Сѣверныя сіянія и магнитныя бури.

Академика А. Н. Крылова.

(Рѣчь предсѣдателя въ январскомъ 1917 года общемъ собраніи членовъ Русск. Физ.-Хим. О-ва).

§ **1**. Сѣверныя сіянія издавна привлекали взоры наблюдателей, и ученые давно старались разгадать природу этихъ явленій, порождавшихъ цѣлый рядъ легендъ и суевѣрій.

Болѣе 200 лѣтъ тому назадъ Галлей обращалъ вниманіе на сходство явленій сѣвернаго сіянія и того свѣченія, которое наблюдается при истеченіи электричества отъ сильно наэлектризованнаго тѣла; онъ же обратилъ вниманіе, что когда сіяніе имѣетъ видъ свода, то вершина этого свода находится въ магнитномъ меридіанѣ, наклонъ же лучей или полосъ близокъ къ наклоненію магнитной стрѣлки.

Полярные мореплаватели первой половины прошлаго столѣтія замѣтили отклоненія въ показаніяхъ компаса и возмущенія магнитной стрѣлки во время сѣверныхъ сіяній, и Франклинъ едва ли не первый произвелъ обстоятельныя изслѣдованія по этому вопросу.

Свѣченіе разрѣженныхъ газовъ подъ дѣйствіемъ электрическихъ разрядовъ представило новую аналогію въ области электрическихъ явленій и сѣверныхъ сіяній. Были даже предложены теоріи, въ которыхъ сѣверныя сіянія приписывались тихимъ разрядамъ земного электричества черезъ верхніе разрѣженные слои атмосферы.

Послѣ того, какъ по почину Гаусса были устроены магнитныя обсерваторіи, наблюденія Франклина получили систематическое подтвержденіе, и связь магнитныхъ бурь и сѣверныхъ сіяній была установлена съ полною несомнѣнностью.

Наконецъ, наблюденія за состояніемъ поверхности солнца и солнечными пятнами, правильно веденныя съ начала 1700 годовъ, уже въ 1850-хъ годахъ дали возможность подмѣтить связь между солнечными пятнами и сѣверными сіяніями—годы съ развитою и сильною дѣятельностью солнца, сопровождаемою и обиліемъ пятенъ, были обильны и сѣверными сіяніями и притомъ въ эти годы они достигали и наибольшей силы и видимости даже въ среднихъ широтахъ.

Еще въ 1790-хъ годахъ Дальтонъ, пользуясь положеніемъ вершины дуги или свода сіянія относительно звѣздъ, наблюденными изъ двухъ пунктовъ, отстоящихъ другъ отъ друга на 83 англійскихъ мили (125 верстъ), опредѣлилъ, что эта вершина находилась на высотѣ 100 англійскихъ миль немного къ югу отъ одного изъ этихъ пунктовъ.

Въ статьѣ R. Potter, Calculation of the Heigths of the Aurorae Boreales of 17th Sept. and 12th Oct. 1853, напечатанной въ 8-мъ томѣ Philosoph. Transactions of the Cambridge Royal Society, приведенъ рядъ подобныхъ наблюденій, давшихъ въ результатѣ также высоты отъ 65 до 85 англ. миль.

Спектральныя наблюденія обнаружили въ сѣверныхъ сіяніяхъ рядъ линій, которыя находились въ извѣстныхъ земныхъ тѣлахъ.

§ **2**. Въ такомъ приблизительно положеніи находился вопросъ лѣтъ двадцать пять тому назадъ, т.-е. явленіе было описано и изслѣдовано съ внѣшней стороны, главнымъ образомъ, качественной, но не было подвергнуто систематическому изученію помощію точныхъ наблюденій, которыя затѣмъ сопоставлялись бы между собою и служили бы основаніемъ стройной теоріи.

Но вотъ ровно двадцать лѣтъ тому назадъ норвежскій ученый проф. Биркеландъ снарядилъ свою первую экспедицію для изслѣдованія сѣверныхъ сіяній.

Въ этой экспедиціи онъ принялъ участіе самъ лично съ двумя своими студентами учениками Helland-Hansen'омъ и Laws'омъ въ сопровожденіи старика фина „поствапуса", т.-е. почтаря Хетта.

Экспедиція имѣла цѣлію достигнуть вершины одной горы высотою около 3000 футъ въ Сѣверной Норвегіи, недалеко отъ Гаммерфеста и воспользоваться имѣвшейся близъ вершины бревенчатой хижиной для своей стоянки и наблюденій.

Но экспедиція эта не удалась—не доходя версты двѣ до хижины экспедиція была застигнута метелью при сильномъ сѣверномъ вѣтрѣ и морозѣ до 25° С. Всѣ участники экспедиціи обморозились; имъ пришлось бросить багажъ и приборы, вернуться обратно и лишь опытность стараго „поствапуса" помогла имъ вновь добраться до ст. Гаржія (Gargia), которую они оставили за 31 часъ передъ тѣмъ.

Умѣлое оттаиваніе отмороженныхъ рукъ въ ледяной водѣ и своевременная врачебная помощь избавили участниковъ экспедиціи отъ гангрены и увѣчья.

§ **3**. Неудача первой попытки не ослабила энергіи Биркеланда, напротивъ, заставила его продолжать начатое дѣло съ большею осторожностью и предусмотрительностью.

Онъ лѣтомъ 1897 и 1898 годовъ посѣтилъ Сѣверную Норвегію, всходилъ на вершины наиболѣе высокихъ ея горъ, выбирая наиболѣе подходящую для устройства обсерваторіи.

Послѣ такого изученія онъ остановилъ свой выборъ на вершинахъ Суккертопъ и Тальвиктопъ, расположенныхъ въ разстояніи около 3,4 километровъ другъ отъ друга подъ 70° с. шир. и 22° 30′ вост. долг. отъ Гринвича. Высота и той и другой вершины около 3000 ф. надъ уровнемъ моря.

На обѣихъ вершинахъ были построены прочныя каменныя зданія обсерваторій, соединенныя какъ между собою, такъ и съ общею сѣтью телефонами.

На этихъ обсерваторіяхъ и были произведены въ теченіе зимы 1899—1900 гг. наблюденія сѣверныхъ сіяній, магнитныя и метеорологическія, подъ руководствомъ самого проф. Биркеланда. Не входя въ подробности полученныхъ результатовъ, такъ какъ они поглощаются дальнѣйшими, упомянемъ лишь о тѣхъ жестокихъ штормахъ и буранахъ, которые участникамъ экспедиціи пришлось наблюдать. Скорость вѣтра на этихъ вершинахъ достигала до 46 метровъ въ секунду, и бывали штормы со скоростью до 38 метровъ при морозѣ 16°. Биркеландъ говоритъ—трудно вообразить, что это такое, и какъ такой штормъ дѣйствуетъ на человѣка—одинъ изъ его ассистентовъ вернулся черезъ нѣсколько минутъ съ отмороженной рукой потому, что онъ не надѣлъ мѣховыхъ рукавицъ поверхъ шерстяныхъ, производя наблюденія анемометрами.

Тѣмъ не менѣе, коренастый, небольшого роста финнъ аккуратно, несмотря ни на какіе штормы и метели, доставлялъ на обсерваторію почту разъ или два въ недѣлю. Однажды, когда онъ пришелъ, весь обмерзшій, такъ что его едва можно было узнать, то профессоръ его спросилъ: не боится ли онъ ходить въ такую худую погоду. Финнъ сперва не отвѣчалъ и сидѣлъ спокойно, пока съ него ледъ не оттаялъ и тогда сказалъ: „Я слишкомъ глупъ, чтобы бояться“.

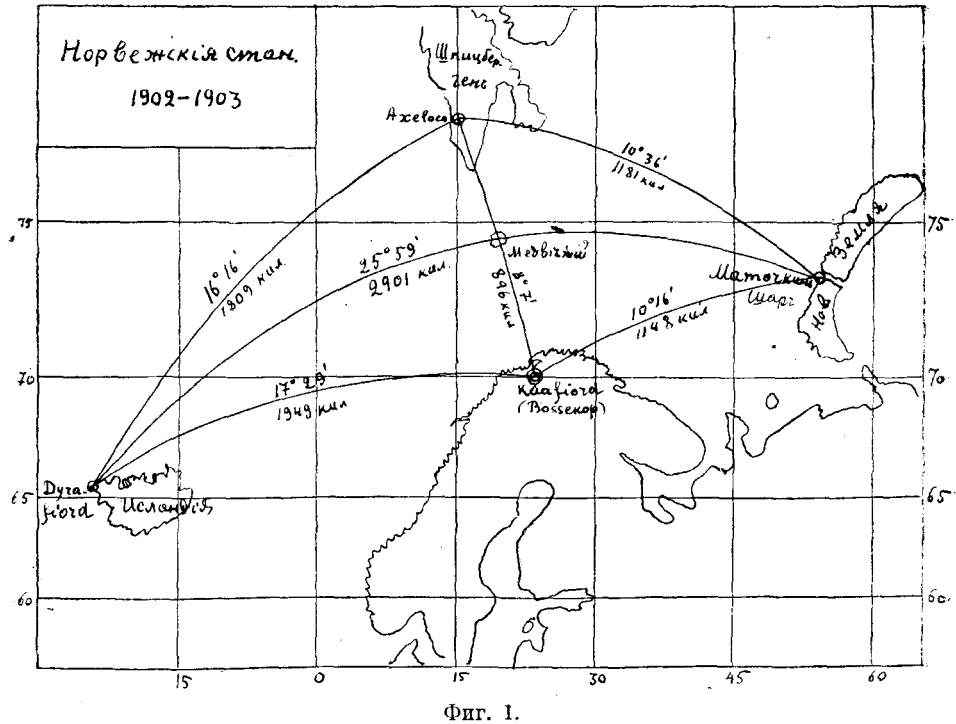
§ **4**. Главный выводъ, полученный на основаніи произведенныхъ второй экспедиціей наблюденій, состоялъ въ томъ, что для рѣшенія вопроса о причинѣ сѣверныхъ сіяній и магнитныхъ бурь необходимо имѣть въ своемъ распоряженіи одновременныя записи магнитныхъ приборовъ и наблюденія на разныхъ станціяхъ, соотвѣтственно расположенныхъ въ разстояніи около 1000 килом. одна отъ другой, и такія же записи для возможно большаго числа станцій, распредѣленныхъ по всей поверхности земли. Оказалось возможнымъ доказать разсчетами, что нѣкоторыя магнитныя возмущенія, охватывавшія значительныя области, можно приписать дѣйствію электрическаго тока, параллельнаго земной поверхности въ полярныхъ ея частяхъ, на высотѣ нѣсколькихъ сотъ километровъ и силою до милліона амперъ, если только силу потока электрическихъ частицъ измѣрять такъ же, какъ измѣряется гальваническій токъ по магнитному его дѣйствію. Въ полярныхъ странахъ эти токи были хорошо очерчены и сосредоточены,

располагаясь по временамъ *между* двумя станціями—Янъ Майеномъ и Боссекопомъ.

Норвежское правительство ассигновало на дальнѣйшія изслѣдованія 20000 кронъ, пять частныхъ лицъ дали по 6000 кронъ и самъ проф. Биркеландъ присоединилъ къ этой суммѣ 30000 кр. и оборудовалъ свои третьи экспедиціи для изслѣдованія сѣверныхъ сіяній. Эти экспедиціи относятся къ 1902—1903 годамъ; обработка всѣхъ добытыхъ результатовъ еще не закончена, но проф. Биркеландомъ уже изданы двѣ громадныхъ книги, составляющихъ первую и вторую части перваго тома его обработки этихъ результатовъ.

Станціи были устроены въ слѣдующихъ четырехъ пунктахъ (см. фиг. 1):

Kaafiord (Сѣв. Норвегія) (шир. 69°56′ N, дол. 22°58′ Ost.).
Dyrafiord (Исландія) (шир. 66°15′ N, дол. 22°30 West.).
Axelöen (Шпицбергенъ) (шир. 77°41′ N, дол. 14°50′ Ost.).
Маточкинъ Шаръ (Нов. Зем.) (шир. 73°17′ N, дол. 53°57′ Ost.).



Фиг. 1.

Всѣ станціи были снабжены полной серіей самопишущихъ варіаціонныхъ магнитныхъ приборовъ, абсолютнымъ магнитометромъ, инклинаторами, полнымъ комплектомъ метеорологическихъ приборовъ, теодолитомъ для астрономическихъ наблюденій и хронометрами.

На каждой станціи былъ устроенъ жилой домъ, магнитная обсерваторія для самопишущихъ приборовъ, обсерваторія для абсолютныхъ магнитныхъ наблюденій, метеорологическая будка и будка для астрономическихъ наблюденій. На каждой станціи былъ завѣдующій и два помощника, причемъ самъ проф. Биркеландъ руководилъ ст. Каафіордъ, на сѣверѣ Норвегіи, и устройствомъ всѣхъ станцій.

На Новой Землѣ въ распоряженіе экспедиціи былъ предоставленъ домъ, построенный для художника Борисова, и экспедиція была доставлена въ Маточкинъ Шаръ и обратно на казенномъ пароходѣ „Владиміръ", по распоряженію бывшаго тогда архангельскимъ губернаторомъ контръ-адмирала Н. А. Римскаго-Корсакова.

Кромѣ этихъ спеціально-построенныхъ и оборудованныхъ станцій на всѣхъ главныхъ магнитныхъ обсерваторіяхъ (числомъ 23) всего міра производились въ обусловленные часы записи съ болѣе быстрымъ ходомъ регистрирующихъ приборовъ; результаты наблюденій сообщены проф. Биркеланду.

Вотъ этотъ-то громадный матеріалъ онъ и подвергъ систематической обработкѣ, о которой я и имѣю въ виду вкратцѣ дать понятіе.

§ **5**. Исходя изъ той идеи, что причина сѣверныхъ сіяній и магнитныхъ бурь происхожденія не земного, а космическаго, и что ее надо искать въ движеніи наэлектризованныхъ частицъ (или частицъ электричества), выбрасываемыхъ солнцемъ, на которомъ пятна могутъ быть источниками катодныхъ лучей, Биркеландъ принялъ слѣдующій способъ обработки.

Прежде всего для каждаго изъ наблюденныхъ магнитныхъ возмущеній, происходящихъ, какъ извѣстно еще со времени Гаусса, одновременно на всей землѣ, онъ разсчиталъ величину и направленіе возмущающей силы для каждаго изъ мѣстъ наблюденій и получалъ такимъ образомъ представленіе о силовомъ возмущающемъ магнитномъ полѣ на поверхности земли. Такой расчетъ онъ дѣлалъ для каждаго возмущенія для цѣлаго ряда послѣдовательныхъ моментовъ, чтобы имѣть возможность прослѣдить за самымъ ходомъ его развитія. Для представленія вышеупомянутаго поля онъ принялъ своеобразный способъ: на карту наносились не проекціи возмущающей силы, а для каждаго изъ мѣстъ наблюденій строился векторъ, направленіе котораго совпадало съ направленіемъ горизонтальнаго электрическаго тока, могущаго, протекая надъ даннымъ мѣстомъ, произвести наблюденную горизонтальную возмущающую магнитную силу, длина вектора откладывалась пропорціональною силѣ тока, а значитъ и пропорціонально горизонтальной слагающей возмущающей силы.

Для представленія вертикальной ея слагающей строился векторъ, перпендикулярный первому и направленный отъ него влѣво, когда эта сила направлялась внизъ, и вправо — когда вверхъ. При такомъ

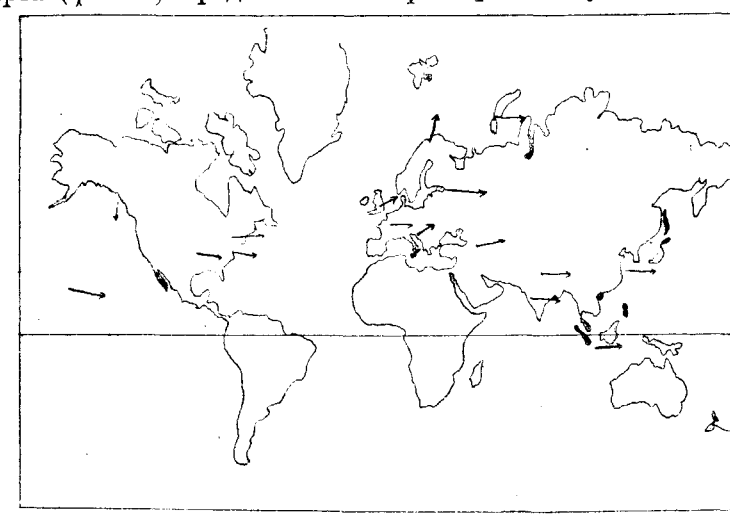
обозначеніи, если бы возмущеніе производилось дѣйствительно горизонтальными токами, расположенными надъ землею, то стрѣлка, изображающая вертикальную силу, направлялась бы къ мѣсту наибольшей плотности тока.

Разсмотрѣніе построенныхъ такимъ образомъ картъ привело Биркеланда къ слѣдующей классификаціи магнитныхъ возмущеній или бурь:

1) Положительныя экваторіальныя.
2) Отрицательныя экваторіальныя.
3) Положительныя полярныя.
4) Отрицательныя полярныя.
5) Вихревыя среднихъ широтъ (cyclo-median).

Положительное экваторіальное возмущеніе характеризуется слѣдующими особенностями: а) въ среднихъ и малыхъ широтахъ наблюдается положительная (т.-е. увеличивающая горизонтальную слагающую) возмущающая сила, лежащая въ плоскости магнитнаго меридіана, т.-е. не производящая измѣненій, ни склоненія, ни наклоненія, или лишь весьма малыя. Наибольшая величина силы наблюдается въ малыхъ широтахъ, къ полюсу величина ея убываетъ.

Карта (фиг. 2) представляетъ примѣръ возмущеній этого типа.



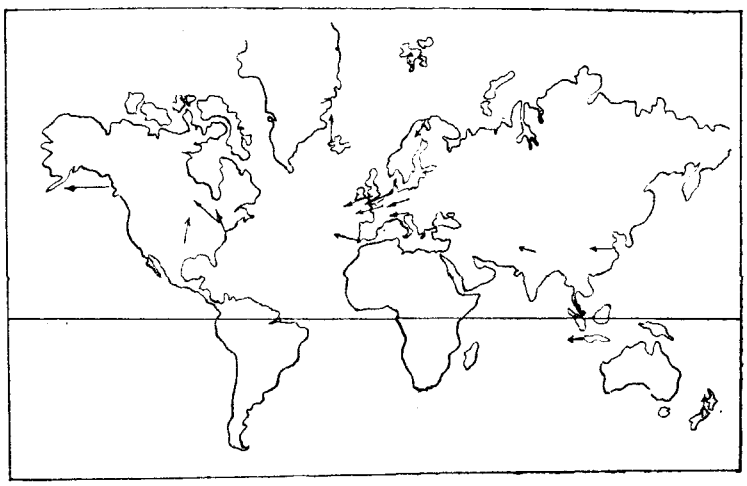
Фиг. 2.

Отрицательное экваторіальное возмущеніе бываетъ сравнительно рѣдко, примѣромъ его можетъ служить карта (фиг. 3), на которой расположеніе стрѣлокъ подобно предыдущему, направленіе же ихъ обратное.

Полярное возмущеніе характеризуется весьма большою величиною возмущающей силы въ полярныхъ странахъ, но на сравнительно небольшой области, при удаленіи отъ которой величина силы

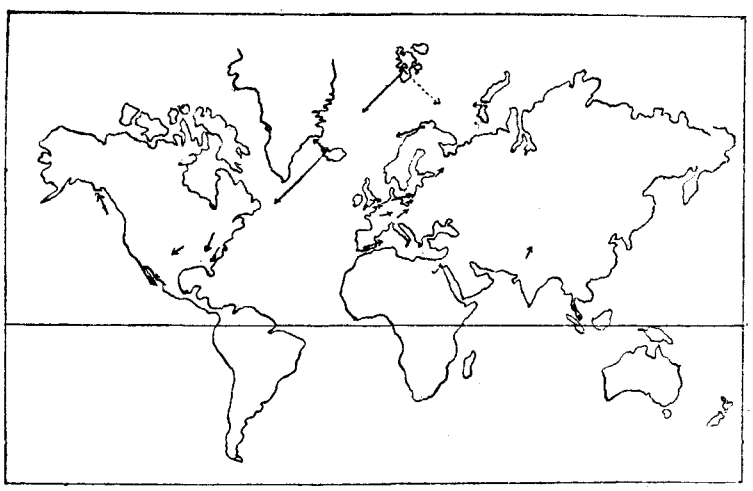
быстро убываетъ въ среднихъ и малыхъ широтахъ, становясь весьма малой.

Такое возмущеніе (отрицательное), т.-е. гдѣ горизонтальная слагающая въ области наибольшаго возмущенія имъ уменьшается, пред-



Фиг. 3.

ставлено на картѣ (фиг. 4), причемъ векторы для Исландіи и Шпицбергена изображены въ пять разъ меньшею длиною, нежели слѣдовало бы, если принять и для нихъ тотъ же масштабъ, какъ для Средней Европы.

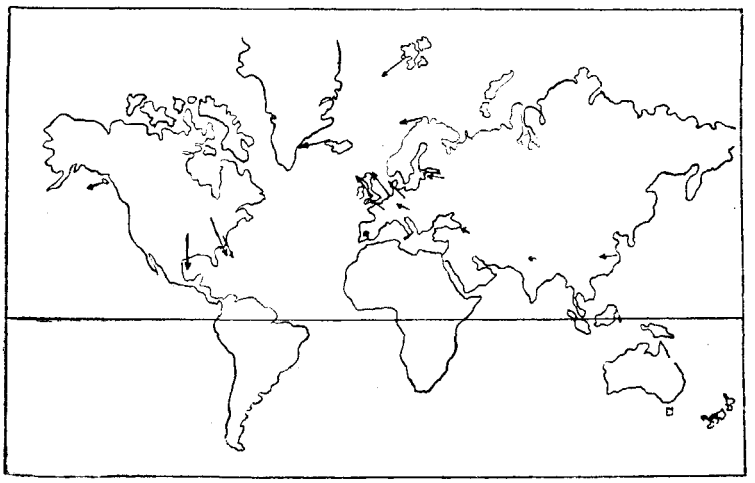


Фиг. 4.

Положительное полярное возмущеніе отличается отъ предыдущаго лишь направленіемъ силъ.

Примѣръ вихревого или циклическаго возмущенія представленъ на картѣ (фиг. 5), на которой направленія силовыхъ стрѣлокъ имѣютъ вихревой характеръ.

§ **6.** Прежде чѣмъ изложить тѣ объясненія, которыя далъ наблюденнымъ явленіямъ Биркеландъ, необходимо сказать нѣсколько словъ о математической теоріи сѣверныхъ сіяній, данной норвежскимъ математикомъ Карломъ Штёрмеромъ.



Фиг. 5.

Теорія Штёрмера изложена въ рефератѣ, помѣщенномъ въ 42-мъ томѣ Журнала Русскаго Физ.-Хим. О-ва, и я ограничусь поэтому лишь самымъ существеннымъ.

Штёрмеръ занялся изслѣдованіемъ вопроса о томъ, при какихъ условіяхъ частица, несущая электрическій зарядъ, выброшенная солнцемъ, попадетъ въ сферу дѣйствія магнитнаго поля земли и подъ его вліяніемъ достигнетъ ея поверхности или пройдетъ отъ нея весьма близко.

Чтобы рѣшить эту задачу, онъ принимаетъ, что солнце тѣло не магнитное, такъ что оно не образуетъ магнитнаго поля, и все движеніе частицы обусловливается полемъ земли, которую Штёрмеръ замѣняетъ элементарно-малымъ магнитомъ, ось котораго направлена по магнитной оси земли и магнитный моментъ котораго равенъ ея магнитному моменту, т.-е. 8,52. 10^{25} *C. G. S.*

Дифференціальныя уравненія движенія частицы, несущей электрическій зарядъ въ магнитномъ полѣ, напишутся, если уподобить элементъ траекторіи, описываемой частицею въ разсматриваемый моментъ элементу тока и примѣнить правило дѣйствія магнитнаго поля на такой токъ, причемъ сила тока пропорціональна скорости движенія частицы и заряду ея.

Обозначая черезъ H_x, H_y, H_z слагающія напряженія поля по осямъ координатъ, черезъ m массу частицы, e зарядъ ея и α нѣкоторую постоянную [1]), будемъ имѣть уравненія:

$$\left.\begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} &= \alpha . \frac{e}{m}\left[H_y . v_z - H_z v_y\right] \\ \frac{d^2y}{dt^2} &= \alpha \frac{e}{m}\left[H_z v_x - H_x v_z\right] \\ \frac{d^2z}{dt^2} &= \alpha \frac{e}{m}\left[H_x v_y - H_y v_x\right] \end{aligned}\right\} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (1)$$

гдѣ черезъ v_x, v_y, v_z обозначены проекціи скорости v частицы на оси координатъ. Такъ какъ направленіе силы, дѣйствующей на частицу, перпендикулярно къ направленію ея скорости, то скорость v постоянна, и въ предыдущія уравненія Штёрмеръ вводитъ вмѣсто времени t перемѣнную s—длину дуги траекторіи уравненіемъ $ds = vdt$. Направивъ затѣмъ ось Z-овъ по магнитной оси земли и обозначая ея потенціалъ черезъ V, онъ получаетъ:

$$V = M\frac{z}{r^3} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (2)$$

гдѣ M есть магнитный моментъ земли и $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$, слѣдовательно.

$$\left.\begin{aligned} H_x &= \frac{\partial V}{\partial x} = -3 . M\frac{xz}{r^5} \\ H_y &= \frac{\partial V}{\partial y} = -3 . M\frac{yz}{r^5} \\ H_z &= \frac{\partial V}{\partial z} = -M . \frac{3z^2 - r^2}{r^5} \end{aligned}\right\} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (3)$$

Кромѣ того:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{d^2x}{ds^2}v^2, \quad \frac{d^2y}{dt^2} = \frac{d^2y}{ds^2}v^2; \quad \frac{d^2z}{dt^2} = \frac{d^2z}{ds^2}v^2$$

и обозначая значками производныя, взятыя по перемѣнной s, будемъ имѣть систему

$$\left.\begin{aligned} x'' &= \frac{c_1^2}{r^5}\left[3yz . z' - (3z^2 - r^2)y'\right] \\ y'' &= \frac{c_1^2}{r^5}\left[(3z^2 - r^2)x' - 3xz . z'\right] \\ z'' &= \frac{c_1^2}{r^5}\left[3xz . y' - 3yz . x'\right] \end{aligned}\right\} \quad . \; . \; . \; . \quad (4)$$

---

[1]) Постоянная α есть отношеніе электростатической единицы электрической массы къ электромагнитной и равна $\frac{1}{C}$, гдѣ C—скорость свѣта.

Здѣсь черезъ c_1 обозначена нѣкоторая постоянная, зависящая отъ отношенія заряда частицы къ массѣ ея, отъ скорости ея движенія v, т.-е. зависящая отъ *рода* частицы и отъ магнитнаго момента M. Изъ уравненій (4) видно, что c_1 представляетъ нѣкоторую длину, величины которой при вышепринятомъ значеніи M, слѣдующія:

для катодныхъ лучей c_1 равно 4,0 — 8,5 милліон. кил.
„ β лучей радія „ „ 1,4 — 2,2 „ „
„ α лучей радія „ „ 150000 — 170000 килом.

Ясно, что по однородности ур. (4) можно принять за единицу длины любую длину.

Уравненія становятся проще, если взять $c_1 = 1$, чѣмъ и будетъ опредѣляться масштабъ траекторій.

Въ дальнѣйшемъ и будемъ полагать $c_1 = 1$.

Оказывается, что система (4) имѣетъ интегралъ, подобный интегралу площадей. Въ самомъ дѣлѣ, составивъ выраженіе $xy'' - yx''$, получимъ:

$$xy'' - yx'' = \frac{1}{r^5}\left[(3z^2 - r^2)(xx' + yy') - 3(x^2 + y^2).zz'\right]$$

или, полагая

$$x^2 + y^2 = R^2,$$

$$xy'' - yx'' = \frac{3z^2 - r^2}{r^5} RR' - \frac{3R^2}{r^5} \cdot zz' \quad \ldots\ldots \quad (5).$$

Выраженіе, стоящее въ правой части ур. (5), есть полная производная по s отъ величины $\frac{R^2}{r^3}$, ибо

$$\frac{\partial}{\partial R}\left(\frac{R^2}{r^3}\right) = \frac{3z^2 - r^2}{r^5} R \quad \text{и} \quad \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{R^2}{r^3}\right) = -\frac{3R^2}{r^5} z.$$

Вводя затѣмъ цилиндрическія координаты

$$x = R\cos\varphi \qquad y = R\sin\varphi$$

и сохраняя ось z безъ перемѣны, вмѣсто уравненія (5) получимъ

$$\frac{d}{ds}\left[R^2 \frac{d\varphi}{ds}\right] = \frac{d}{ds}\left[\frac{R^2}{r^5}\right] \quad \ldots\ldots \quad (5')$$

другія же два уравненія системы по рѣшеніи относительно $\frac{d^2R}{ds^2}$ и $\frac{d^2z}{ds^2}$ замѣнятся такими:

$$\left.\begin{aligned} \frac{d^2R}{ds^2} &= R\left(\frac{d\varphi}{ds}\right)^2 + \frac{r^2 - 3z^2}{r^5} R \frac{d\varphi}{ds} \\ \frac{d^2z}{ds^2} &= \frac{3z}{r^5} R^2 \frac{d\varphi}{ds} \end{aligned}\right| \quad \ldots\ldots \quad (6)$$

вмѣсто же уравненія (5′) берется соотвѣтствующій ему интегралъ

$$R^2 \frac{d\varphi}{ds} = 2\gamma + \frac{R^2}{r^3} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (7)$$

въ которомъ черезъ 2γ обозначена произвольная постоянная.

Кромѣ того, такъ какъ s есть дуга траекторіи, то будетъ:

$$R^2\left(\frac{d\varphi}{ds}\right)^2 + \left(\frac{dR}{ds}\right)^2 + \left(\frac{dz}{ds}\right)^2 = 1 \quad . \; . \; . \; . \; . \; , \quad (8)$$

Соотвѣтствующее интегралу площадей уравненіе (7) имѣетъ для дальнѣйшаго весьма важное значеніе.

Написавъ это уравненіе въ видѣ:

$$R \frac{d\varphi}{ds} = \frac{2\gamma}{R} + \frac{R}{r^3} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (9)$$

и замѣчая, что величина $R\frac{d\varphi}{ds}$ есть синусъ угла θ, составляемаго касательной къ траекторіи съ плоскостью, проведенной черезъ точку касанія и ось z-овъ получимъ неравенство:

$$-1 \leqq \frac{2\gamma}{R} + \frac{R}{r^3} \leqq 1 \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (10)$$

ограничивающее тѣ области пространства, въ которыхъ при заданномъ значеніи произвольной постоянной 2γ могутъ находиться траекторіи, *каковы бы ни были начальныя условія*, отъ тѣхъ, гдѣ траекторій находиться не можетъ. Ясно, что граничащія поверхности получатся, когда въ фор. (10) будутъ взяты знаки равенства.

На фиг. 6, 7, 8 и 9 представленъ видъ меридіановъ этихъ поверхностей, которыя всѣ суть поверхности вращенія около оси z-овъ при чемъ чернымъ покрыты тѣ области, гдѣ траекторій быть не можетъ.

Значенія постоянной γ, для которыхъ эти фигуры составлены слѣдующія:

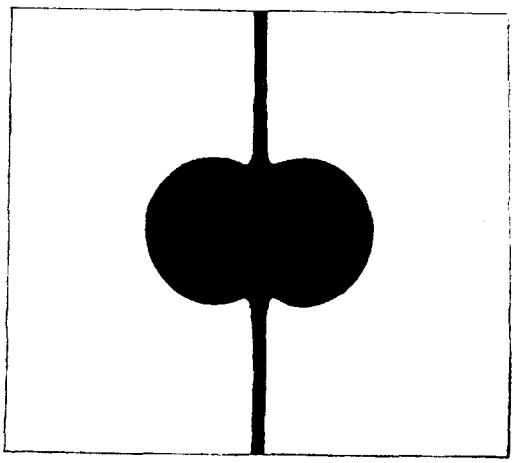
Фиг. 6а	$\gamma = 0{,}03$	Фиг. 7б	$\gamma = -0{,}5$
„ 6б	$\gamma = 0{,}2$	„ 8а	$\gamma = -0{,}97$
„ 7а	$\gamma = -0{,}05$	„ 8б	$\gamma = -1{,}016$

Обратимъ вниманіе, какимъ весьма узкимъ секторомъ подходитъ къ началу координатъ, каждая изъ этихъ поверхностей, въ особен-

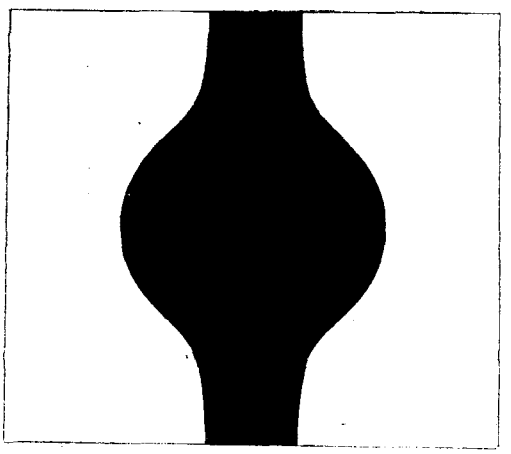
ности для значеній γ, близкихъ къ -1, значитъ всѣ траекторіи, каковы бы ни были начальныя условія, при такомъ значеніи γ подойдутъ къ началу внутри этой весьма узкой области.

Разсмотрѣніе этихъ поверхностей показываетъ, что онѣ односвязны, т.-е. состоятъ изъ одного куска, и распространяются въ безконечность, заключая и начало координатъ, если

$$-1 \leqq \gamma \leqq 0.$$



Фиг. 6а.

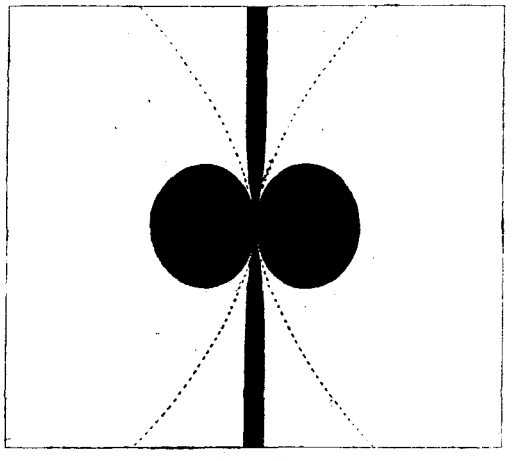


Фиг. 6б.

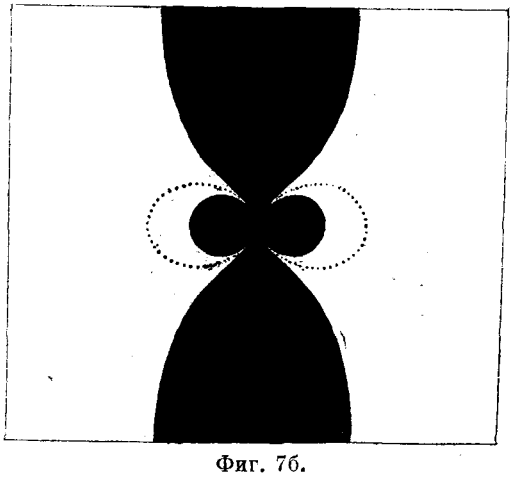
При весьма малыхъ положительныхъ значеніяхъ γ, траекторіи не доходятъ къ началу координатъ, но если Δ малая величина и $\gamma \leqq \left(\frac{2c_1}{\Delta}\right)^3$, то траекторія приближается къ началу на разстояніе меньшее Δ.

Наконецъ, принявъ для катодныхъ лучей величину c_1 равной

5,2 милліона километровъ, такъ что разстояніе отъ земли до солнца равно 28,8 c_1, или просто 28,8, когда за единицу длины принята длина c_1, Штёрмеръ получилъ еще рядъ неравенствъ, ограничивающихъ величины возможныхъ значеній γ, а также и тѣхъ начальныхъ условій, при которыхъ частица, вылетѣвшая отъ солнца, можетъ достигнуть земли.



Фиг. 7а.



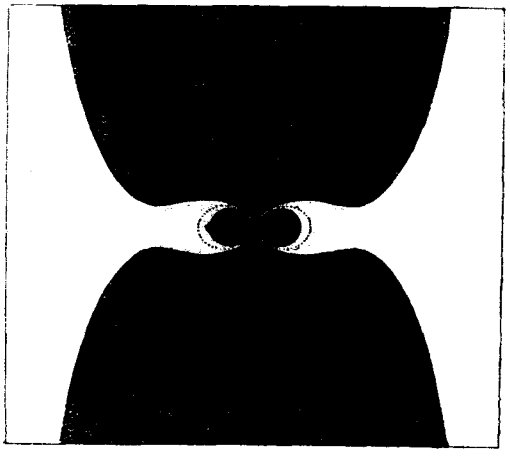
Фиг. 7б.

Разсмотрѣніе формъ пространствъ, заключающихъ траекторіи въ смежности съ началомъ координатъ, для вышеупомянутыхъ значеній параметра 2γ, привело Штермера къ слѣдующимъ выводамъ:

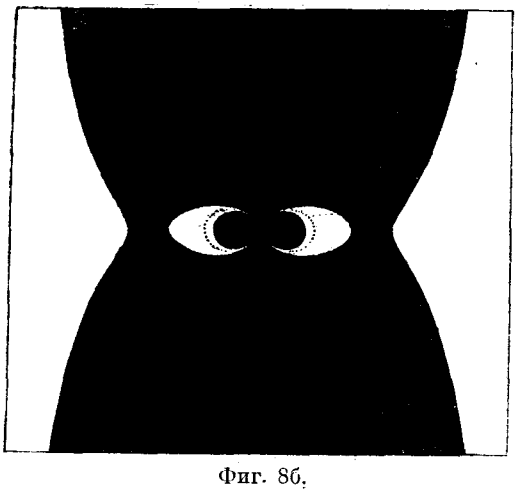
1°) Всѣ траекторіи достигаютъ предѣловъ атмосферы внутри поясовъ, расположенныхъ вокругъ магнитныхъ полюсовъ въ разстояніяхъ, заключающихся:

Для катодныхъ лучей	между	$2^0,3$	и	$3^0,4$.
„ β лучей радія	„	$4^0,6$	„	$5^0,8$.
„ α „ „	„	$16^0,6$	„	$18^0,1$.

Какъ видно, эти пояса уже зоны сіяній, но надо имѣть въ виду и тотъ рядъ упрощающихъ предположеній, который былъ сдѣланъ для расчетовъ, и что „жесткость“ лучей, испускаемыхъ солнечными пятнами, т.-е. въ условіяхъ, совершенно недоступныхъ нашимъ опытамъ, можетъ и отличаться отъ „жесткости“ лучей, намъ извѣстныхъ.



Фиг. 8а.



Фиг. 8б.

По уравненію (9) уголъ φ найдется при помощи квадратуры

$$\varphi = \int_{s_0}^{s} \left(\frac{2\gamma}{R^2} + \frac{1}{r^3} \right) ds + \varphi_0$$

послѣ чего найдутся x и y и можетъ быть построена траекторія.

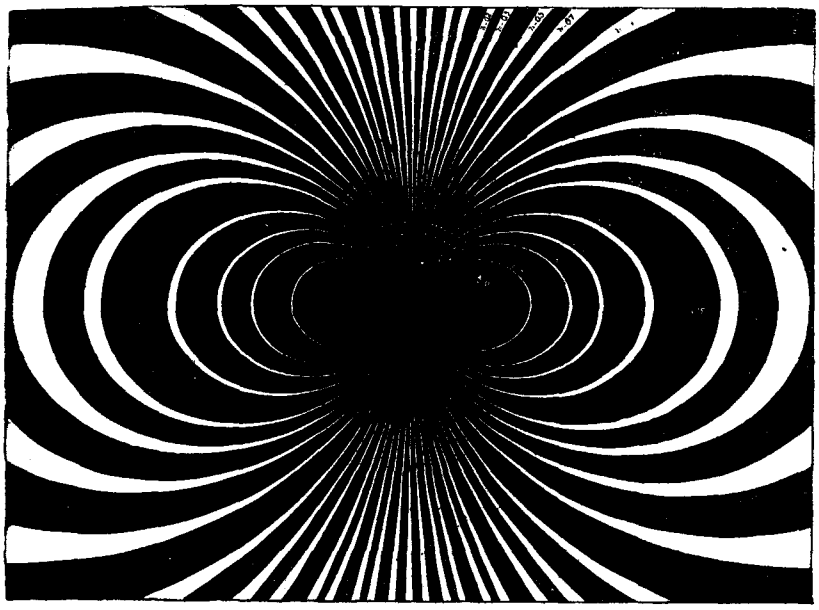
Такимъ образомъ, все дѣло сводится къ интегрированію, иными словами, къ составленію таблицы значеній функцій R и z при заданныхъ s.

Положимъ, что берется рядъ послѣдовательныхъ равноотстоящихъ значеній перемѣнной независимой s съ табличнымъ промежуткомъ $\Delta s = h$, достаточно малымъ, такъ что эти значенія будутъ:

$$s_\lambda = s_0 + \lambda h \quad (\lambda = 1, 2, \ldots n-2,\ n-1,\ n,\ n+1, \ldots)$$

соотвѣтствующія значенія R и z обозначимъ черезъ

$$R_\lambda = R(s_\lambda) \text{ и } z_\lambda = z(s_\lambda)$$



Фиг. 9.

введены еще величины ρ_λ и ζ_λ равенствами

$$\rho_\lambda = R''(s_\lambda).\ h^2 \text{ и } \zeta = z''(s_\lambda).\ h^2.$$

Процессъ вычисленія состоитъ въ послѣдовательномъ присоединеніи по одной строкѣ въ таблицахъ величинъ R_n ρ_n, z_n ζ_n и ихъ разностей, причемъ для нахожденія ρ_n и z_n при извѣстныхъ R_n и z_n служатъ первыя два дифференціальныя уравненія системы [1]).

Такимъ образомъ, пусть таблица заполнена, какъ показано

s_{n-3}	R_{n-3}		$\Delta^2 R_{n-4}$	ρ_{n-3}		$\Delta^2\rho_{n-4}$		$\Delta^4\rho_{n-5}$
		ΔR_{n-3}			$\Delta\rho_{n-3}$		$\Delta^3\rho_{n-4}$	
s_{n-2}	R_{n-2}		$\Delta^2 R_{n-3}$	ρ_{n-2}		$\Delta^2\rho_{n-3}$		$\Delta^4\rho_{n-4}$
		ΔR_{n-2}			$\Delta\rho_{n-2}$		$\Delta^3\rho_{n-3}$	
s_{n-1}	R_{n-1}		$\Delta^2 R_{n-2}$	ρ_{n-1}		$\Delta^2\rho_{n-2}$		
		ΔR_{n-1}			$\Delta\rho_{n-1}$			
s_n	R_n			ρ_n				

[1]) Этотъ методъ изложенъ подробно въ статьѣ А. Н. Крылова, Архивъ физическихъ наукъ, № 1, 2, стр. 68. 1918.

и совершенно такія же двѣ таблицы для z и ζ, требуется вычислить R_{n+1} и z_{n+1}.

Для этого по уравненіямъ

$$R'' = \left(\frac{2\gamma}{R} + \frac{R}{r^3}\right)\left(\frac{2\gamma}{R^2} + \frac{3R^2}{r^5} - \frac{1}{r^3}\right), \qquad z'' = \left(\frac{2\gamma}{R} + \frac{R}{r^3}\right) \cdot \frac{3Rz}{r^5}$$

вычисляются непосредственно величины

$$R''_{(n)} \text{ и } z''_n \text{ и по нимъ } \rho_n = R''_n \cdot h^2 \text{ и } \zeta_n = z''_n \cdot h^2,$$

послѣ чего къ таблицѣ значеній величины ρ_n прибавятся числа

$$\rho_n,\ \Delta\rho_{n-1},\ \Delta^2\rho_{n-2},\ \Delta^3\rho_{n-3},\ \Delta^4\rho_{n-4}$$

и точно также къ таблицѣ значеній ζ_n числа

$$\zeta_n,\ \Delta\zeta_{n-1},\ \Delta^2\zeta_{n-2},\ \Delta^3\zeta_{n-3},\ \Delta^4\zeta_{n-4}.$$

Пользуясь формулою Тэйлора, устанавливается слѣдующее соотношеніе, пренебрегая членами съ h^5

$$\Delta^2 R_{n-1} = \rho_n + \frac{1}{12}\left[\Delta^2\rho_{n-2} + \Delta^3\rho_{n-3} + \Delta^4\rho_{n-4} - \frac{1}{20}\Delta^4\rho_{n-4}\right],$$

пользуясь которымъ найдется ΔR_{n-1}, затѣмъ, зная ΔR_{n-1}, получимъ

$$\Delta R_n = \Delta R_{n-1} + \Delta^2 R_{n-1}$$

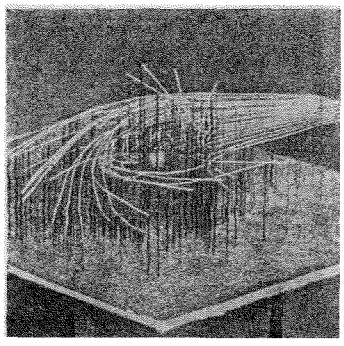
и

$$R_{n+1} = R_n + \Delta R_n.$$

Совершенно также находятся z_{n+1}.

Примѣняя этотъ процессъ, Штермеръ, пользуясь услугами своего ассистента и двухъ вычислительницъ, вычислилъ около 120 траекторій для нижеслѣдующихъ 27 значеній $\gamma_1 = -\gamma$.

$\gamma_1 =$ 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8;
0,85; 0.90; 0,92; 0,926; 0,9285; 0,93; 0,9335; 0,939;
0,94; 0,95; 0,956; 0,957; 0,97; 0,999; 1; 1,2; 1,5; 2; 5.



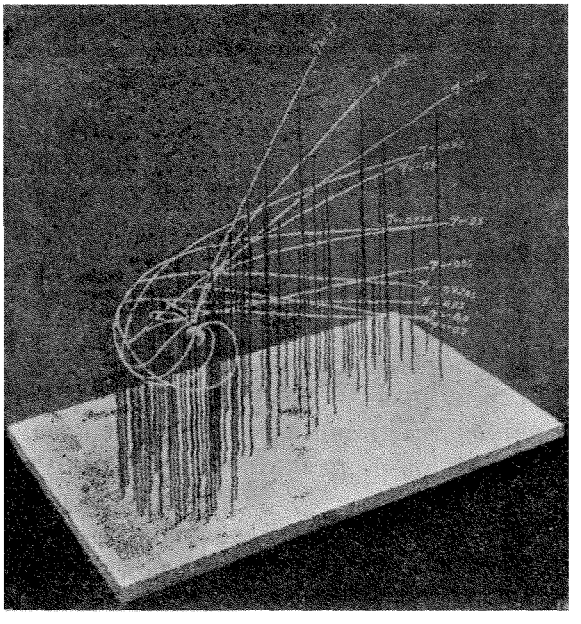
Фиг 10

Для каждой траекторіи вычислено около 100—120 точекъ, на что потребовалось свыше 5000 рабочихъ часовъ.

Для всѣхъ этихъ траекторій начальныя условія были выбраны такія, чтобы траекторія проходила черезъ начало координатъ и уходила въ безконечность, причемъ Штермеръ, на основаніи изслѣдованія уравненій системы (4), доказалъ, что для каждаго значенія постоянной γ между 0 и —1 такихъ траекторій *двѣ* и только двѣ, и вмѣстѣ съ тѣмъ онъ показалъ, какъ находить начальныя значенія перемѣнныхъ для этихъ траекторій.

На основаніи произведенныхъ вычисленій имъ построены модели, снимки которыхъ представлены на фиг. (10, 11 и 12).

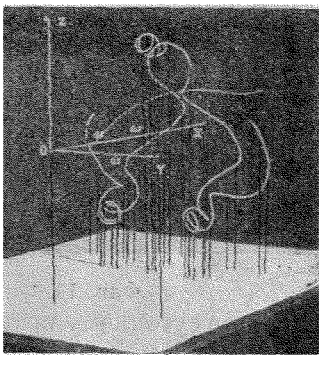
Но кромѣ траекторій, уходящихъ въ безконечность, существуютъ еще траекторіи замкнутыя или періодическія, для которыхъ исполнена



Фиг. 11.

приблизительно такая же работа, какъ и для уходящихъ въ безконечность.

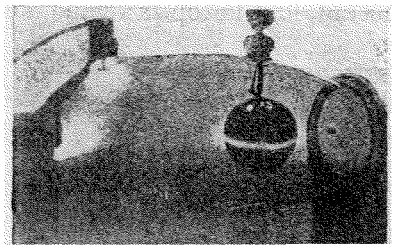
Эти періодическія траекторіи представляютъ иногда весьма сложныя спирали, какъ, напр., представленная на фиг. (12), и нетрудно вообразить сколько надо труда, чтобы вычислить достаточное число точекъ для построенія такой спирали.



Фиг. 12.

§ **7**. Итакъ, изслѣдованія Штёрмера съ несомнѣнностью показываютъ, что частицы электричества, соотвѣтствующія катоднымъ, β или α лучамъ радія, могутъ при сдѣланныхъ допущеніяхъ, подъ вліяніемъ магнитнаго поля земли, достигать земли и притомъ въ весьма ограниченной близи полярной области, причемъ ихъ траекторіи будутъ всѣ заключаться при подходѣ къ землѣ въ чрезвычайно узкомъ секторѣ, сѣченіе котораго на высотѣ

около 100 кил. надъ земною поверхностью составляетъ отъ нѣсколькихъ метровъ до нѣсколькихъ километровъ, смотря по „жесткости“ лучей.



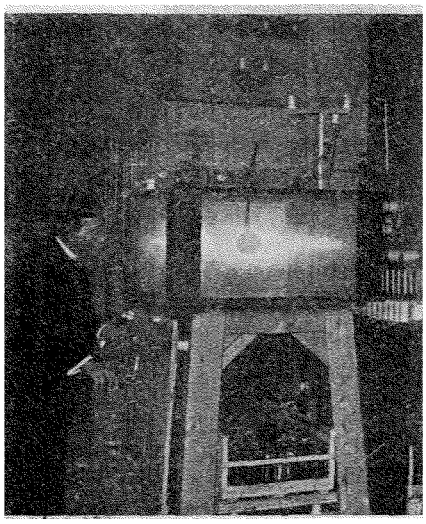
Фиг. 13.

Ясно, что потокъ частицъ, выкинутыхъ солнцемъ одновременно, хотя бы въ значительно удаленныхъ другъ отъ друга мѣстахъ и движущихся по такимъ траекторіямъ, и произведетъ явленіе сѣвернаго сіянія съ его драпировками и лучами.

§ **8**. Нѣсколько иначе подошелъ къ рѣшенію вопроса Биркеландъ: онъ сталъ изучать движеніе частицъ электричества въ магнитномъ полѣ опытнымъ путемъ. Для этого онъ построилъ, такъ-сказать, модель земного шара, которую онъ назвалъ *terrella* (земличка).

На фиг. (13) представлена первоначальная его модель, на фиг. (14) вторая, большихъ размѣровъ.

Сущность устройства и той и другой одинакова: въ стеклянномъ сосудѣ или въ ящикѣ съ стеклянными стѣнками, въ которомъ поддерживается разрѣженіе до нѣсколькихъ тысячныхъ миллиметра ртути, помѣщается подвѣшеннымъ по срединѣ ящика электромагнитъ, которому придана форма шара. Электромагнитъ этотъ покрытъ оболочкою, окрашенной растворомъ синеродистаго барія. На одной изъ стѣнокъ ящика помѣщенъ источникъ катодныхъ лучей; шаровой электромагнитъ (terrella) можетъ быть устанавливаемъ такъ, чтобы его магнитная ось занимала любое положеніе по отношенію къ прямой, соединяющей его центръ съ катодомъ и, кромѣ того, ему можетъ быть сообщаемо вращеніе, соотвѣтствующее суточному вращенію земли.

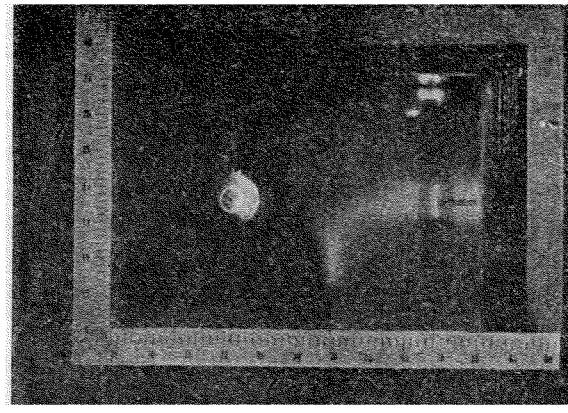


Фиг. 14.

Мѣняя силу намагничивающаго тока, можно измѣнять въ весьма широкихъ предѣлахъ магнитный моментъ магнита, т.-е. ту постоянную c_1 въ уравненіяхъ Штёрмера, которая для земли мѣняется въ зависимости отъ рода лучей, и, такимъ образомъ, на тѣхъ же катодныхъ лучахъ изучать и ходъ лучей другой „жесткости“.

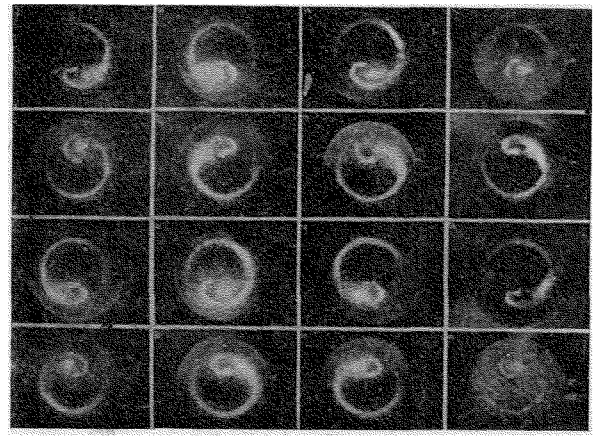
Катодные лучи даютъ свѣченіе въ разрѣженномъ газѣ, въ мѣстѣ же ихъ паденія на поверхность терреллы замѣчается яркое свѣченіе благодаря окраскѣ синеродистымъ баріемъ.

Биркеландъ снабжалъ также свою терреллу различными экранами, окрашенными тѣмъ же веществомъ, чтобы съ еще большею ясностью прослѣдить пути лучей; кромѣ того, онъ ставилъ другіе экраны со щелью, чтобы выдѣлять узкій потокъ лучей желаемаго направленія.



Фиг. 15.

Фиг. 14, 15 и 16 показываютъ нѣкоторые изъ полученныхъ Биркеландомъ разультатовъ; здѣсь видны и экваторіальное кольцо и полярныя свѣченія, сосредоточенныя въ узкой области въ разстояніи около 20° отъ полюса.



Физическій институтъ БИБЛИОТЕКА

Фиг. 16.

Формы этихъ кривыхъ и мѣста ихъ примыканій къ шару въ общемъ соотвѣтствуютъ математической теоріи Штёрмера.

§ **9**. При нѣкоторыхъ начальныхъ условіяхъ въ ряду траекторій, найденныхъ Штёрмеромъ, заключаются и такія, которыя состоятъ какъ бы изъ вертикальной вѣтви, приближающейся къ землѣ, небольшого горизонтальнаго участка вблизи ея поверхности и опять вертикальной вѣтви, уходящей отъ земли. Такія траекторіи подходятъ къ землѣ въ близъ-полярныхъ областяхъ.

Подобные же пути получилъ и Биркеландъ при нѣкоторыхъ условіяхъ намагничиванія своей тереллы и положенія ея магнитной оси относительно потока лучей.

Это обстоятельство и сравнительная простота поля, получаемаго при полярной магнитной бурѣ, заставило его изслѣдовать такую задачу: опредѣлить длину горизонтальной части, высоту ея надъ поверхностью земли и силу такого тока, который производилъ бы возмущающее поле, подобное наблюденному.

Оказалось, что высоту надо брать около 200 километровъ, длину около 1600 и силу тока около 1.000.000 амперъ и тогда получилось поле, близкое къ одному изъ наблюденныхъ. Для другихъ наблюденій получались величины того же порядка.

§ **10**. Траекторіи Штёрмера приближаются къ земной поверхности по большей части со стороны, не освѣщенной солнцемъ, то же показали Биркеланду и опыты надъ терреллою, поэтому онъ поставилъ себѣ задачу изучить распредѣленіе магнитныхъ бурь по времени дня, для своихъ четырехъ полярныхъ станцій. Простого счета возмущеній или учета ихъ продолжительности въ разные часы дня недостаточно, необходимо принять во вниманіе и напряженность самого возмущенія.

Пусть, напр., P_h представляетъ величину горизонтальной слагающей возмущающей силы въ плоскости магнитнаго меридіана, тогда интегралъ

$$\left| S_H \right| = S^a{}_H = \frac{1}{T}\int_0^T \left| P_h \right| dt$$

отъ *абсолютной* величины этой слагающей представитъ абсолютную среднюю напряженность горизонтальной возмущающей силы по меридіану. Подобнымъ образомъ, если обозначить соотвѣтственно черезъ $P_h{}^p$ и $P_h{}^n$ положительныя и отрицательныя значенія, то интегралы

$$S^p{}_H = \frac{1}{T}\int_0^T P_h{}^p dt$$

$$S^n{}_H = \frac{1}{T}\int_0^T P_h{}^n dt$$

представятъ среднюю напряженность положительнаго и отрицательнаго возмущенія вышеупомянутой слагающей.

Понятно, что подобныя же величины можно составить для поперечной слагающей (возмущенія склоненія) и вертикальной.

Наконецъ,

$$S^T = \sqrt{|S_H|^2 + |S_D|^2 + |S_V|^2}$$

представитъ значеніе средней величины полной напряженности, причемъ $|S_D|$ и $|S_V|$ представляютъ таковыя для поперечной и вертикальной слагающей.

Такіе разсчеты и произведены Биркеландомъ для каждыхъ двухъ часовыхъ промежутковъ каждаго дня, затѣмъ для тѣхъ же часовъ по пятидневнымъ періодамъ, затѣмъ по мѣсячнымъ и, наконецъ, для всего времени наблюденій.

Оказывается, что средняя напряженность возмущеній вблизи пояса сѣверныхъ сіяній слѣдуетъ за суточнымъ движеніемъ солнца, и если бы представлять эти возмущенія векторами направленій токовъ, то для каждой станціи можно бы замѣтить двѣ главныя системы:

1°) первая система, имѣющая maximum около 6 ч. вечера по мѣстному времени съ стрѣлкою, направленной къ востоку по поясу сіяній.

2°) вторая система съ maximum'омъ около полуночи и стрѣлкою, направленною къ западу.

Около 9—10 часовъ утра по мѣстному времени наступаетъ, такъ сказать, магнитное затишье, т.-е. отсутствіе возмущеній.

Эти двѣ главныхъ системы соотвѣтствуютъ тѣмъ возмущеніямъ, которыя выше были названы положительнымъ и отрицательнымъ полярными.

Разсмотрѣніе самыхъ діаграммъ указало Биркеланду, что для этихъ возмущеній центръ располагался между Axoloen'омъ и Kaafiord'омъ, но кромѣ этихъ главныхъ встрѣчается и нѣкоторое число меньшей силы мѣстныхъ бурь по близости къ магнитному полюсу земли и къ сѣверу отъ пояса сіяній.

Суточный періодъ, расположеніе зоны полярныхъ возмущеній, время дня, когда они достигаютъ наибольшей интенсивности, соотвѣтствуютъ, какъ теоріи Штёрмера, такъ и опытамъ Биркеланда съ терреллою, которыми онъ обнаружилъ, мѣняя жесткость лучей, что можно получить два типа электрическихъ осажденій на вечернюю сторону земли; у одного изъ этихъ типовъ движеніе частицъ происходитъ къ востоку, у другого къ западу. (Это обнаруживалось Биркеландомъ помощью экрановъ, расположенныхъ въ видѣ звѣздки близъ полюсовъ терреллы, замѣчая ихъ свѣтящуюся и тѣневую сторону). Эти два типа и могутъ служить объясненіемъ полярныхъ возмущеній положительнаго и отрицательнаго.

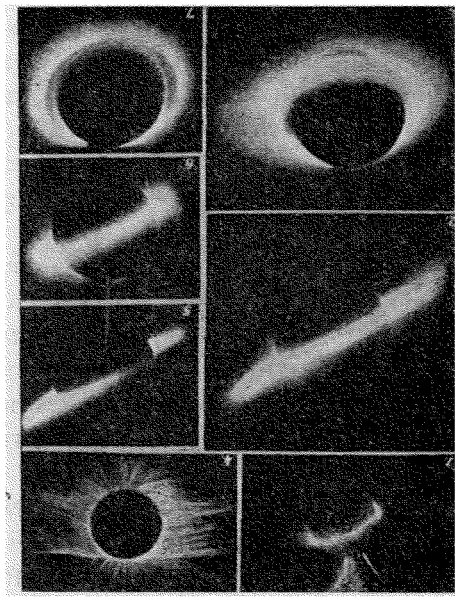
Источникомъ же электрической радіаціи служитъ солнце.

§ **11**. Любопытны также опыты Биркеланда съ терреллою, когда онъ самый электромагнитъ или самую терреллу дѣлалъ источникомъ катодныхъ лучей, въ тоже время намагничивая ее.

Онъ получалъ явленія, подобныя солнечной коронѣ и кольцамъ Сатурна, какъ можно видѣть по фиг. 17.

§ **12**. Трудно дать въ нѣсколько четвертей часа полное понятіе о двухъ огромныхъ томахъ, столь богатыхъ содержаніемъ какъ наблюдательнаго, такъ опытнаго и, наконецъ, теоретическаго матеріала, какъ-то сочиненіе Биркеланда, бѣглый очеркъ котораго я далъ.

Я обращусь теперь къ послѣднимъ работамъ Штёрмера, въ которыхъ онъ обнаруживаетъ свой талантъ наблюдателя и опытнаго изслѣдователя, тогда какъ въ предыдущихъ работахъ онъ показалъ свои математическія силы.



Фиг. 17.

Я уже упоминалъ въ началѣ о расчетѣ Дальтона, которымъ онъ опредѣлилъ положеніе вершины дуги или свода сѣвернаго сіянія, и работы Potter'а, относящіяся къ 1833 году.

Въ то время не было еще ни фотографіи, ни телеграфа и, конечно, не было и самой мысли о возможности телефона; понятно поэтому, что наблюденія съ двухъ пунктовъ такого измѣнчиваго явленія, какъ сѣверное сіяніе простымъ глазомъ или простѣйшими угломѣрными приборами для опредѣленія положенія выдающихся точекъ сіянія относительно звѣздъ не могли отличаться большою точностью, по самой своей трудности.

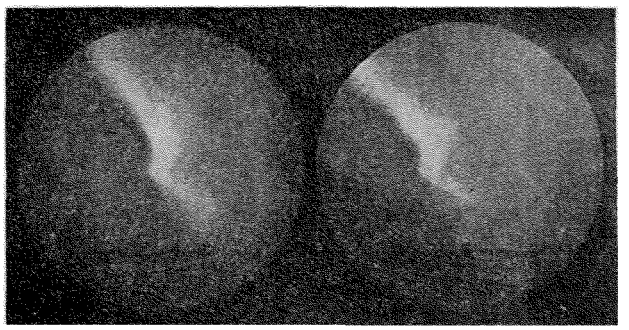
Штёрмеръ и рѣшилъ примѣнить къ систематическому изслѣдованію этого вопроса современныя научныя средства. Съ этою цѣлью онъ устроилъ на сѣверѣ Норвегіи двѣ обсерваторіи въ Боссекопѣ и въ Сторъ Корснесѣ, лежащихъ—первый подъ 70° сѣвер. широты и 24° вост. долготы отъ Гринвича, второй на томъ же меридіанѣ, но на 27 километровъ къ сѣверу.

На каждой изъ этихъ обсерваторій имѣлись спеціально приспособленныя, совершенно одинаковыя между собою, фотографическія камеры. Обѣ станціи были соединены телефономъ и, слѣдовательно, легко было получать вполнѣ одновременные снимки. Камеры наводи-

лись на ту область неба, гдѣ было сѣверное сіяніе такъ, чтобы на пластинкѣ получалось и изображеніе какой-либо яркой звѣзды или планеты, къ которой затѣмъ можно было бы относить соотвѣтствующія изображенія той-же самой точки сіянія.

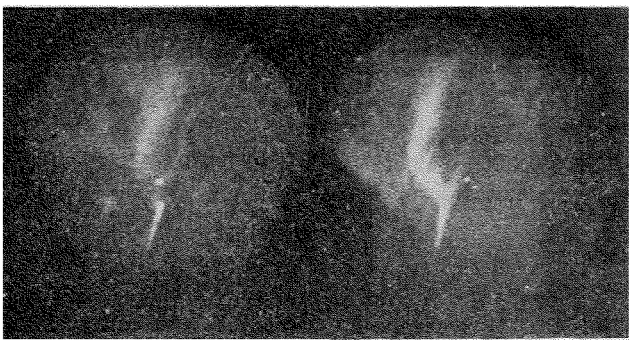
Однимъ словомъ, производилась фотограммометрическая съемка сіянія одновременно двумя камерами, причемъ изображеніе звѣздъ на пластинкѣ давало оріентировку камеры.

Понятно, что по такимъ двумъ одновременнымъ снимкамъ нетрудно опредѣлить положеніе любой отличительной точки, полученной



Фиг. 18.

на снимкахъ, по отношенію къ базѣ, какъ по высотѣ, такъ и по азимуту и, слѣдовательно, вынести проекцію этой точки на карту и отмѣтить на ней ея возвышеніе надъ поверхностью земли. Штёрмеръ опредѣлялъ, главнымъ образомъ, нижній край сіянія, когда оно имѣло



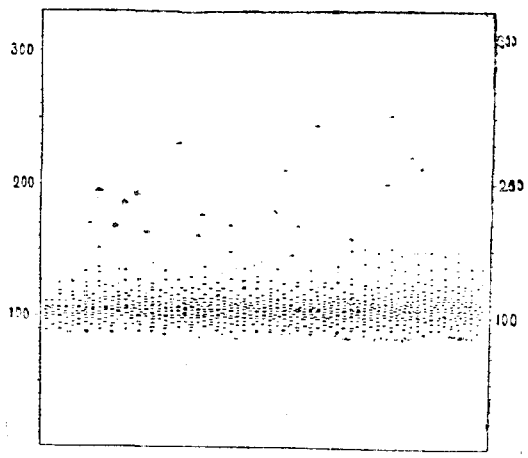
Фиг. 19.

видъ занавѣси, и изслѣдовалъ нѣсколько сотъ снимковъ, снявъ съ нихъ положеніе многихъ тысячъ точекъ.

На фиг. (18 и 19) представлены пара снимковъ, на которыхъ видны изображенія сіянія и Венеры.

Фиг. (20) представляетъ сводную таблицу наблюденій; на ней показаны возвышенія всѣхъ вычисленныхъ точекъ и видно, какъ онѣ всѣ группируются въ слоѣ на высотѣ около 100 километровъ надъ земною поверхностью.

Работы Штёрмера еще не закончены; одновременно съ фотограммометрическою съемкою имъ производились и магнитныя наблюденія самопишущими варіаціонными приборами.



Фиг. 20.

Ясно, что обработка этихъ совмѣстныхъ наблюденій дастъ точныя данныя для расчетовъ, подобныхъ сдѣланнымъ предположительно Биркеландомъ, т.-е. о силѣ того потока электрическихъ частицъ, который, внѣдряясь въ атмосферу, производитъ и сѣверныя сіянія и магнитныя бури, но уже теперь можно сказать, что работами Биркеланда и Штёрмера сущность дѣла выяснена, въ дальнѣйшемъ будетъ лишь изученіе его деталей.