

# ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

## ГАЗОВЫХ ГИГАНТОВ

Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н.

Александр Иванович Бажанов, член-корр. РИА и МИА

*Космос является уникальной газодинамической лабораторией, в которой, как нигде на Земле, воспроизводятся экстремальные параметры и где можно наблюдать воочию великолепные турбулентные состояния атмосферы планет, их динамику и взаимопревращения. Газодинамические картины Космоса удивляют, обескураживают и даже пугают. Процессы в атмосферах планет и их спутников превышают мыслимые и немыслимые параметры газодинамических процессов, происходящих только может быть в камерах ЖРД, РДТТ или ЯРД. Анализ уникальных явлений позволил обобщить некоторые фундаментальные теоретические понятия.*

*Space is unique gas dynamic laboratory, in which as anywhere on the Earth, extreme parameters are reproduced and where it is possible to observe personally magnificent turbulent conditions of atmosphere of planets, their dynamics and interconversions. Gaz dynamics pictures of Space surprise, discourage and even frighten. Processes in atmospheres of planets and their companions exceed conceivable and inconceivable parameters gas dynamic processes occurring only can be in chambers of liquid rocket engines, rocket engines of firm fuel or nuclear rocket engines. The analysis of some unique phenomena has allowed to generalise some fundamental theoretical concepts..*

Ключевые слова: турбулентность, вихрь, торсионный жгут.

Keywords: turbulence, a whirlwind, torsion harness.

Вновь возвращаясь к турбулентности Космоса, следует отметить её уникальную, поистине неповторимую особенность проявляться в совершенно неожиданных ситуациях и формах, которые всего вероятнее невозпроизводимы на Земле. Это и понятно, ведь Земля - это всего лишь подмножество Космоса бесконечно малого порядка. По сравнению со Вселенной - это её дифференциал. Ещё долго, а точнее всегда, пока существует, Человечество будет наблюдать великолепные отличия космических явлений от земных. Оно будет с благодарностью пополнять багаж своих знаний, внимательно изучая это вечно-бесконечное пространство.

Внимательное исследование проблем Космоса и планет Солнечной системы даёт на сегодняшний день однозначный ответ: "В других местах, помимо Земли, нас не ждут". Да, не ждут! Колонизация других планет на сегодняшний день - невозможна. Слишком много денег тратим на разборки внутри человеческого общества. Да и знаний маловато. Советские «Венера» (рис. 1) и «Марс», а также американские космические проекты "Вояджер-1" и "Вояджер-2", "Новые горизонты", "Кассини", лунная миссия и другие, вселяют в Человечество надежду на светлое будущее. Человек всегда хотел найти разум во Вселенной для верховного общения и новые места для обитания. Он всегда будет смотреть со своей маленькой планеты в Космос и, чтобы ему это не стоило, стремиться туда.



Рис. 1. Космический аппарат "Венера-9" (1975 г.)

На сегодняшний день из всех планет Земля наиболее пригодна для человека. Именно он для неё и создан. Здесь есть вода, атмосфера и магнитное поле. Гравитация и термогазодинамические условия являются комфортными для жизни на её поверхности. Этого нельзя сказать про другие планеты и их спутники. Наиболее обсуждаемая планета Марс, к сожалению, пустынна и отличается жестокими длительными пыльными бурями. Возможность поселиться в жидкой среде Юпитера и плавать в безбрежном океане аммиака и водорода - малопривлекательна. Куда лететь? На Европу? Ганимед? Ио? Пока не понятно. Но! Исследования продолжаются. Видимо, самое важное пока в этих исследованиях - антропологический аспект. На примере других планет возможно делать проекцию на развитие нашей планеты. Как всегда по аналогии. Также по аналогии проецировать происходящие на других планетах процессы на возможные процессы в будущем на Земле.

Космос, как уже говорилось, является большой газодинамической лабораторией с неисчерпаемыми примерами турбулентных проявлений с экстремальными параметрами.

### Динамика газовых планет

Движение поверхностных слоёв газовых планет всегда сопровождается возникновением вихрей большой мощности, торсионных жгутов и скоростным относительным перемещением газовых слоёв различной плотности. Степень турбулентности, как и на Земле, определяется режимом скоростей, давлений и температур. Чем плотнее атмосфера и выше температура планеты, тем турбулентные эффекты сложнее и необыкновенно дифференцированы. На всех газовых гигантах Солнечной системы - Юпитере, Сатурне, Уране и Нептуне - эти эффекты проявляются весьма рельефно. При упоминании этих планет в воображении всплывают такие космические явления как мегаштормы, сверхураганы и т.п. Эти природные явления обусловлены особенностями термодинамического состояния планет. Многие из планет из-за разности температур на полушариях омываются высокоскоростными потоками, направленными по касательной к поверхности планеты.

Другие планеты из-за огромной энергии изнутри испытывают радиальную конвекцию. Некоторые из-за большой гравитации обдуваются однонаправленным поступательным потоком газов из атмосферы. В результате такой набор причин, влияющих на движение атмосферы и собственно толщу самой планеты, обуславливают быстротекущие микропроцессы турбулентности.

На Юпитере самым ярким эффектом турбулентного движения является Большое красное пятно размером 24 на 12 тыс. км. Это самый большой вихрь, зафиксированный в Солнечной системе. Этот вихрь вращается с огромной скоростью, которая на периферии достигает величины 480 км/ч (~133 м/с). Такая скорость соответствует скорости продуктов сгорания в камере ЖРД. Этот вихрь не имеет "глаза", он сплошной, что говорит о его принципиальном отличии от воронкообразного вихря при урагане. Вращение его определяется смежными касательными потоками, направленными в противоположные стороны. Совершенно очевидно, что эти потоки порождают также торсионные жгуты, которые трудно зафиксировать в опыте на Земле, а в природе они редко встречаются в силу их пространственной радиально-продольной парности [1]. Уникальная картина, иллюстрирующая это устойчивое турбулентное состояние, очень рельефно проявляется на Юпитере в области экватора вблизи Большого красного пятна (рис. 2). При внимательном рассмотрении в этой области можно увидеть парные жгуты, компенсирующие смежные кручения потоков и гарантирующие их устойчивость.

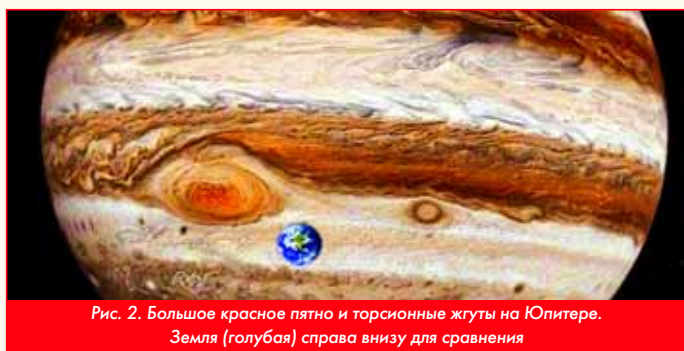


Рис. 2. Большое красное пятно и торсионные жгуты на Юпитере. Земля (голубая) справа внизу для сравнения

Наблюдениями установлено, что экваториальная поверхность шарового слоя вращается противоположно вращениям полярных сегментов атмосферы планеты. Этот потрясающий эффект сегодня наблюдается только на Юпитере. Точного объяснения ему пока ещё нет, но это может происходить из-за инерционности ядра из металлического водорода в центре планеты и конвективных потоков, порождаемых внутренними источниками энергии из недр планеты, в два раза превышающих энергию, поступающую от Солнца. Такой S-образный профиль скорости вращения предусматривает область торможения потока до нуля.

Причём на границе соприкосновения таких стратифицированных потоков возникают высокоградиентные вихри Кельвина-Гельмгольца (рис. 3). Эти вихри полностью два раза опоясывают планету по окружности, что придаёт ей вид планеты бушующего урагана.



Рис. 3. Высокоградиентные вихри Кельвина-Гельмгольца на Юпитере

Вторым газовым гигантом является Сатурн. Это - планета штормов. Вихри водяного пара, дождь и лёд господствует в атмосфере этой планеты. Турбулентные высокоскоростные течения здесь повсюду. Ярким проявлением турбулентности на этой планете является гигантский гексагон на северном полюсе [2]. Причина его появления в настоящее время является предметом дис-

куссии учёных. Авторы в цитируемой работе идентифицировали его как конвективную ячейку Бенара. Турбулентность на Сатурне по структуре идентична турбулентности на Юпитере в области экватора (рис. 4). Здесь также имеются различные торсионные устойчивые образования и градиентные волны Кельвина-Гельм-



Рис. 4. Торсионные жгуты на Сатурне

гольца. Спутник Сатурна Титан также отличается мегабурями, но из метана. На нём отмечается полоса белых метановых облаков, периодически проливающих на поверхность метановые дожди.

К газовым планетам причисляют и Уран. Но он в основном состоит из льда, окруженного гелиево-водородной атмосферой. Это самая холодная планета Солнечной системы. Она имеет очень низкую плотность атмосферы и очень мало выделяет из своих недр энергии в виде тепла, в силу чего турбулентность на этой планете не отличается активностью. Уран не является бушующей планетой с мощными штормами и мегациклонами. На этой планете царствует предельная форма турбулентности - ламинарность. И хотя скорость в атмосфере достигает 500 м/с, это - самая тихая и голубая планета Солнечной системы (рис. 5).

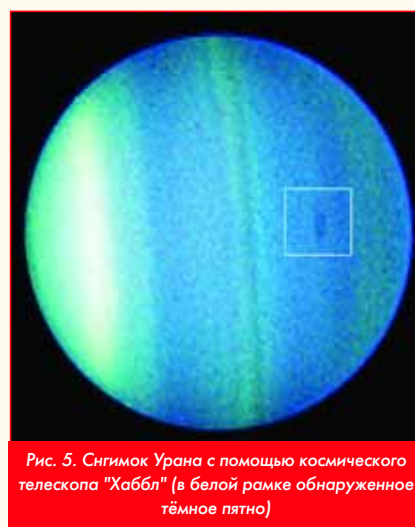


Рис. 5. Снимок Урана с помощью космического телескопа "Хаббл" (в белой рамке обнаружено тёмное пятно)

А вот у Нептуна весьма плотная атмосфера. Тем не менее она очень подвижна. В обсерватории Кека зафиксировали в атмосфере Нептуна мощные штормы. Были отмечены высокие белые облака и скоростные потоки до 2100 км/ч (580 м/с). Это самые быстрые ветры в Солнечной системе. По-видимому, причиной таких ветров является огромная энергия, которую производит Нептун внутри своих недр. Эта энергия намного больше той энергии, которую даёт ему Солнце.

В 1989 г. во время пролёта аппарата "Вояджер-2" в южном полушарии планеты было выявлено Большое тёмное пятно, точно такое же, как Большое красное пятно на Юпитере (рис. 6). Это пятно - могучий ураган, и он является визитной карточкой Нептуна.

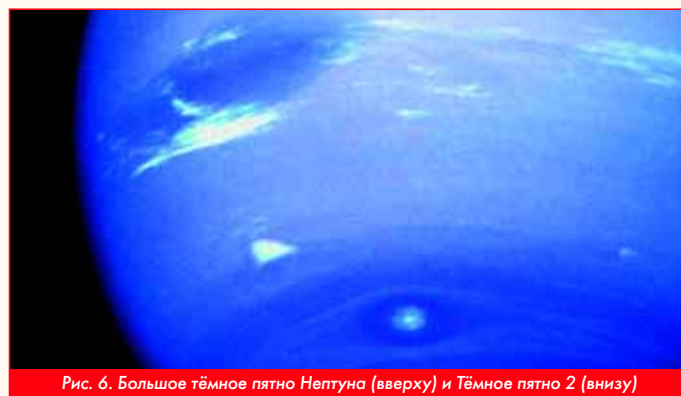


Рис. 6. Большое тёмное пятно Нептуна (вверху) и Тёмное пятно 2 (внизу)



**Устрашающая свирепая турбулентность Космоса**

Далее речь пойдёт о Венере и двух экзопланетах, обнаруженных у ближайших звезд в нашей галактике - Млечный путь.

Венера не является газовым гигантом, как не является и гигантом вообще. Но атмосфера её уникальна. На первых этапах её изучения она преподнесла сюрпризы и продолжает преподносить их и сейчас. Так, первые спускаемые аппараты были раздавлены в атмосфере Венеры, давление которой у поверхности оказалось почти в сто раз превышающее земное. Атмосфера Венеры состоит в основном из углекислого газа (96,5 %), а сплошные облака - из серной кислоты. Её температура у поверхности тоже не совсем обычная: она высокая, порядка 464°C, и практически не имеет разницы между дневной и ночной сторонами, а так же между экватором и полюсами. И поэтому тем более не понятен механизм возникновения и поддержания высокой скорости потоков, достигающих величин порядка 100 м/с на высоте верхнего слоя облаков. При снижении спускаемого аппарата станции "Венера-8" в 1972 г. измерение скорости ветра на разных высотах показало, что у верхней границы облаков она составляет 100 м/с, а у поверхности - всего 0,5 м/с.

Ещё одним неожиданным открытием стало то, что с момента начала наблюдений скорость вращения облаков заметно увеличилась. Если в 2006 г. скорость ветров, дующих с востока на запад, на низких широтах составляла 85 м/с, то спустя шесть лет она увеличилась почти на треть - до 119 м/с.

Ученые предполагали, что наличие высокоскоростных потоков должно приводить к появлению в районе полюсов мощных вихрей. И предположение получило подтверждение - в 2006 г. на южном полюсе Венеры были обнаружены два находящихся рядом и вращающихся в одном направлении воронкообразных вихря (рис. 7). Они существовали рядом достаточно долго, вплоть до 2010 г., когда было обнаружено исчезновение одного из них.

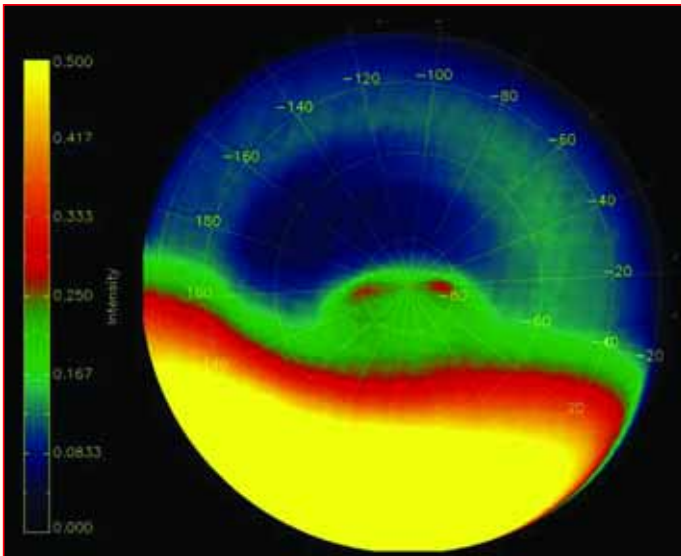


Рис. 7. Фотографии в инфракрасном диапазоне двойного вихря на Южном полюсе Венеры (получены космическим аппаратом "Venus Express" в 2006 г.)

Совсем недавно появилась возможность открывать и изучать планеты, находящиеся в других звёздных системах. И в первую очередь были обнаружены планеты, которые по своим размерам соответствовали гигантам Солнечной системы. Один из них - Осирис, находится на расстоянии 150 световых лет от нас и вращается вокруг звезды HD 209458 в созвездии Пегаса. Это одна из самых изученных экзопланет, обнаруженных за пределами Солнечной системы.

Учёные, наблюдающие за Осирисом с помощью космического телескопа "Хаббл" (Hubble Space Telescope), установили, что там дует ветер из угарного газа (CO), скорость которого составляет примерно 2 км/с (7,5±2,5 тыс. км/ч). Причина такой скорости ветра кроется в сильном разогреве планеты её звездой, т.к. удалена она от звезды всего на 7 млн км (1/8 расстояния

между Меркурием и Солнцем). Кроме того она всегда обращена к светилу одной стороной, температура поверхности которой достигает 1000 °С. Другая сторона, не получая энергии, значительно холоднее. Разница температур вызывает сильные ветра, а исходя из состава атмосферы - угарный газ - можно предположить, что течение близко к критическому звуковому. В силу удаленности Осириса от Земли не удаётся рассмотреть рельефные узоры турбулентности, но, учитывая, что скорости приближаются к сверхзвуковым, можно предположить, что эти узоры весьма миниатюрные.

Особенностью этой планеты является то, что этот газовый гигант под действием высокой температуры и огромного давления не может удержать свою атмосферу. Различные газы, находящиеся в атмосфере, преодолевают гравитационное поле планеты, разгоняясь до огромных скоростей. Благодаря чему HD 209458 b стала уникальной планетой, имеющей свой кометоподобный хвост, состоящий из потока планетных газов (рис. 8).

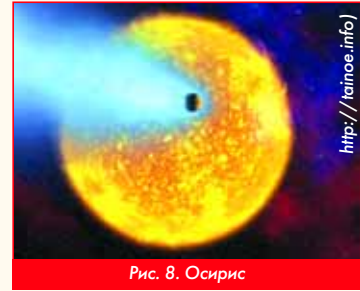


Рис. 8. Осирис

Известна ещё одна планета - ярко-голубой газовый гигант HD 189733 Ab - обращающаяся вокруг оранжевого карлика и находящаяся на расстоянии 63 световых года. О ней известно уже достаточно много. Во-первых, она находится от своего светила в 30 раз ближе, чем Земля от Солнца, а, во-вторых, её размер и масса немного больше Юпитера. Времена оборота планеты вокруг своей оси и вокруг своей звезды равны, в результате она повернута к светилу всё время одной стороной. Из-за этого на освещённой стороне температура порядка 1500 К, а на тёмной - 1200 К.

С помощью космического телескопа "Спитцер" удалось измерить температуру атмосферы планеты, которая изменяется от 425 до 930 °С. При этом самое горячее место на поверхности смещено на 30° в направлении вращения планеты (рис. 9), что свидетельствует о том, что атмосфера движется, и движется с ураганной скоростью. По оценке учёных эта скорость приблизительно 9600 км/ч (свыше 2 км/с). Сразу же хочется сказать, что потоки сверхзвуковые. Но! Не надо торопиться с выводами. Не всегда такие скорости являются таковыми. Следуя теореме 5 [3], будем всегда помнить, что в сверхзвуковом потоке турбулентность отсутствует, а в данном случае скорость звука при критических условиях должна быть несколько больше чем 2500 м/с. Всё очень просто: такие критические скорости звука реализуются, например, для водорода (~4000 м/с) или гелия (~3000 м/с). Можно сделать вывод о том, что атмосфера этой планеты в основном состоит из названных элементов - у этих элементов очень маленькая молекулярная масса. На рис. 10 эта планета выглядит как обитаемая, благодаря голубому цвету, но он существует благодаря наличию в её атмосфере частичек силикатов, рассеивающих видимый свет в синей части спектра.



Рис. 9. Распределение температуры атмосферы на HD 189733 Ab



Рис. 10. Газовый гигант HD 189733 Ab

**Теоретические заметки**

Анализ рассмотренных турбулентных явлений на планетах Космоса даёт колоссальную пищу для умов учёных, а именно строит базис и добавляет к уже известным истинам бесценные новые сведения по процессам турбулентности и вообще по пространственной термогазодинамике. Совершенно очевидным становится утверждение о том, что мерой движения является не скорость  $\vec{V}$ , а импульс  $\vec{j} = \rho\vec{V}$  [4]. И тогда, в этом случае следует вернуться к основополагающим понятиям газовой динамики: ротор, кручение и ускорение потока. Эти понятия тесно связаны с такими понятиями как: материальная точка и материальная трубка тока. В работе [5] было дано определение материальной точки как элементарного континуума. Была названа граница перехода от дискретной совокупности точек (молекул) к непрерывной субстанции в виде конечного замкнутого объёма, в котором заключена непрерывная текучая среда. Характерный размер этого объёма был определён в 1000 Å. В соответствии с трудами замечательных русских учёных: Владимира Ивановича Шевцова (крупный специалист по проблемам гетерогенного горения, к.ф.-м.н.), Евгения Ивановича Гусаченко (специалист по проблемам дисперсности двухфазных продуктов сгорания металлизированных СТТ, к.ф.-м.н.) и Николая Николаевича Иванова (заслуженный изобретатель, академик МААНОИ, к.ф.-м.н.), плодотворно работающих над проблемами горения металлизированных твёрдых ракетных топлив и дисперсионной конденсированных продуктов их сгорания, появилась уникальная возможность представить названный дискретный переход в виде математической границы воспроизводимости функции распределения Больцмана и Максвелла в основополагающих уравнениях Энского [6] и перевода их в уравнения сохранения (импульса, энергии и т.д.). Граница перехода была определена экспериментально по результатам проведения и обработки нескольких сотен экспериментов по отборам конденсированных частиц из бомбы постоянного давления и модельных камер сгорания. Необходимая выборка из совокупного ансамбля частиц составляла именно 1000 штук. Было установлено, что после достижения этой величины функция распределения достоверно воспроизводилась.

В данной работе предлагается на базе определения материальной точки по аналогии ввести понятие материальной линии тока, т.е. элементарной трубки тока и считать трубкой тока цилиндрическую струйку диаметром 1000 Å. При этом макротечение становится возможным представлять как совокупность индивидуальных элементарных струек, имеющих конкретный импульс (количество движения)  $\vec{j}$ .

Рассматривая теперь космические эффекты под этим углом зрения, становятся понятными детали течения. Воронкообразные вихри на Венере объясняются простым переплетением спиральных трубок тока. Торсионные жгуты на Юпитере также представляются как плотно уложенные (подобно волосьям косам) трубки, строго упорядоченные друг относительно друга. В такой интерпретации не должно быть разрывов этих трубок, а турбулентность представляется не как пульсирующие оторвавшиеся куски этих трубок, а как непрерывное, уложенные в определённом порядке конские волосы.

Что же в этом случае представляет тогда вихрь? Обратимся к формализму Гамильтона:

$$\text{rot } \vec{j} = \text{rot} [\vec{\omega} \times \vec{r}],$$

где  $\vec{\omega}$  - материальная угловая скорость ( $\vec{\omega} = \rho\vec{\omega}$ ),

$r$  - радиус-вектор.

$$\text{Тогда } \text{rot} [\vec{\omega} \times \vec{r}] = \vec{\nabla} \times [\vec{\omega} \times \vec{r}] = \vec{\omega} (\vec{\nabla} \cdot \vec{r}) - \vec{r} (\vec{\nabla} \cdot \vec{\omega}).$$

В первой скобке дивергенция от радиуса-вектора равна 3, а во второй скобке дивергенция  $\vec{\omega}$  равна нулю. И получается, что  $\text{rot } \vec{j} = 3\vec{\omega}$ .

Последнее выражение подсказывает структуру воронкообразного вихря. Он трёхмерный и имеет продольную координату. В случае обычного плоского вихря, зависящего только от радиуса вращения,  $\text{rot } \vec{j} = 2\vec{\omega}$ .

Если рассматривать простое сдвиговое течение, например,



область пограничного слоя, то  $\text{rot } \vec{j} = \vec{\omega}$ .

При этом закон трения Ньютона, уже с учётом использования понятия импульса вместо скорости, можно записать

$$\tau = \nu \frac{d\vec{j}}{dn}.$$

Здесь  $\nu$  - кинематическая вязкость.

Кручение потока, которое наблюдается на Юпитере (рис. 2) и Сатурне (рис. 4), пока с точностью до константы можно представить в зависимости от момента количества движения  $K$ :

$$\text{rot rot } j \sim \text{rot } K,$$

а аналог кориолисова ускорения, точнее силы Кориолиса, как векторное произведение  $[\text{rot } \vec{j} \times \vec{j}]$ .

Отмеченные нововведения уже были использованы при выводе релаксационного уравнения импульсов и представлены в работе [7].

**Литература**

1. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Торсионные жгуты // Двигатель №4, 2014 г.
2. Ю.М. Кочетков, А.И. Бажанов. Турбулентность солнечной системы // Двигатель №3, 2016 г.
3. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Вектор Навье-Стокса // Двигатель №6, 2014 г.
4. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Вывод уравнения импульсов из начал термодинамики // Двигатель №3, 2016 г.
5. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Молекулярно-кинетический тензор // Двигатель №1, 2016 г.
6. Дж. Гиршфельдер, Ч. Картисс, Р. Берд. Молекулярная теория газов и жидкостей // М. изд. Иностранной литературы, 1961 г.
7. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Четвёртое начало термодинамики или первое начало термогазодинамики // Двигатель №4-5, 2016 г.

Связь с авторами: [swgeorgy@gmail.com](mailto:swgeorgy@gmail.com)



Художественная интерпретация двойного вихря на Венере