Феномен апокампического разряда (обзор работ за 2016-2018 гг)

Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук Лаборатория оптических излучений

Э.А. Соснин

Заседание ОУС СО РАН по физическим наукам 22.03.2018

## Условия формирования (1)



Схема установки для получения апокампа (a) и его внешний вид (b): *1* – генератор; 2 – трансформатор; 3, 4 – электроды; 5 – канал основного импульсно-периодического разряда; 6 – «гало»; 7 – отросток; 8 – плазменная струя. *C* = 1-30 пФ. Высота кадра (b) 35 мм

Апокамп (от греч. από – от и кαμπη – изгиб, поворот) – плазменная струя, формирующаяся на изгибе разрядного канала

## Условия формирования (2)



Формирование апокампа в нормальных условиях в разрядном промежутке между острием и плоскостью (а) и острием и пористой металокерамикой (b). В обоих случаях острийный электрод является высоковольтным, а другой находится под плавающим потенциалом

# Условия формирования (3): принудительное искривление канала разряда



Формирование апокампа в аргоне: 1 – изогнутая кварцевая трубка, заполняемая аргоном; 2 – отверстие; 3 – высоковольтный электрод; 4 – кольцевой электрод, имеющий развязку с землёй через конденсатор  $C = 1.65 \text{ п}\Phi$ ; 5 – проводник для зажигания импульсно-периодического канала разряда между электродами 3 и 4.

## Условия формирования (4)



Осциллограммы напряжения и тока в случае ёмкостной (1, C = 3.1 пФ) и резистивной (2, R = 14 кОм) развязки контура: f = 50 кГц, d = 1.1 см,геометрия «остриё - остриё»

Соснин Э.А., Скакун В.С., Панарин В.А., Печеницин Д.С., Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х. Феномен апокампического разряда // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103, № 12. С. 857–860.

## Выводы (1)

1) Для формирования одиночного или множественного апокампа в воздухе при нормальных условиях длиной до 4-6 см необходимо:

---- импульсно-периодический разряд с частотой повторения импульсов в единицы-десятки килогерц;

---- положительная полярность импульсов напряжения и амплитуда в несколько киловольт; ---- чтобы оба электрода и канал разряда находились под потенциалом относительно земли.

2) Апокамп всегда привязан к месту изгиба плазменного канала, и его образование не зависит от формы и материала электродов основного разряда. При этом неважно, получен ли изгиб канала расположением электродов под углом друг к другу, или его получили, принудительно изгибая канала разряда.

## Динамика формирования (1): установка



Рис. 1. Схема установки с системой (слева) регистрации И геометрические параметры апокампического разряда (справа): 1 основной 2 разряд; высоковольтный электрод; 3 – электрод под плавающим потенциалом; 4 – импульсный высоковольтный источник питания; 5 – пояс Роговского; 6 – генератор запускающих импульсов; 7 – ІССО камера; 8 – осциллограф; 9 – кварцевая камера; 10 апокампический разряд. Размеры разряда: апокампического d разрядный промежуток; lsh – длина отростка; *l*pb – длина области распространения плазменных пуль

Sosnin E.A., Panarin V.A., Skakun V.S., Baksht E.Kh., Tarasenko V.F. Dynamics of apokamp-type atmospheric pressure plasma jets // Eur. Phys. J. D. 2017. Vol. 71(25). No. 2. P. 1–6.

Tarasenko V.F., Sosnin E.A. Skakun V.S., Panarin V.A., Trigub M.V., Evtushenko G.S. Dynamics of apokamp-type atmospheric pressure plasma jets initiated in air by a repetitive pulsed discharge // Physics of Plasmas. 2017. V. 24. 043514.

## Динамика формирования (2): отросток и разряд



Фотографии разрядного промежутка при различных экспозициях: 0.125 с (a); 1995 мкс (b); 200 нс (c). Снимок (b) дан в негативе

# Динамика формирования (3): плазменные «пули»



Динамика развития апокампа: a, b, c – экспозиция 3 нс, пауза между кадрами – 17 нс; d – интегральный кадр с накоплением 120 нс. Размер кадра по вертикали – 26.27 мм.

## Выводы (2)

3) Апокамп состоит из «монолитного» отростка и области распространения плазменных «пуль» - волн ионизации движущихся со скоростью от 100 до 220 км/с, на распространение которых конвекция не оказывает существенного влияния.

4) Волны ионизации развиваются вблизи максимума амплитуды напряжения (на положительной полуволне) на газоразрядном промежутке.



Транзиентные явления средней атмосферы Земли (1): наблюдения

Фрагмент фотографии синей струи, выросшей с вершины штормовой тучи в районе острова Реньон (Индийский океан) и её укрупненное инвертированное изображение, выполненные *П. Хьюетом* в 1997 г. Основание струи находится приблизительно на высоте 18 км, а достигает она высоты 35 км.

Wescott E.M., Sentman D., Stenbaek-Nielsen H.C., Huet P., Heavner M.J., Moudry D.R. New evidence for the brightness and ioniszation of blue starters and blue jets // J. Geophys. Res. 2001. Vol. 106, No. A10. P. 21549–21554.

## Синие струи (2): наблюдения



Временная последовательность образования синей струи: 1 - разряд в облаке, 2-8 пульсирующая синяя струя. Фотографии выполнены астронавтом Андреасом Могенстерном из космоса, с международной космической станции .

Chanrion, O., Neubert, T., Mogensen, A., Yair, Y., Stendel, M., Singh, R., & Siingh, D. (2017). Profuse activity of blue electrical discharges at the tops of thunderstorms. Geophysical Research Letters.

# Синие струи (3): подходы к теоретическому моделированию



Упрощенная модель пространственного распределения зарядов в грозовой туче и сценарий развития синей струи: *v*<sub>j</sub> – вектор скорости синей струи, *j*<sub>g</sub> – плотности тока в восходящем и нисходящем потоках воздуха, *j*<sub>j</sub> и *j*f – плотность тока лидера и атмосферы при ясной погоде, соответственно.

Surkov, V.V., Hayakawa, M., 2012. Under laying mechanisms of transient luminous events: a review. Ann. Geophys. 30, 1185–1212.

Raizer, Y. P., Milikh, G. M., and Shneider, M. N.: On the mechanism of blue jet formation and propagation, Geophys. Res. Lett., 33, L23801, 2006.

Roussel-Dupr'e, R., Symbalisty, E., Taranenko, Y., and Yukhimuk, V.: Simulations of high-altitude discharges initiated by runaway breakdown, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 60, 917–940, 1998.

## Синие струи (4): экспериментальная установка



Схема установки: 1 – электрод под плавающим потенциалом; 2 – высоковольтный электрод; 3 – кварцевая камера с внутренним диаметром 5 см; 4, 5 – вводы с уплотнениями; 6 – генератор; 7 – подача и откачка воздуха; 8 – спектрометр; 9 – дополнительный съёмный электрод. С = 10 пФ, R = 50 Ом.

Панарин А.А., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. Лабораторная демонстрация в воздухе красных и голубых диффузных мини-струй // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. №3. С. 243-253.

## Синие струи (5): лабораторная демонстрация



Влияние давления воздуха на отросток и область плазменных пуль. Цифры показывают величину давления в Торр. Высота кадров – 18 см. f = 53 кГц

Соснин Э.А., Бакшт Е.Х., Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. Мини стартеры и мини голубые струи в воздухе и азоте при импульсно-периодическом разряде в лабораторном эксперименте // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 105, № 10. С. 600-604.

## Синие струи (6): лабораторная демонстрация



Зависимость длины отростка *ls* (O), области распространения плазменных «пуль» *l*a ( $\triangle$ ) и полной длины струи *l* ( $\Box$ ) от давления в воздухе (а) и азоте (б) при пиковом значении напряжения на высоковольтном электроде *U*a ~ 8.5 кB. *f* = 53 кГц

Соснин Э.А., Бакшт Е.Х., Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. Мини стартеры и мини голубые струи в воздухе и азоте при импульсно-периодическом разряде в лабораторном эксперименте // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 105, № 10. С. 600-604.

## Синие струи (6): спектры излучения



Спектры излучения на различных высотах h при давлении воздуха 120 Торр и положительной полярности импульса напряжения. f = 50 кГц.

Сходство с результатами теоретических расчётов:

Triplett, L.A., Roussel-Duprer, R.A., 2005. Prediction of Spectral Characteristics of Sprites from a Satellite, URSI, New Delhi.

## Выводы (3)

5) Создана установка для экспериментального моделирования синих струй в лабораторных условиях.

6) Полученные данные позволяют заключить, что апокамп в условиях низких давлений обладает признаками, присущими синим струям (и стартерам), наблюдаемым в природе, а именно:

--- Они формируются только при положительной полярности напряжения на высоковольтном электроде, при разряде на электрод с плавающим потенциалом, что соответствует модели синих струй, предложенной в Pasko V.P. and George J.J. Three-dimensional modeling of blue jets and blue starters // J. Geophys. Res. 2002. Vol. 107, No. A12. 1458.

--- Форма струи соответствует наблюдаемым в природе феноменам. Так при типичных для возникновения синих струй высотах ~ 14 км (соответствующих давлениям около 80 Торр) апокамп имеет форму конической струи с узким каналом прорастания. Стартеры в природе достигают больших высот до 30-50 км (что соответствует давлениям 8.98 и 0.59 Торр, соответственно). В таких условиях на нашей установке мы наблюдаем многократное расширение диаметра струи (что происходит и в природе).

--- Максимальная длина апокампа в лаборатории в воздухе получена при давлениях, в которых образуются голубые струи в природе. Замена воздуха на азот такого соответствия не даёт.

--- Спектры излучения апокампа при пониженных давлениях также соответствуют натурным наблюдениям, когда по мере продвижения струи вверх, она меняет свой цвет с белого на синий и голубой (14 км, 80 Торр) и далее на красно-оранжевый (< 30 км, < 10 Торр). Полученные спектры сходны со спектрами атмосферных стримеров на различных высотах, полученных в модели Triplett, L.A., Roussel-Duprer, R.A., 2005. Prediction of Spectral Characteristics of Sprites from a Satellite, URSI, New Delhi.

### Голубые струи: моделирование



Скорость стримера в зависимости от его длины.

Соснин Э.А., Найдис Г.В., Тарасенко В.Ф., Скакун В.С., Панарин В.А., Бабаева Н.Ю. О физической природе апокампического разряда // ЖЭТФ. 2017. Т. 152, Вып. 5(11). С. 1081-1087. Модель стримера в воздухе атмосферного давления:

Стример стартует от сферы радиусом  $R_{\rm sp}$ , заряженной до 10 кВ.

Двумерная (осесимметричная) модель, включающая транспортные уравнения ДЛЯ концентраций заряженных частиц и уравнение Пуассона для напряженности электрического поля. Модель учитывала процесс образования электронионных пар перед фронтом стримера при поглощении молекулами кислорода ионизующего излучения, генерируемого в области фронта.

Начальные условия:

1) электрон-ионное облако малого размера вблизи поверхности сферы имеет форму распределения Гаусса с максимальной концентрацией 10<sup>12</sup> см<sup>-3</sup> на оси вблизи поверхности сферы и полушириной 0.02 см.

2) Развитие стримера становится возможным благодаря тому, что газ вблизи канала разряда нагрет предшествующими разрядными импульсами настолько, что приведенное поле (отношение электрического поля к плотности газа), определяющее скорость ионизационных процессов, оказывается существенно превышающим значение в холодном газе.

## Выводы (4)

7) Сравнение данных экспериментов и моделирования свидетельствует в пользу того, что апокамп представляет собой стример, формирующийся благодаря замыканию разрядного промежутка проводящим каналом и прогреву газа вблизи канала.

8) Рассчитанные характеристики стримера (скорость распространения, диаметр) находятся в разумном согласии с измеренными параметрами апокампа в воздухе.



Российский научный фонд ОТКРЫТОСТЬ КОМПЕТЕНТНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТ

## Российские физики создали в лаборатории миниатюрные голубые струи и красные спрайты

источник: Газета.ru

28 февраля 2018

метки: СМИ о Фонде и грантополучателях

Сотру откры



Фото: Апокампы при различном давлении (в миллиметрах ртутного столба). Источник: Эдуард Соснин. Сотрудники Института сильноточной электроники СО РАН описали открытое и воспроизведенное ими в лабораторных условиях явление апокампа — формирование голубых и красных струй плазмы, возникающих на изгибе канала импульсно-периодического электрического разряда в различных газах. Открытое явление можно использовать для исследования голубых струй (джетов) и красных спрайтов — световых явлений, наблюдаемых в верхних слоях атмосферы на высотах в десятки километров и образующихся естественным путем над областями с грозовой активностью. Подробнее результаты исследований ученых описаны в журналах *Physics of Plasmas* и «Письма в ЖЭТФ», а также в книге из серии Horizons in World Physics. Исследование диффузных разрядов атмосферного давления и их применений было поддержано Российским научным фондом (РНФ).

Новое явление ученые впервые наблюдали во время экспериментов по созданию диффузной плазмы атмосферного давления, проводимых в рамках проекта РНФ. Было замечено, что перпендикулярно к середине канала

разряда появлялись струи плазмы. Повторив эксперименты, ученые установили место, в котором возникает струя — область изгиба плазменного канала, и явление получило название апокампа от греческих слов από — «от» и κάμπη — «изгиб».



Casimir forces) as well as those found out of equilibrium (such as radiative heat transfer). So far, this concept relies on the optical linearity of the involved objects.

In this article, fluctuational electrodynamics is adapted to describe also objects with nonlinear optical response, including the amendment of the noise (so called flytor currents). Most notably, electric currents fluctuating because of noise and induced currents due to incident waves become coupled, giving rise to new phenomena. As an example, the Casimir force between two plates with nonlinear optical properties is computed, which has a different distance dependence at close proximity compared to the linear case.

#### H. Soo and M. Krüger,

'Fluctuational electrodynamics for nonlinear media', EPL 115, 41002 (2016)

### PLASMA PHYSICS Novel plasma jet offshoot phenomenon explains blue atmospheric jets

### Russian physicists identify mysterious right-angle side-jet occurring off the plasma arc in air at ambient pressure conditions

Ionised matter, like plasma, still holds secrets. Physicists working with plasma jets, made of a stream of ionised matter, have just discovered a new phenomenon. Indeed, the authors found a



A Example of the apokamp effect in a plasma jet.

new type of discharge phenomenon in an atmospheric pressure plasma. It has been dubbed apokamp—from the Greek words for offfand bend; because it appears at a perpendicular angle to where plasma jets bend. Their findings have been recently published and are particularly relevant for the development of novel applications in medicine, health care and materials processing because they involve air at normal atmospheric pressure, which would make it cheaper than applications in inert gases on ritrogen. This phenomenon can help explain the blue jet phenomenon identified in 1994 in the upper atmosphere, where strange upwards-facing jets develop from thunderstorm clouds. ■

### E.A. Sosnin, V.A. Panarin, V.S. Skakun, E. Kh. Baksht and V.F. Tarasenko,

"Dynamics of apokamp-type atmospheric pressure plasma jets", Eur. Phys. J. D 71, 25 (2017)

### ACCURATE PHYSICS Accurately evaluating on <sup>40</sup>Ca<sup>+</sup> optical clock BBR temperature

Optical clock based on "Ca" single-ion is a promising option in the program of transportable optical clocks. In such system, one of the largest contributions to the systematic uncertainty is blackbody radiation (BBR) shift. The uncertainty of BBR shift is basically dependent on the uncertainty of the BBR shift coefficient and the uncertainty of temperature measurement on the trap environment which both have a contribution at 10<sup>-17</sup> level in fractional frequency units. We report a careful evaluation of BBR temperature rise seen by "Ca" ion confirmed in



← → С Сервисы	🔒 Надежный   https://www.eurekalert.org/pub_releases/2017-02/s-npj022017.php						
	🖰 Новая в	вкладка <b>S</b> D Novel p	lasma jet offsi 🛛 了	Novel plasma je	et offsi 🖉 XIII Mex	кду <mark>наро</mark> дная	
HOME	NEWS	MULTIMEDIA	MEETINGS	PORTALS	ABOUT	LOGIN	REGISTER

PUBLIC RELEASE: 20-FEB-2017

## Novel plasma jet offshoot phenomenon explains blue atmospheric jets

Russian physicists identify mysterious right-angle side-jet occurring off the plasma arc in air at ambient pressure conditions

SPRINGER



🖨 PRINT 🛛 🖾 E-MAIL

Ionised matter, like plasma, still holds secrets. Physicists working with plasma jets, made of a stream of ionised matter, have just discovered a new phenomenon. Indeed, Eduard Sosnin from the Institute of High Current Electronics, Russian Academy of Sciences in Tomsk, Russia, and colleagues found a new type of discharge phenomenon in an atmospheric pressure plasma. It has been dubbed apokamp - from the Greek words for 'off' and 'bend', because it appears at a perpendicular angle to where plasma jets bend. Their findings have been recently published in EPJ D and are particularly relevant for the development of novel applications in medicine, health care and materials processing because they involve air at normal atmospheric pressure, which would make it cheaper than applications in inert gases or nitrogen.

The authors established the conditions for the phenomenon to occur. It takes two electrodes positioned at an angle to each other, together with electric field lines which are curved upward between the two electrodes. It requires not one but both electrodes to have a high voltage to obtain an apokamp plasma jet, which typically develops from the bending point of the discharge channel. The apokamp can vary from a single needle to a 6-7-cm-long conical jet attached to the arc of the plasma current channel.

Using high-speed photography data on the apokamp dynamics, the authors elucidated its nature as consisting of ionisation waves - so-called plasma bullets - that move with a velocity of 100-220 km/s. Such plasma bullets have previously been detected in inert gases and in nitrogen in the presence of negatively charged gas.

The next step would require gathering sufficient data to build a model that can further explain the apokamp phenomenon. This phenomenon can help explain the blue jet phenomenon identified in 1994 in the upper atmosphere, where strange upwards-facing jets develop from thunderstorm clouds.



### **УТВЕРЖДЕНА**

Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642

### СТРАТЕГИЯ

### научно-технологического развития Российской Федерации

г) переход к высокопродуктивному и экологически чистому агро- и аквахозяйству, разработку и внедрение систем рационального биологической химической и применения средств защиты сельскохозяйственных растений И хранение животных, И эффективную переработку сельскохозяйственной продукции, создание безопасных и качественных, в том числе функциональных, продуктов питания;

## Спасибо за внимание!

## Продукты распада плазмы (1): установка



Установка для абсорбционной спектроскопии продуктов распада плазмы: 1 – источник питания; 2 – повышающий транс-форматор; 3 – высоковольтный электрод; 4 – электрод, находящийся под плавающим потенциалом; 5 – диэлектрическая пластина; 6 – воронка; 7 – оптическая кювета; 8 – патрубок для откачки газовой смеси; 9 – световоды; 10 – опорный источ-ник излучения; 11 – спектрофотометр. Пунктирные стрелки показывают направление движения воздуха через установку

## Продукты распада плазмы (2): спектры



Спектры поглощения продуктов плазмы: 1, 2 – в режиме с апокампом; 2 – в режиме коронного разряда

## Первые выводы по прикладной работе

В продуктах распада плазмы разряда в режиме с апокампом выявлено преобладающее содержание окислов азота.

Создана экспериментальная установка для изучения действия продуктов распада плазмы разряда в режиме с апокампом на семена сельскохозяйственных культур.

При действии указанных продуктов распада плазмы на семена ржи и пшеницы (сорта, значимые для Томской области) получен фунгицидный эффект – снижение обсеменности грибками поверхности зерен примерно на порядок.

## Апокамп в эксиплексной среде (1)



Внешний вид апокампа в эксиплексных средах при f = 53 кГц: а) смесь Kr:Cl<sub>2</sub> = 50:1, p = 30 Торр; b) смесь Xe:Cl<sub>2</sub> = 50:1, p = 15 Торр

Соснин Э.А., Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Кузнецов В.С. Апокамп на основе барьерного разряда в смесях ксенона и криптона с молекулярным хлором // Прикладная физика. 2017. Т. 17. № 1. С. 21–25.

## Апокамп в эксиплексной среде (2)





Осциллограммы импульсов излучения на различных высотах, синхронизированные во времени.  $\Delta$  - задержка сигнала с фотодиода I(PD) на высоте h = 18 cm относительно сигнала из области канала разряда, инициирующего апокамп. Смесь Xe:Cl<sub>2</sub> = 30:1, p =30 Torr, f = 53 kHz,  $\delta = 45$  mm.

Смесь	Давление <i>p</i> , Torr	Высота <i>h</i> , mm	Оценка скорости <i>v</i> , km/s
	15	80	154
	15	150	59
$Xe:Cl_2 = 30:1$	20	60	82
	30	90	7
	60	10	16
$V_{m}C_{1} = 20.1$	15	85	170
$K_1.C_1 = 50.1$	30	125	70

Оценки скорости распространения волны ионизации апокампа до различных расстояний h от основного разряда при изменении давления смесей криптона и ксенона с хлором (f = 53 kHz,  $\delta =$ 45 mm)