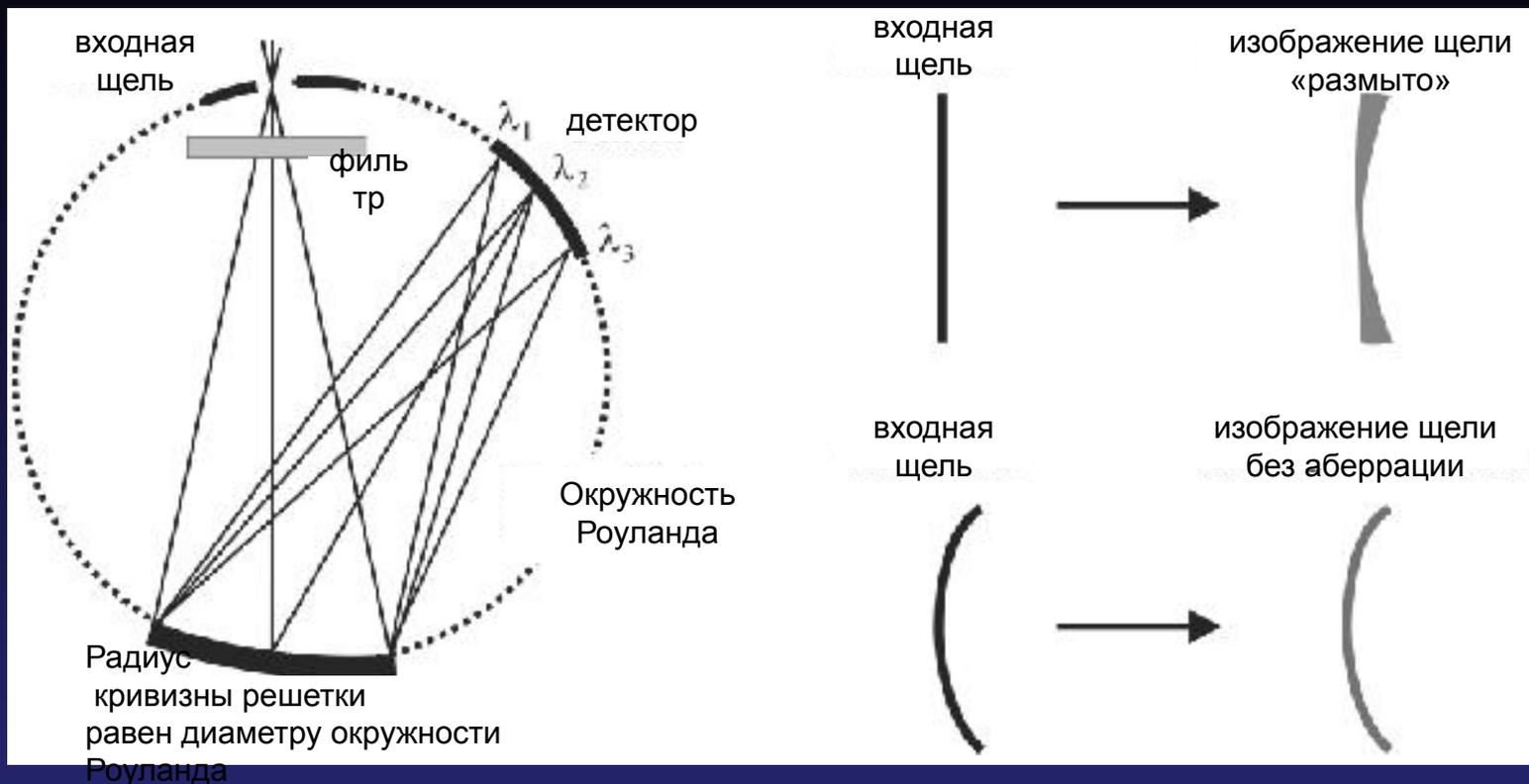
1891-1896 «Упорство и труд...»

- Изучал спектр железа в магнитном поле – влияния магнитного поля не отмечено
- Чтобы линии натрия в пламени были ярче подпитывал пламя горелки кислородом и водородом
- Одолжил в соседней лаборатории чувствительный гальванометр (для более точного расчета магнитного поля)
- Рассматривал спектр с линзой Френеля
- Использовал замечательную дифракционную решетку Роуланда

Вопросы (возможно понадобится читать учебник «вперед»)

- С помощью каких приспособлений можно пучок света разложить по длинам волн? Какое из них использовал Ньютон в 1702 году?
- С помощью каких приспособлений можно «собрать» параллельно летящий пучок света?
- Подумайте, можно ли создать ОДНО такое приспособление, которое ОДНОВРЕМЕННО разлагает по длинам волн пучок и собирает разложенные волны?

Решетка Роуланда!



- Такой прибор создал Генри Роуланд в 1882 году. Его решетка была сделана на вогнутой поверхности, она выполняла функции и дисперсии и фокусировки! (☺ Не верится, что Роуланд был американцем – он продавал свои решетки институтам по себестоимости) Очень важна для эксперимента Зеемана была форма щели! Для механика его лаборатории изготовление этой щели стало профессиональным экзаменом.

Эффект Зеемана

- «В пламя между полюсами электромагнита я поместил волокно асбеста, пропитанное обычной солью.
- Свет пламени изучался с помощью дифракционной решетки Роуланда.
- При каждом замыкании цепи, обе D-линии натрия уширялись»

Питер Зееман, Nature, 1897

Доверяй, но проверяй...

- Сразу после получения эффекта, Зеeman начал ПРОВЕРЯТЬ не влияет ли магнитное поле на само пламя. Помещал горящий натрий в трубку, вращал ее во время измерений (чтобы исключить температурные вариации).
- И оставался главный вопрос

ПОЧЕМУ ОНИ УШИРЯЛИСЬ?

□ Объяснение

Чем знаменит
Камерлинг-
Оннес?
(подсказка «ртуть»)

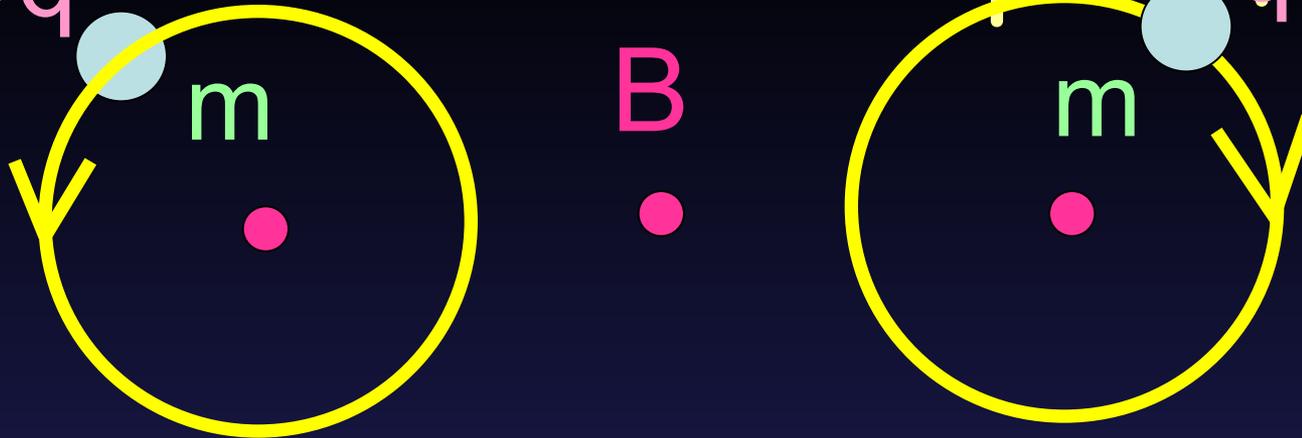
- Лоренц впервые услышал об опытах Зеемана в субботу 31 октября 1896 года на заседании Королевской Нидерландской Академии Наук в Амстердаме, где докладывал о результатах эксперимента шеф Зеемана – Камерлинг-Оннес.
- В понедельник Лоренц встретился с Зееманом и предложил свое объяснение наблюдаемого эффекта.

§Объяснение Лоренца

(повторите силу Лоренца)

- В атоме осциллируют заряженные **частицы** (Лоренц называл их ионами -1896 год все-таки, простительно)
- Если разложить эти осцилляции на две компоненты – параллельную полю и перпендикулярную полю, то на одну компоненту магнитное поле влиять не будет (на какую?)
- А со второй компонентой дело сложнее, крутится-то можно по часовой стрелке и против часовой.

Объяснение Лоренца



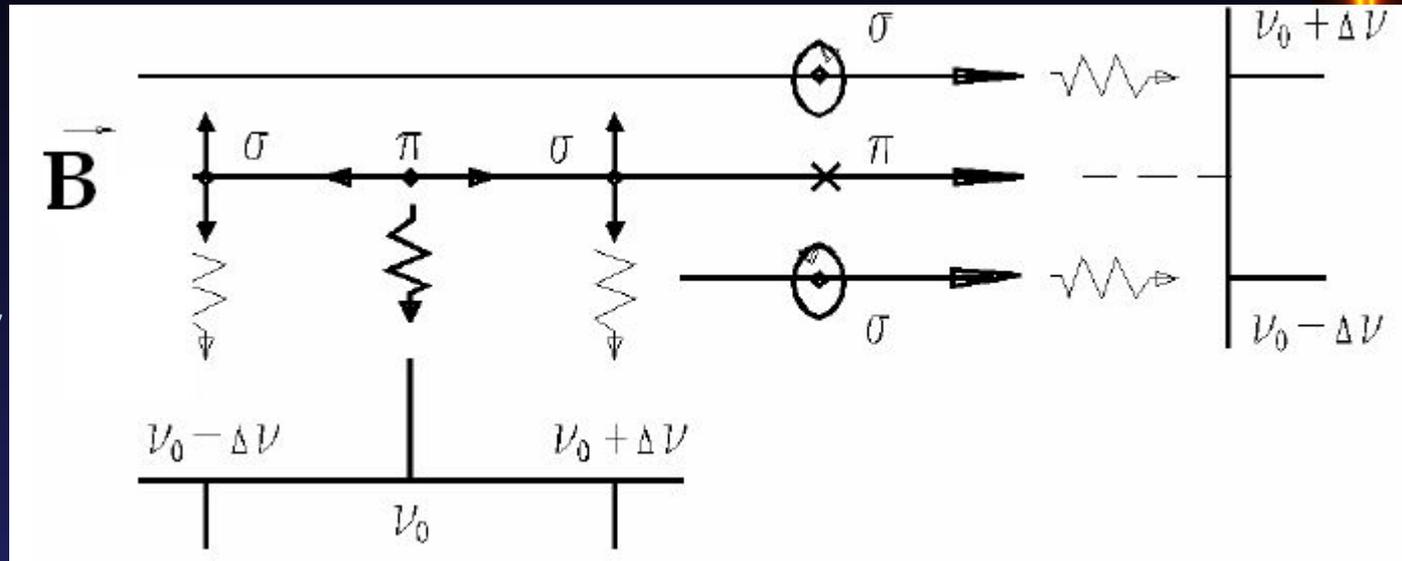
- Лоренц объяснял все понятно (хороший был преподаватель) – он рисовал на доске. Итак, крутится-то можно по часовой стрелке и против часовой. Магнитное поле направлено на нас. Если до появления магнитного поля частицы осциллировали с частотой ν_0 , то значит, крутились со скоростью $2\pi\nu_0 R$. Их «закручивала» какая-то сила F . По 2 закону Ньютона: $am=F$
- Сила Лоренца со стороны магнитного поля будет $F_{\text{л}}=qvB=2\pi\nu_0 RqV$
- Появление магнитного поля вызовет изменение частоты осцилляций $\Delta\nu$, и 2 закон запишется в виде:

$$m \cdot 4\pi^2(\nu_0 + \Delta\nu)^2 R = F + F_{\text{л}} = m \cdot 4\pi^2\nu_0^2 R + q \cdot 2\pi\nu_0 R \cdot V$$

- Нельзя лишиться вас удовольствия получить $\Delta\nu$ (поскольку $\Delta\nu$ мало, то слагаемое с $\Delta\nu^2$ можно бесстрастно отбросить)

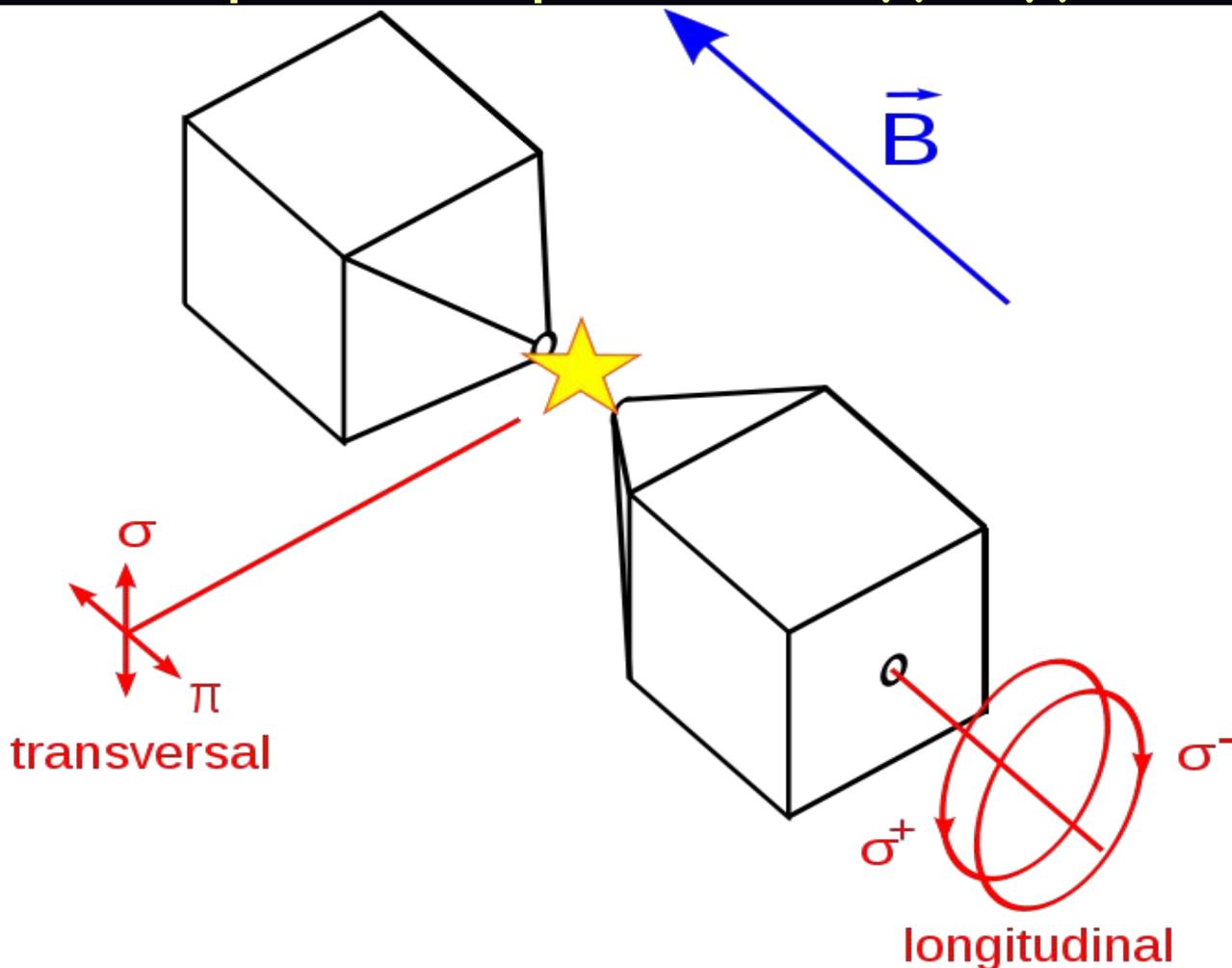
Предсказание Лоренца

Не пугайтесь
значков π и σ



- Поскольку осцилляции параллельные полю не меняются, а осцилляции перпендикулярные полю, изменяют частоту на $+\Delta\nu$ и $-\Delta\nu$, то в магнитном поле одиночная линия будет расщепляться на 3 компоненты – несмещенную и две смещенные. Смещенные компоненты должны быть поляризованы в разных направлениях!
- Если разрешения спектрального прибора не хватает, чтобы увидеть все три линии отдельно, то все же можно попробовать сравнить поляризацию краешков утолщенной наблюдаемой линии

Но смотреть на краешки надо вдоль поля!



- Технический вопрос: как смотреть вдоль поля, если магнит непрозрачный?

Они поляризованы! Лоренц прав!

- 10 ноября 1896 Зееман изучает поляризацию краешков. Отрицательный результат.
- 20 ноября Зееман осознал свою ошибку – он смотрел перпендикулярно магнитному полю!
- Он берет магнит с перфорацией (с дыркой) и видит предсказанный эффект!
- Он рассчитывает q/m

$$\frac{q}{m} \approx 1,6 \cdot 10^{11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$$

• **Вопрос к вам: какая частица осциллирует в атоме?**

Когда и кем эта частица была официально открыта?

• Зееман считал в системе СГСМ (масса в граммах, заряд 1СГСМ=10 Кл). Какое значение q/m он получил на самом деле?

Нобелевская премия по физике 1902



**Hendrik Antoon
Lorentz**



Pieter Zeeman

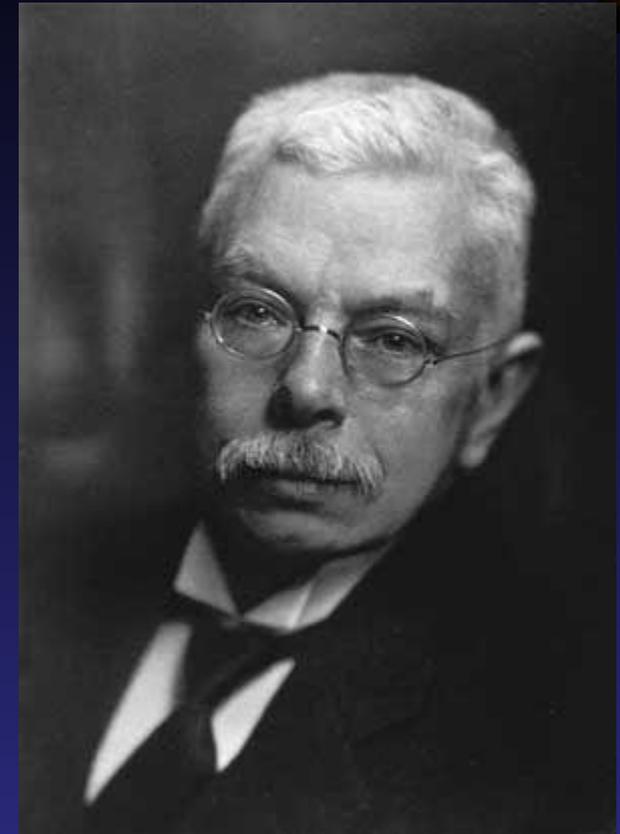
за исследования влияния магнетизма на излучение

Применение эффекта в астрономии

- Уже во втором своем сообщении Зееман предложил использовать эффект для оценки магнитного поля Солнца. В письме ему (1908) астроном Гейл подтвердил и наличие расщепления и поляризации линий излучения Солнца.
- Общее магнитное поле Солнца как звезды составляет в среднем около 1 Гс ($\text{гаусс} = 10^{-4} \text{ Тл}$), однако в солнечных пятнах величина поля значительно выше и достигает нескольких тысяч Гс.
- При измерениях магнитных полей звёзд зеемановское расщепление спектральных линий обычно наблюдается в поглощении. Продольный компонент магнитного поля измерен у сотен звёзд различных спектральных классов. Выяснено, что индукция магнитного поля на поверхности т.н. магнитных звёзд достигает нескольких тысяч Гс. Очень сильные магн. поля, превосходящие 10 Гс, обнаружены по эффекту Зеемана у нескольких вырожденных звёзд - белых карликов.
- Магнитные поля Галактики можно измерить по зеемановскому расщеплению радиолинии водорода 21 см. Среднее крупномасштабное поле Галактики имеет величину 2 мкГс, а в облаках газа магнитное поле в 5-10 раз больше. Таким путём определяется только продольный (вдоль луча зрения) компонент магнитного поля.

«Работа есть работа, работа есть всегда, хватило б только пота...»

- Его дальнейшая работа включала крайне трудные и точные измерения скорости света в движущихся материальных прозрачных средах, таких, как стекло и кварц (другие ученые делали подобные измерения в движущейся воде). Он обнаружил, что изменения зависят не только от скорости и показателя преломления движущейся среды, но и от частоты света .
- Зеeman разработал также методику комбинированных магнитно-электрических отклонений электрически заряженных атомов, чтобы разделять их в соответствии с их массами, и открыл с Гиером несколько новых изотопов (Ar-38, Ni-64 и др.).
- Он доказал равенство инертной и тяжелой масс с точностью 10^{-7} .
- В 1908 г. Зеeman был назначен директором Физического института при Амстердамском университете. Подчиняясь установившемуся обычаю, он вышел в отставку и покинул Амстердамский университет в 1935 г., в возрасте семидесяти лет; восемь лет спустя он умер.



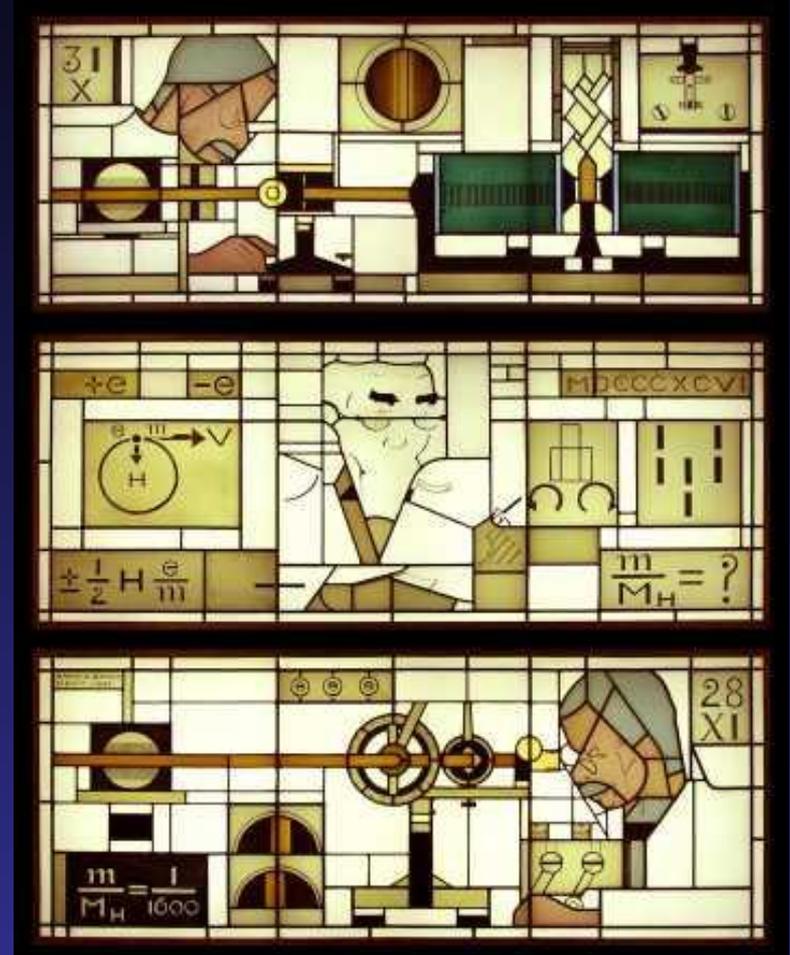
1865-1943



Гости в лаборатории Зеемана (около 1920).
Небритый - Эренфест

Разгадай!

- Это «окна Зеемана», установленные в 1922 году на стене в лаборатории №1, где Зееман провел свой исторический эксперимент
- Попробуй объяснить, что изображено на каждом из трех фрагментов панно





Вы думаете, что Зеемана и Лоренца сейчас нет? Зря!
Они на Луне.

Кратер Зееман

Coordinates 75.2° S, 134.8° W

Diameter 184 км

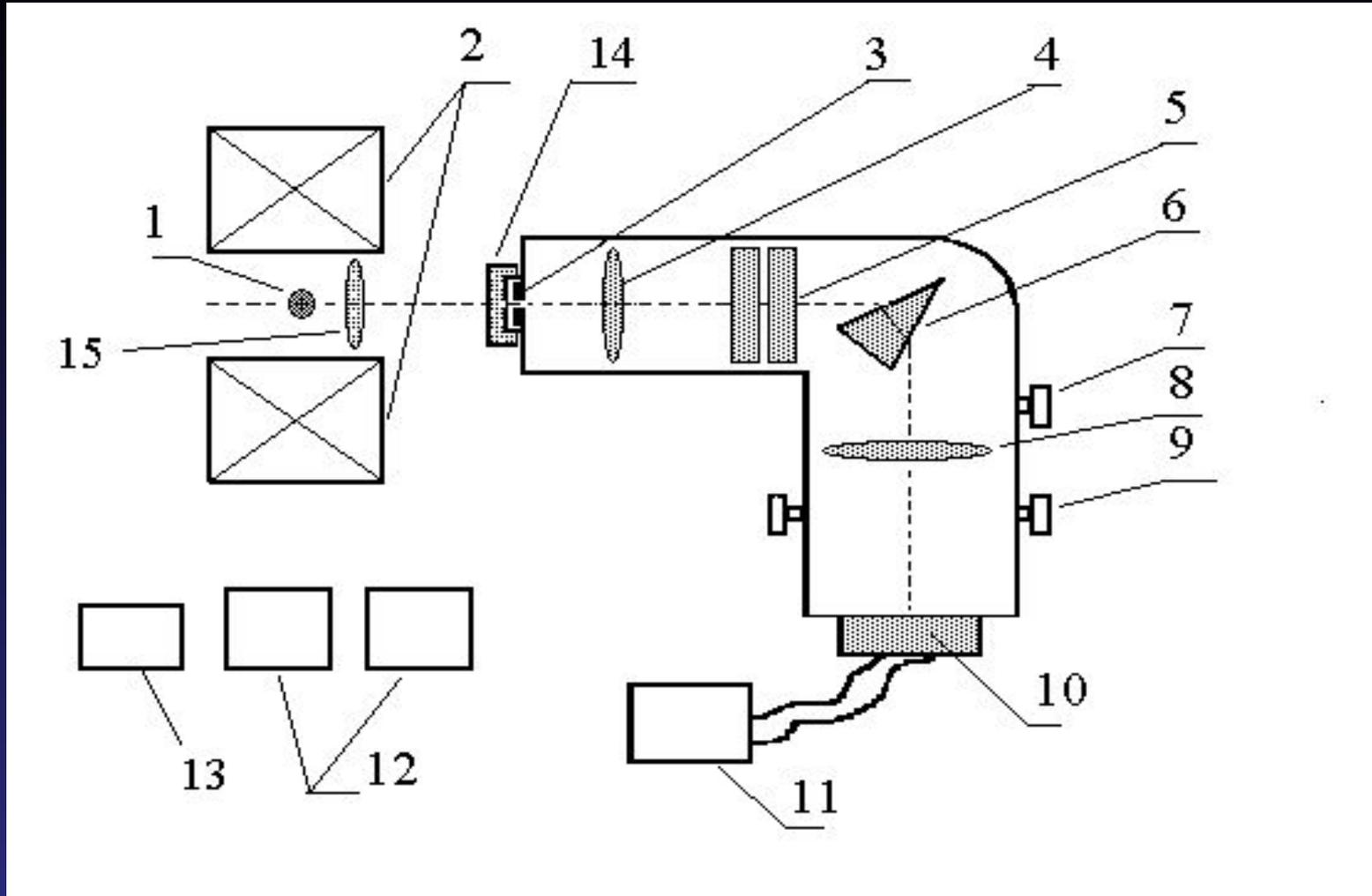
Кратер Лоренц

Координаты 34.8° с. ш., 97.5° з. д.

Диаметр 352 км

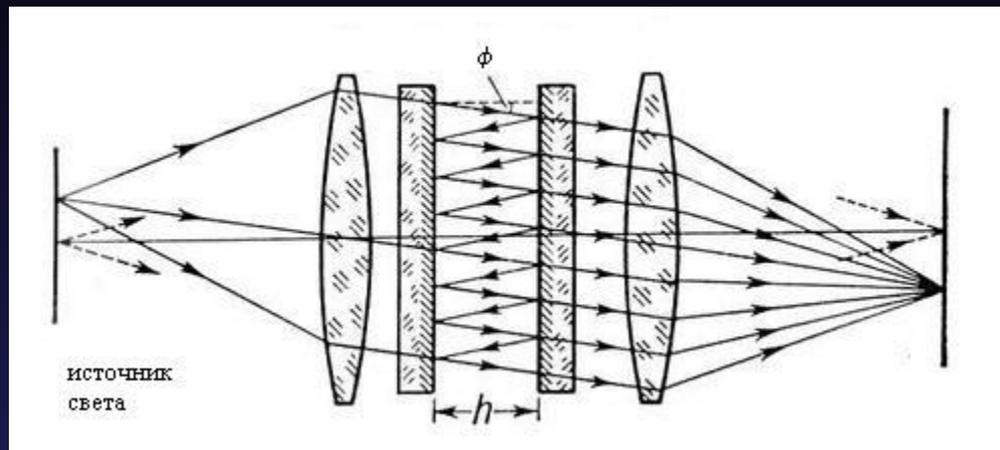
Запоминайте координаты.
Охота начинается!

схема нашей установки (😊 для полета на Луну)



- 1 - спектральная лампа, 2 - электромагнит, 3 - входная щель, 4 - объектив коллиматора, 5 - эталон Фабри-Перо, 6 - призма спектрографа, 7 - барабан поворота призм, 8 - объектив, 9 - ручка фокусировки, 10 - линейка ПЗС, 11 - компьютер, 12 - выпрямители, 13 - блок питания лампы, 14 - поляризатор, 15 - конденсор

Интерферометр Фабри-Перо



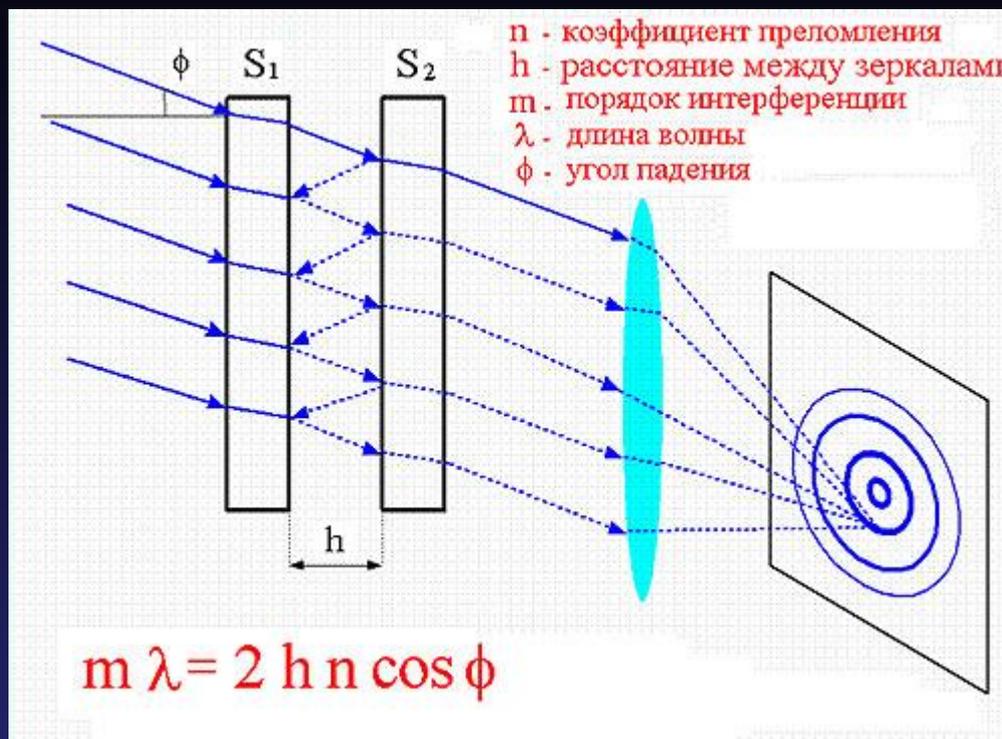
Интерферометр Фабри-Перо – (создан 2 французами Фабри и ...догадайтесь в 1894 году) спектральный прибор высокой разрешающей силы для измерения малых отличий длин волн в спектрах оптического диапазона (☺ зато у него угловая апертура хилая 10^{-5} - 10^{-6} ср)

Его важным отличием от обычных дифракционных спектрографов является отсутствие элементов, разлагающих свет в спектр и отсутствие щели

$$\left(\frac{\lambda}{d\lambda} \approx 10^6 \right. \\ \left. \text{и более!} \right)$$

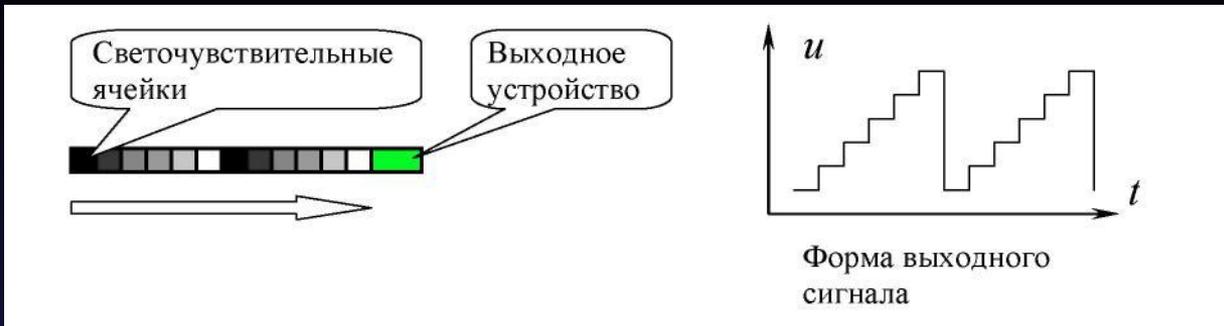
что это за
единица
измерения
ср?

Устройство эталона Фабри-Перо



- Воздушный промежуток толщиной h ограничен стеклянными пластинами, несущими зеркала S_1 и S_2 . Зеркала полупрозрачны, так что часть света отражается от них, а часть проходит без отражения. В отличие от «классического» спектрографа, эталон Фабри-Перо не требует узкой щели, что позволяет более полно использовать световой поток от исследуемых источников. Этот прибор не разлагает свет на спектр; он только пропускает (или не пропускает) свет определённых длин волн, значения которых зависят от угла падения света на его пластины. Эталон работает на принципе многолучевой интерференции, которая происходит в воздушном промежутке между двумя зеркальными полупрозрачными пластинками.

ПЗС - линейка



- Датчики изображения на приборах с зарядовой связью (ПЗС) состоят из отдельных ячеек, в которых под действием падающего на них света образуется электрический заряд.
- После экспонирования заряд каждой ячейки преобразуется в электрическое напряжение. (Для Вас ПЗС-линейка – вчерашний день, в цифровых фотоаппаратах и мобильных телефонах у Вас стоят ПЗС-матрицы – двумерные линейки)
- Мы используем ПЗС-линейку, сделанную в Троицке. Размер каждого элемента 7 микрон ($7 \cdot 10^{-4}$ см)
- В англоязычной литературе ПЗС называется CCD – Charge Coupled Device.

Электромагнит (103 кг, сибиряк – из Томска)
в зазоре – цинковая лампа

Что это?



Что это за
черная
штучка?

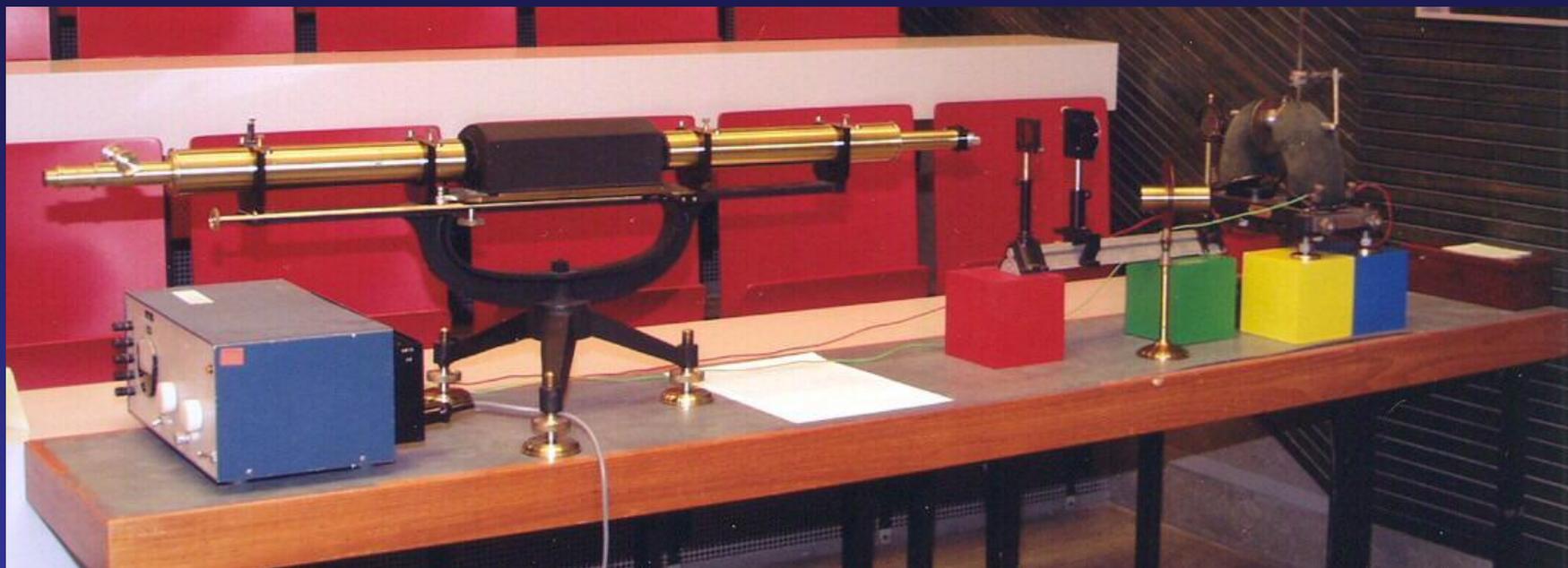
Куда идет
этот кабель?

к плате в системном блоке ПК

ПЗС-линейка

Вопрос

- В чем отличия данной установки от экспериментальной установки Зеемана 1896 года (😊 а-ля найди 10 различий)



ИСПОЛЬЗОВАНЫ:

1. Сайт Нобелевского комитета

http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1902/index.html

2. Белавин В.А., Красильников С.С., Савченко И.А., Смирнов А.В. «Атом в магнитном поле (эффект Зеемана) лабораторная работа №15»

<http://www.affp.mics.msu.su/prak/>

3. Биография <http://n-t.ru/nl/fz/zeeman.htm>

4. R. Calderwood “CCD fundamentals”

www.cs.ucr.edu/cs120b/cs120b_05win/lectures/mar02-2005.pdf

5. Oscari Miettinen «Zeeman effect – studying magnetic fields in star-forming regions»

6. А.В. Засов «Лабораторное исследование эталона Фабри-Перо»

http://heritage.sai.msu.ru/ucheb/Zasov/zadacha_10.htm

7. http://www.krugosvet.ru/enc/nauka_i_tehnika/fizika/ZEEMANA_EFFEKT.html

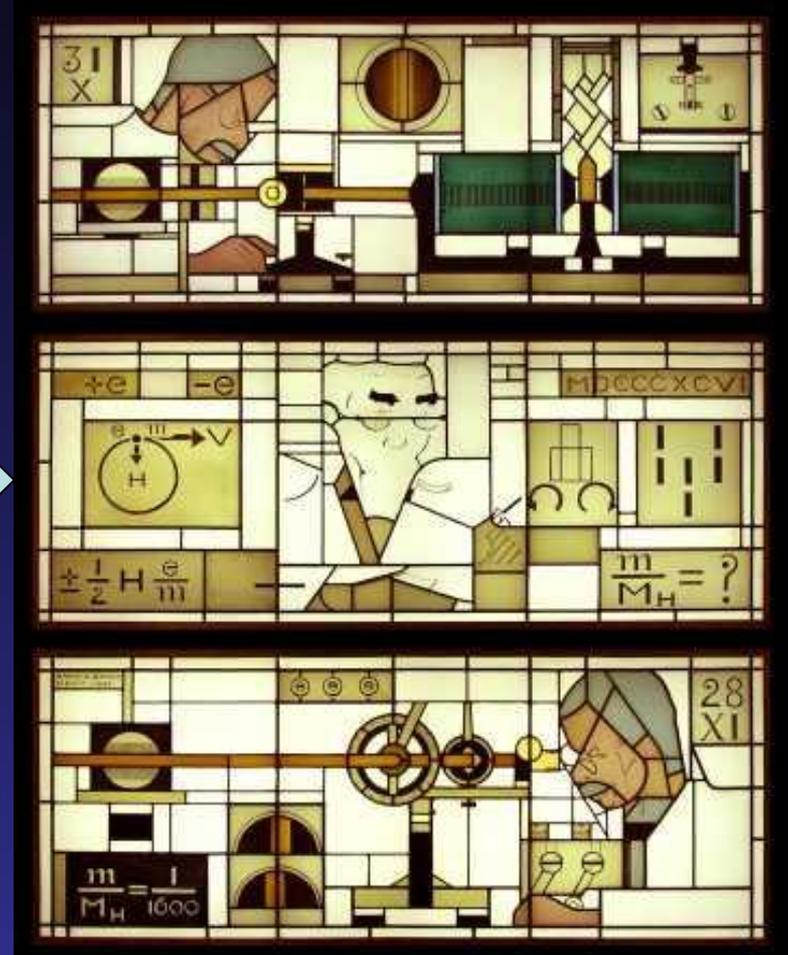
8. <http://www.astronet.ru/db/msg/1188766>

«окна Зеемана»

Зееман наблюдает уширение (расщепление) линий натрия при включении магнитного поля

Лоренц объясняет эффект Зеемана

Зееман изучает поляризацию краев линий натрия, предсказанную Лоренцом

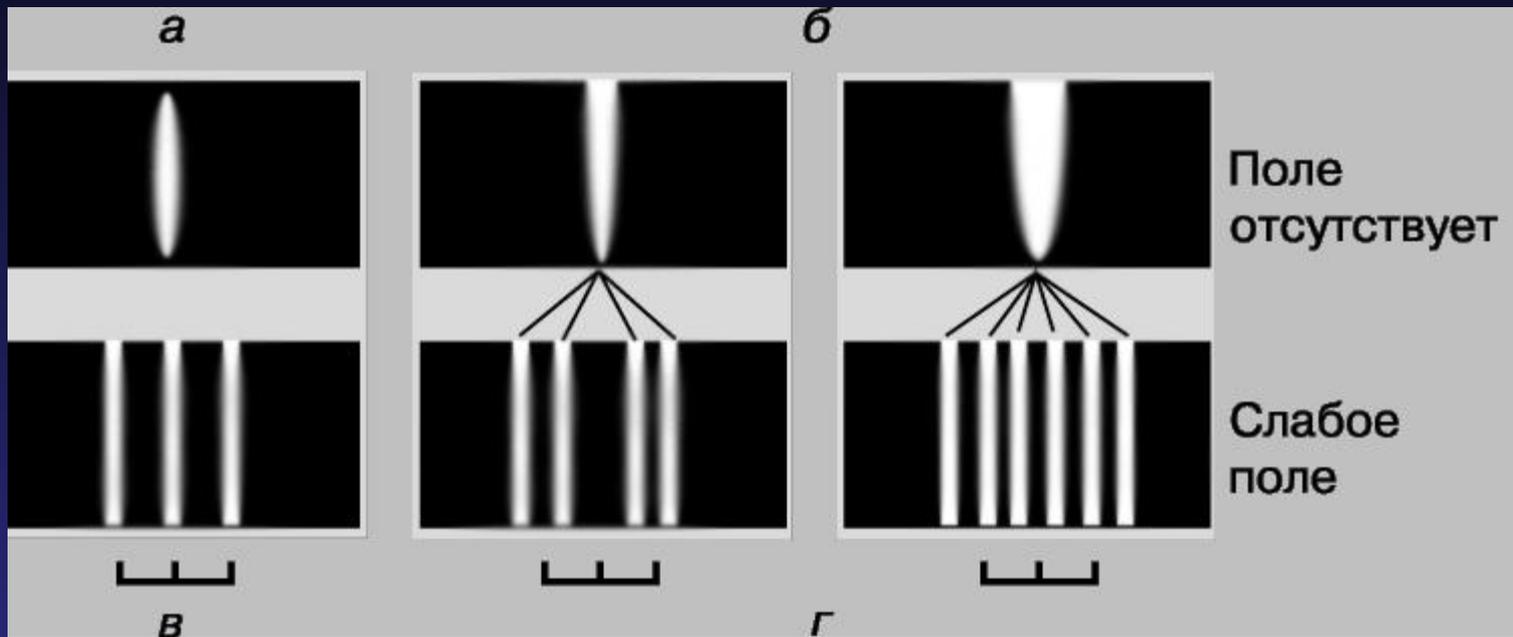


Рассчитывая в системе СГСМ Зееман получил

$$\frac{q}{m} \approx 10^7$$

Если Вы думаете, что это конец...

- Уже через несколько месяцев после открытия эффекта Зеемана оказалось, что не всегда расщепление идет на три компоненты. Посмотрите сами:



вид перпендикулярно направлению магнитного поля. а – синглет цинка; б – главный дублет натрия; в – нормальный триплет; г – аномальное расщепление.

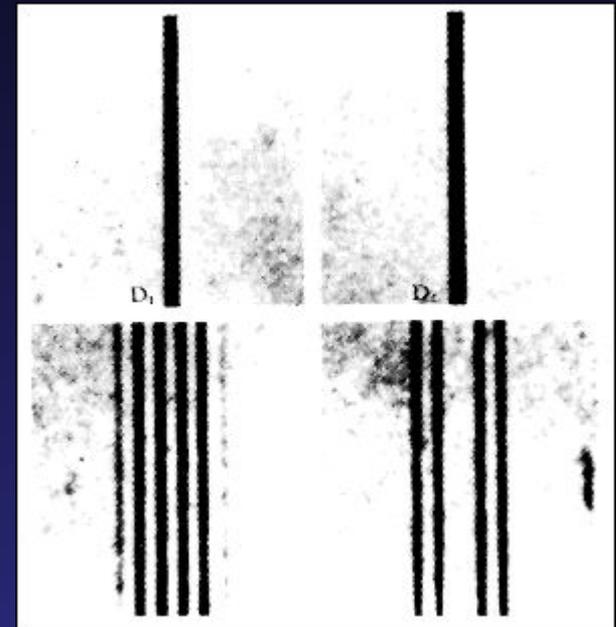
«Нет, ребята, все не так, все не так как надо...»

- 1898 Т.Престон сообщил о том, что некоторые спектральные линии цинка и кадмия расщепляются на четыре компонента, а вскоре А.Корню обнаружил, что из двух *D*-линий натрия, с которыми экспериментировали Фарадей и Зееман, одна расщепляется на четыре, а другая – на шесть компонент. В 1911 К.Рунге и Ф.Пашен установили, что интенсивная зеленая линия в спектре ртути расщепляется на 11 компонент. Сначала столь сильное расщепление было воспринято как «аномальный эффект Зеемана». Но вскоре стало ясно, что «нормальный эффект Зеемана» с расщеплением на три компонента сам представляет собой исключение, и возникла необходимость в дальнейшем уточнении теории Лоренца.
- Паули вспоминал: «Коллега встретил меня, бесцельно блуждающего по прекрасным улицам Копенгагена, и дружески сказал: «Ты выглядишь очень несчастным», и я злобно огрызнулся: «Кто выглядит счастливым, когда думает об аномальном эффекте Зеемана?»

Фотография Зеемана расщепления D-линий натрия

Магнитного поля нет

Магнитное поле есть



- Объяснения Лоренца явно недостаточно...
- Надо разбираться с квантовой механикой.

Фактор Ланде

$$g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$$

Только в 1923 А.Ланде из Тюбингена нашел (проанализировав экспериментальные данные для большого числа частных случаев) сложную общую формулу, которая позволяла точно рассчитать эффект Зеемана для любой спектральной линии.

Причина, по которой для описания простых явлений, возникающих при движении атомного электрона в магнитном поле, необходима столь сложная формула, стала ясна после открытия, сделанного в 1925 Гаудсмитом и Уленбеком.

Они обнаружили, что электрон ведет себя наподобие волчка, вращаясь вокруг собственной оси. Электродинамика показывает, что такой электрон должен вести себя как маленький магнит и что именно двойное взаимодействие с магнитным полем орбитального момента в атоме и спина приводит к такой сложной динамической картине.



Паули и Бор
смотрят на
волчок



Гейзенберг - Нобелевский лауреат 1932 года

$$g = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$$

- В 1926 В.Гейзенберг и П.Иордан, пользуясь методами квантовой механики, проанализировали эффект Зеемана и вывели формулу Ланде из основных принципов теории. Это исчерпывающее объяснение эффекта Зеемана явилось одним из первых триумфов новой атомной теории.
- Попробуйте разобраться с J, S и L, к примеру тут: http://www.krugosvet.ru/enc/nauka_i_tehnika/fizika/SPEKTROSKOPIYA.html
- Если будет тяжело, посмотрите http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1932/heisenberg-docu.html как смеется Гейзенберг
- Если не разберетесь, скачайте <http://rutracker.org/forum/viewtopic.php?t=756306> , убедитесь, что никто этого не понимает (☺ То, что Гордон с сигаретой ничего не понимает, а профессор с мехмата МГУ без сигареты и что-то понимает – это антиреклама курения)



«Ты - электрон. Почувствуй себя электроном! Это потом мы выведем тебя из этого состояния. Если захочешь...»
по мотивам стэма Питера «Колобок»

Для отчаявшихся

Есть такой метод в психологии и ТРИЗ (теории решения изобретательских задач) – интроекция. Попробуй представить себя электроном! Отличий не так уж много. Вот ты, когда говоришь, что учишься в данной школе, в поясняешь «в 10б классе». А электрон в атоме натрия конкретизировал бы «на 3s уровне». Ты, нагрузившись знаниями,ходишь до последнего класса, и выходишь на нулевой уровень, и электрон, перекусив энергичным фотоном, может выбраться из уютной потенциальной ямы. При нулевой энергии он уже может петь «я свободен»