

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию **Поташова Марата Шамилевича**  
“Эффекты неравновесности и нестационарности в оболочках сверхновых”,  
представленную на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.03.02 — астрофизика и звёздная астрономия.

Исследование сверхновых звёзд остается одной из центральных задач астрофизики. Сверхновые представляют большой интерес для различных областей астрофизики, космологии и физики элементарных частиц и дают возможность глубже понять физику и эволюцию звёзд. Для адекватного объяснения многоволновых наблюдений сверхновых требуются подробные физические модели взрыва звезды, последующей стадии разлета оболочки и временной и спектральной эволюции остатка. Эта задача **актуальна**, так как в настоящее время не существует единой физической модели этих грандиозных природных явлений. В то же время, использование различных типов сверхновых в космологии как индикаторов расстояния до галактик крайне важно для решения проблем современной космологии. Для этой цели требуется учесть как многочисленные эффекты селекции, так и понять внутреннюю точность физических моделей, используемых разными авторами для анализа и интерпретации наблюдательных данных. Работа Поташова М.Ш. вносит значительный вклад в разрешение одного из противоречий в результатах разных исследователей в определении роли эффекта нестационарной ионизации водорода в оболочках сверхновых. В работе убедительно показана важность эффекта нестационарности в оболочках сверхновых типа II посредством аналитического и численного анализа различных модельных систем. Кроме того, в диссертации также развивается прямой метод определения расстояний до очень мощных сверхновых типа III – метод расширяющегося плотного слоя, без опоры на лестницу космологических расстояний, основанный на методе Бааде-Весселинка для цефеид. Метод чрезвычайно важен в связи с проблемой неопределённости в измерении параметра Хаббла.

Диссертационная работа М.Ш. Поташова состоит из введения, трёх глав, заключения, одного приложения и списка использованной литературы. Объем диссертации – 141 стр, включая 24 рисунка, 3 таблицы и списка литературы из 200 наименований.

Во **введении** (стр. 4–16) дан краткий обзор диссертации, обсуждаются её актуальность и новизна, обозначен личный вклад автора в совместные работы и приведены основные положения, выносимые на защиту. Обсуждается разногласие в определении роли эффекта нестационарной ионизации водорода в оболочках сверхновых, существующее в литературе, так как некоторые исследователи считают, что эффект нестационарности не важен для интерпретации спектров сверхновых II типа. Обосновывается важность развития нового независимого метода определения расстояний до сверхновых SNe II<sub>n</sub>, который не опирается на лестницу космологических расстояний.

**Глава 1** (стр. 17–59) посвящена исследованию эффекта нестационарности для простой чисто водородной системы. Модель представлена как двухуровневый атом водорода, помещённый в заданное поле излучение в континууме в некоторой надфотосферной области оболочки сверхновой типа II<sub>P</sub> на фазе плато кривой блеска. Сформулирован критерий проверки статистической равновесности системы на основе времени релаксации для определения важности эффекта нестационарности для любых временных масштабов. Если время выхода на статистическое равновесие мало по отношению к характерному времени изменения параметров оболочки сверхновой, то можно применять стационарное приближение. На больших временных масштабах стационарность нарушается всегда. На малых масштабах необходимо исследовать эволюцию времени релаксации. Аналитически и численно показано, что на эволюцию времени релаксации самое сильное влияние оказывает форма и темп изменения спектра окружающего жёсткого излучения в континууме между порогами Лаймана и Бальмера.

В **главе 2** (стр. 60–102) описывается авторский программный код LEVELS, моделирующий кинетику ионизации и возбуждения многозарядной плазмы в оболочке сверхновой. Алгоритм решает нестационарную систему интегро-дифференциальных уравнений кинетики населенности атомных уровней совместно с уравнением переноса в линиях в модифицированном приближении Соболева. Программный пакет требует заранее заданной гидродинамической и термодинамической модели оболочки сверхновой. Диссертант использует широко известный радиационно-гидродинамический код STELLA для создания такой модели. На примере SN 1999em рассчитана кинетика населённости уровней водородной плазмы и спектр выходящего излучения сверхновой в стационарном и нестационарном приближениях. Различие результатов в двух разных приближениях иллюстрирует важность эффекта нестационарной ионизации. Автор последовательно

рассматривает семь различных моделей, учитывающих всё большее число факторов и процессов. Численно показано, что добавление дополнительных уровней в модель атома водорода и учёт тонкой структуры довольно слабо влияет на эффект нестационарности, а учёт ударных процессов и примесей металлов приводит к уменьшению времени релаксации. Тем не менее, это время даже с учётом всех важных факторов остаётся намного большим, чем характерное время изменения параметров оболочки. Это позволяет заключить, что эффект нестационарности необходимо учитывать при моделировании спектров сверхновых второго типа. В этой же главе аналитически и численно при помощи кода LEVELS показано отсутствие эффекта нестационарности в линиях триплета атомов кальция. Проиллюстрировано, что эффект имеет место в оболочках сверхновых типа II<sub>n</sub> на примере сверхмощной SN 2006gy. Примечательно, что для сверхновой II<sub>n</sub> учёт эффекта нестационарности уменьшает силу узкой компоненты H $\alpha$  в дни роста кривой блеска, в то время как для сверхновой типа II<sub>P</sub>, эффект наоборот приводит к увеличению силы водородной линии. Таким образом, убедительно **доказано**, что эффект нестационарности важен при кинетических расчётах линий в оболочках сверхновых, содержащих водород.

В **главе 3** (стр. 103–110) описывается прямой метод для определения фотометрических расстояний до SN II<sub>n</sub>. Метод представляет собой разновидность метода Бааде-Весселинка и получил название «метод плотного слоя» (DSM), так как светимость SN II<sub>n</sub> обусловлена распространением тонкого плотного слоя в окружающей среде, образованного при столкновении выброса с окружающей оболочкой. Скорость такого слоя совпадает со скоростью движения фотосферы в дни роста кривой блеска. Её можно определить, анализируя широкие эмиссионных компоненты спектральных линий. В работе получено расстояние до сверхновой SN 2009ip, хорошо согласующееся с известным расстоянием до родительской галактики. Полученные диссертантом результаты подтверждают работоспособность метода и **доказывают**, что сверхновые типа II<sub>n</sub> могут быть использованы в качестве первичных индикаторов расстояния.

В заключении кратко сформулированы основные результаты диссертации.

Результаты диссертации Поташова М.Ш. изложены в 6-ти статьях, в том числе в 6-ти статьях в периодических изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов кандидатских диссертаций. Результаты работы многократно представлялись лично

автором на различных международных и отечественных конференциях и научных семинарах.

Диссертация Поташова М.Ш. написана четким и ясным языком. Отличительная черта работы – использование максимально строгих математических методов при оценке и анализе эволюции времени релаксации нестационарной системы кинетических уравнений для населенностей уровней. Главный **новый** результат работы – убедительное доказательство необходимости учета эффектов нестационарности при расчетах спектров сверхновых на стадии плато, а также оригинальный программный код LEVELS, позволяющий максимально точно рассчитывать такие спектры. Важным достижением диссертанта также является развитие метода плотного слоя для прямого определения расстояния до сверхновых типа II<sub>n</sub>, с использованием множества наблюдательных данных с учетом ошибок. **Достоверность** результатов подтверждается строгим математическим анализом модельных систем и сравнением с подробными численными расчетами, а также подтверждением полученных расстояний до сверхновых методом DSM с независимыми оценками. Все результаты прошли солидную апробацию на многих международных научных конференциях и семинарах и начали широко цитироваться (свыше 30 ссылок).

К диссертационной работе Поташова М.Ш. можно сделать несколько замечаний. На стр. 29, 3-я и 4-я формула снизу, в знаменателе размерности средней интенсивности окружающего непрерывного излучения пропущены стерадианы. То же замечание относится к подписи на оси ординат Рис. 1.10 на стр. 55. На стр. 39, 51, 57, 61, 65 (формула 2.11), 67, 69, 106, 114 замечены опечатки.

Приведенные замечания носят редакционный характер и несколько не снижают высокую научную ценность работы М.Ш. Поташова, выполненной на мировом уровне. Диссертация Поташова М.Ш. представляет собою законченный труд, отражающий высокую квалификацию соискателя в разных областях астрофизики и теоретической физики. Новые научные результаты, полученные автором диссертации, должны учитываться при моделировании спектров сверхновых и могут применяться при использовании сверхновых в космологии. Автореферат и опубликованные работы верно отражают содержание диссертации.

Результаты, полученные диссертации могут быть использованы при моделировании оболочек сверхновых, интерпретации спектральных наблюдений, а также для применения прямых методов определения фотометрических расстояний до сверхновых типа IIp специалистами ИТЭФ, ГАИШ МГУ, ИКИ, НГУ, АКЦ ФИАН, ФИАН, СПбГУ, КФУ, САО РАН, ФТИ им. Иоффе РАН, НАОЯ, ИРМУ, МРА и других отечественных и зарубежных институтов и обсерваторий.

Диссертационная работа М.Ш. Поташова **полностью отвечает** всем требованиям Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а сам автор, Поташов Марат Шамилович, безусловно **заслуживает** присвоения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 — “Астрофизика и звёздная астрономия”.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук,  
профессор, директор

Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга  
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова  
119234, г. Москва, ул. Университетский проспект д. 13,  
+7 (495) 939-28-58

e-mail: [director@sai.msu.ru](mailto:director@sai.msu.ru)

К.А. Постнов

11.05.2020

*Подпись К. А. Постнова верно!*  
*Новый отряд коммюнеров*

*А. Н. Хофманов*

