

## От широких атмосферных ливней к характеристикам первичных космических лучей

Н. Н. Калмыков<sup>a</sup>, Г. В. Куликов<sup>b</sup>

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

*E-mail: <sup>a</sup> kalm@eas.sinp.msu.ru, <sup>b</sup> kulikov@eas.sinp.msu.ru*

Статья поступила 30.08.2012, подписана в печать 15.09.2012.

Мы рассматриваем работы Д. В. Скобельцына, положившие начало современной физике космических лучей и физике высоких энергий. Д. В. Скобельцыным было показано, что в космических лучах имеются частицы, энергия которых существенно превосходит энергии, характерные для радиоактивного распада; открыто существование ливней космических лучей (т. е. одновременного попадания нескольких частиц в установку); выполнен цикл исследований широких ливней, приведший к открытию ядерно-каскадного процесса в атмосфере. Результаты, полученные Д. В. Скобельцыным, имели первостепенное значение для дальнейшего развития физики космических лучей.

*Ключевые слова:* космические лучи, ливни космических лучей, широкие атмосферные ливни, спектр первичных космических лучей.

УДК: 537.591.15. PACS: 96.50s-, 96.50sd.

### Введение

В этом году научная общественность отмечает два знаменательных для физики космических лучей события — 100-летие со дня открытия космических лучей в 1912 г. Виктором Гессом [1] и 120-летие со дня рождения Дмитрия Владимировича Скобельцына — ученого, внесшего огромный вклад в эту отрасль знаний и, что особенно важно для нас, в становление физики космических лучей в нашей стране.

Многогранная деятельность академика Д. В. Скобельцына — создателя и первого директора Института ядерной физики МГУ имени М. В. Ломоносова (1946–1961 гг.), многолетнего директора Физического института АН СССР (1951–1973 гг.), сменившего на этом посту С. И. Вавилова, а также крупного общественного деятеля выходит далеко за рамки физики космических лучей. В настоящей работе мы ограничимся лишь той стороной деятельности Д. В. Скобельцына, которая была связана с его непосредственными научными интересами, а именно с открытием Д. В. Скобельцыным ливней космических лучей и его работой по изучению широких атмосферных ливней, приведшей к установлению определяющей роли ядерно-каскадного процесса в возникновении и развитии широких атмосферных ливней.

### 1. Эксперименты Д. В. Скобельцына с камерой Вильсона в магнитном поле и открытие ливней космических лучей

Свои первые исследования в области физики микробиона Д. В. Скобельцын начал в 1923 г., приступив к экспериментальному изучению открытого в том же году комптоновского рассеяния. Для количественного изучения комптон-эффекта использовалась камера Вильсона, в которой регистрировались электроны отдачи. Его наблюдения дали непосредственное доказательство существования импульса у фотона, создаю-

щего эффект, и совершенно определенно подтвердили корпускулярную модель явления. В дальнейшем камера Вильсона была помещена в магнитное поле [2, 3], что оказалось чрезвычайно удачной идеей и важнейшим методическим улучшением. Впервые были измерены энергетические и угловые распределения электронов отдачи. В этих опытах было доказано, что теория Клейна–Нишины — первый строгий результат квантовой электродинамики — согласуется с экспериментом. Таким образом, работы Д. В. Скобельцына по исследованию комптон-эффекта стали надежной экспериментальной основой новой физической теории — квантовой электродинамики.

Позже, в 1931 г., Р. Милликен и Ч. Андерсен, использовавшие развитый Д. В. Скобельцыным метод камеры Вильсона в магнитном поле, наблюдали в камере Вильсона положительно заряженные частицы. Опираясь на вывод, сделанный Д. В. Скобельцыным, что положительно заряженные частицы должны иметь массу существенно меньшую, чем масса протона, Андерсен отождествил наблюдаемые им частицы с позитронами, предсказанными П. Дираком, за что получил Нобелевскую премию (подробнее см. [4]).

В работах с камерой Вильсона в магнитном поле Д. В. Скобельцын получил еще два выдающихся результата. Исследуя комптон-эффект в 1927 г. [2], он обнаружил в камере Вильсона наряду с электронами отдачи треки релятивистских частиц, приходящих из атмосферы. Их импульсы оказались больше 20 МэВ/с, и, следовательно, они не могли быть продуктами распада радиоактивных элементов. Этот вывод заложил основу современных представлений о космических лучах.

К 1927 г. уже было известно, что излучение, создаваемое космическими лучами, поглощается в веществе существенно слабее, чем гамма-излучение. Однако до опытов Д. В. Скобельцына все эксперименты проводились с ионизационными камерами, что позволяло измерять лишь ток, создаваемый космическими лучами.

Кстати, в те годы это название не было общепринятым, и чаще использовался термин «высотное излучение» [4].

Для понимания природы космических лучей принципиальное значение имело открытие в 1929 г. Д. В. Скобельцыным так называемых ливней космических лучей [3]. Изучая образование комптон-электронов гамма-лучами в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле, он обнаружил, что сравнительно часто на одной фотографии наблюдаются два или три следа частиц космических лучей. Группы частиц космических лучей, или ливни, встречались гораздо чаще, чем если бы частицы были независимы друг от друга, что свидетельствовало о наличии генетической связи между ними. Открытие ливней показало, что в космических лучах происходят процессы, не имеющие аналогов в области меньших энергий. Это обстоятельство сделало изучение космических лучей одним из наиболее актуальных направлений физики 1930-х гг. Образование ливней — первый открытый эффект физики высоких энергий. Эти работы Дмитрия Владимировича Скобельцына стали отправным пунктом для современной физики космических лучей, квантовой электродинамики и физики высоких энергий.

Много позднее, в 1982 г., Д. В. Скобельцын писал о результатах, полученных им в 1927–1929 гг.: «Это явление сразу же привлекло внимание физиков, работающих в данной области. Но, возможно, тогда еще не предвидели его значения, как ведущего, может быть, к наиболее интересной главе истории данной ветви науки. В действительности это явление оказалось предвестником новейшей физики частиц высоких энергий. Однако в течение относительно длительного времени его природа оставалась загадочной» [5].

Не будет преувеличением утверждать, что физика космических лучей в ее современном понимании началась именно с работ Д. В. Скобельцына. Более того, те же эксперименты стали и началом физики высоких энергий, причем именно космические лучи в течение длительного времени служили источником сведений о частицах таких энергий, получение которых было недоступно ускорительной технике.

Конечно, интенсивность космических лучей падает с ростом энергии, а также существуют неопределенности в энергии и типе космических частиц, но возможность иметь информацию (хотя и уступающую по качеству ускорительной) о взаимодействиях при самых высоких энергиях всегда привлекала и привлекает физиков. Даже сейчас, когда на коллайдере LHC достигнута эквивалентная энергия  $\sim 10^{17}$  эВ, не следует забывать, что, например, на Якутской установке зарегистрировано событие с оцененной энергией более  $10^{20}$  эВ [6].

## 2. Исследования широких атмосферных ливней и открытие ядерно-каскадного процесса

Хотя в космических лучах и был открыт целый ряд элементарных частиц [4], но все же возможность прямого изучения образования новых частиц во взаимодействиях космических лучей ограничивается сравнительно небольшими энергиями ( $\sim 1$  ТэВ). Подлинный прорыв в область энергий, которые можно назвать

сверхвысокими (выше  $\sim 10^{15}$  эВ) произошел, когда ученые получили мощный метод косвенного изучения потока космических лучей — путем регистрации создаваемых ими в атмосфере каскадов, содержащих огромное количество вторичных частиц, покрывающих значительную площадь. Это явление, названное широким атмосферным ливнем (ШАЛ), было обнаружено в 1938 г. П. Оже и его сотрудниками [7].

Открытие ШАЛ явилось закономерным этапом в изучении ливней космических лучей. В работе [7], выполненной на высоте 3450 м над ур. м., наблюдались совпадения срабатывания двух счетчиков Гейгера, разнесенных на значительные расстояния (до 300 м). Это указывало на существование в атмосфере групп частиц космических лучей, широко распределенных в пространстве. Зависимость числа совпадений  $C_2$  от расстояния  $D$  получила название кривой раздвижения. К этому времени уже существовала электромагнитная каскадная теория, количественно описывающая прохождение электронов и фотонов через атмосферу. Эта теория была разработана на базе квантовой электродинамики; первый ее вариант был развит в работе [8]. Более подробные сведения о становлении каскадной теории, в успехи которой значительный вклад внесли советские физики, можно найти в монографии [9]. Поэтому естественно, что экспериментальная зависимость  $C_2(D)$  была сопоставлена с предсказаниями электромагнитной каскадной теории.

К анализу кривой раздвижения Д. В. Скобельцын обратился в 1942 г. [10], используя для расчета теоретической зависимости  $C_2(D)$  имевшиеся к тому времени результаты каскадных расчетов. Из данных работы [7] следовало, что экспериментальная зависимость согласовывалась с теоретической для расстояний до 100 м, однако при увеличении  $D$  от 100 до 300 м Д. В. Скобельцын обнаружил систематические отклонения эксперимента от теории, особенно заметно число совпадений превышало расчет на больших расстояниях. Отсюда Д. В. Скобельцын делает заключение, что это расхождение связано с вмешательством дополнительных, возможно, мезонных механизмов и наличием на краях ливня проникающих частиц [10].

Мысль о необходимости привлечения для описания развития ливня в атмосфере дополнительных механизмов, предусматривающих участие в каскадных процессах проникающих частиц, высказана Д. В. Скобельцыным и в другой работе 1942 г. [11], в которой рассмотрены данные о высотном ходе ШАЛ в экспериментах Оже. Эта характеристика также противоречила выводам электромагнитной каскадной теории. Примечательно сделанное Д. В. Скобельцыным замечание: если бы первичными частицами, порождающими ливни при энергиях  $\sim 10^{14}$  эВ, были протоны, то они должны были бы «вызывать (через посредство некоторых промежуточных процессов) каскадные процессы столь же эффективно, как и электроны» [11].

Таким образом, уже в начале 1940-х гг. Д. В. Скобельцын пришел к выводу о неадекватности электромагнитной каскадной теории экспериментальным данным по ШАЛ.

Во второй половине 1940-х гг. Д. В. Скобельцын инициировал цикл систематических эксперименталь-

ных исследований аномалий в широких атмосферных ливнях. Экспериментальные методы, впервые им предложенные и примененные в этих работах, вошли в арсенал средств физики космических лучей и физики высоких энергий. Непосредственное руководство экспериментом на Памире осуществлял Г. Т. Зацепин, будущий академик и один из студентов первого выпуска (1941 г.) первой в СССР кафедры физики атомного ядра, созданной Д. В. Скобелъцыным в 1940 г. на физическом факультете МГУ.

Основную задачу исследования ШАЛ Д. В. Скобелъцын видел в том, чтобы продвинуться в область космических лучей самой высокой энергии. Для этого нужно было прежде всего получить надежные данные о пространственном распределении частиц на больших (> 300 м) расстояниях от оси ливня.

Первым шагом к этой цели стала реализация в 1946 г. на Памире на высоте 3860 м над ур. м. предложенной Д. В. Скобелъцыным установки из двух пар счетчиков, разнесенных на большое расстояние в горизонтальной плоскости [12]. Сигналы от двойных совпадений в каждой паре счетчиков передавались в центральный пункт, в котором регистрировались четырехкратные совпадения. Использование четырехкратных совпадений вместо двухкратных, как в работе [7], оказалось принципиально важным. Оно позволило существенно уменьшить влияние фона случайных совпадений и продвинуться от оси ливня на большие расстояния, вплоть до 1 км. В дальнейшем метод увеличения кратности совпадений нашел широкое применение и использовался для наблюдений частиц на еще больших расстояниях от оси ливня.

Заметим, что совпадения в раздвинутых счетчиках в эксперименте Оже наблюдались и на раздвижениях, превышающих 300 м, но характеристики аппаратуры, использованной в [7], не позволяли утверждать этого с полной определенностью, поскольку частота событий, обусловленных ШАЛ, оказалась того же порядка, что и частота случайных событий. Число четырехкратных совпадений в работе Д. В. Скобелъцына, Г. Т. Зацепина и В. В. Миллера при расстоянии между группами счетчиков 600 м оказалась в 500 раз больше расчетного, получаемого в предположении (ранее общепринятом), что средний радиус ШАЛ на высоте гор составляет 100 м. В своих последующих работах Д. В. Скобелъцын дал исчерпывающую теорию установок, состоящих из раздвинутых на большое расстояние групп счетчиков, нацеленных на регистрацию ШАЛ [13–15]. Им было показано, что при наличии степенного закона пространственного распределения плотности потока ливневых частиц ШАЛ (показатель  $n$ ) и степенного закона интегрального распределения первичных космических лучей по энергии (показатель  $\gamma$ ) число совпадений изменяется с расстоянием  $D$ , как  $D^{-(n\gamma-2)}$ , а с площадью счетчиков, включенных на совпадения, при данном  $D$ , как  $\sigma^\gamma$ .

Таким образом, итогом иницированных Д. В. Скобелъцыным работ по изучению ШАЛ явилось измерение как интегрального показателя спектра космических лучей, так и формы функции пространственного распределения частиц ШАЛ. Значение показателя  $\gamma \approx 2$  позволяло сделать вывод о наличии в космических

лучах частиц с энергией более  $10^{18}$  эВ, а полученные сведения о пространственном распределении ливневых частиц неопровержимо свидетельствовали об аномальной ширине реального ШАЛ по сравнению с предсказаниями электромагнитной каскадной теории.

Аномальная ширина и замедленный высотный ход ШАЛ [10, 11] нашли объяснение в рамках гипотезы о ядерно-каскадном процессе, который генерируется космическими лучами сверхвысоких энергий в земной атмосфере и образует основу ШАЛ. Эта гипотеза, сформулированная Г. Т. Зацепиным [16], в настоящее время является общепринятой и позволяет значительно точнее оценивать первичную энергию частиц, а следовательно, и их энергетический спектр, чем это было возможно в рамках чисто электромагнитной каскадной теории. Следует подчеркнуть, что необходимость существования такого рода процесса представлялась очевидной Д. В. Скобелъцыну еще в начале 1940-х гг. Поэтому открытие ядерно-каскадного процесса можно считать закономерным итогом работ по изучению ШАЛ, выполненных по инициативе и под общим руководством Д. В. Скобелъцына. В 1951 г. Д. В. Скобелъцын (совместно с Н. А. Добротиным и Г. Т. Зацепиным) был удостоен Сталинской премии за это выдающееся достижение.

### Заключение

Много позднее, оценивая результаты исследований ШАЛ, осуществленных в 1940–1950-е гг., Д. В. Скобелъцын писал [5]: «Эти эксперименты, выполненные Г. Т. Зацепиным с сотрудниками, были успешными. Они стали отправным пунктом развития более сложных исследований. Это составило очень увлекательную главу новейшей физики высоких энергий. В течение последующих десятилетий работа в этой области велась коллективом высококвалифицированных научных сотрудников Физического института АН СССР им. П. Н. Лебедева и МГУ им. М. В. Ломоносова».

Можно лишь сожалеть, что сам Д. В. Скобелъцын участвовал в дальнейшем развитии исследований по физике космических лучей лишь как руководитель двух институтов и более не публиковался. Но таковы были стиль работы этого выдающегося ученого и высокие требования, которые он к себе предъявлял. Из 70 научных работ, принадлежащих Д. В. Скобелъцыну, лишь 14 выполнены в соавторстве. Для него было неприемлемо соавторство в работе, в которой он не принимал непосредственного участия [17].

В русле идей Д. В. Скобелъцына было осуществлено прецизионное измерение первичного энергетического спектра космических лучей и обнаружен излом в этом спектре при энергии  $\sim 3 \cdot 10^{15}$  эВ [18].

Ведущую роль в этом сыграл еще один ученик Д. В. Скобелъцына — будущий академик Г. Б. Христиансен, который был дипломником Г. Т. Зацепина, а затем аспирантом Д. В. Скобелъцына.

В 1982 г. Д. В. Скобелъцын (совместно с Н. Н. Ефимовым, Г. Т. Зацепиным, Д. Д. Красильниковым, С. И. Никольским и Г. Б. Христиансеном) был удостоен Ленинской премии за цикл работ «Исследования первичного космического излучения сверхвысокой энергии».

Методические идеи Д. В. Скобельцына и полученные им фундаментальные результаты надолго определили направление исследований в области космических лучей.

Научная школа, созданная Д. В. Скобельцыным, убедительно продемонстрировала прочность своих основ в конце прошлого века, когда развитие науки в России испытывало значительные трудности. И в успешном развитии физики космических лучей в настоящее время велика роль традиций, связанных с именем Дмитрия Владимировича Скобельцына.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (госконтракт № 16.518.11.7051) и РФФИ (грант 11-02-00544-а).

### Список литературы

1. Hess V.F. // Phys. Ztsch. 1912. **13**. P. 1084.
2. Skobeltsyn D.V. // Zs. f. Phys. 1927. **43**. P. 354.
3. Skobeltsyn D.V. // Zs. f. Phys. 1929. **54**. P. 686.
4. Дорман И.В. Космические лучи, ускорители и новые частицы. М., 1989.
5. Антонов Е.Е., Глушков А.В., Деденко Л.Г. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1999. **69**. С. 614.
6. Скобельцын Д.В. Ранняя стадия изучения частиц космического излучения // 50 лет современной ядерной физики. М., 1982.
7. Auger P., Maze R., Grivet-Meger T. // Compt. Rend. 1938. **206**. P. 1721.
8. Vhabha H., Heitler W. // Proc. Roy. Soc. 1937. **159**. P. 432.
9. Беленький С.З. Лавинные процессы в космических лучах. М., 1948.
10. Скобельцын Д.В. // Докл. АН СССР. 1942. **37**. С. 16.
11. Скобельцын Д.В. // Докл. АН СССР. 1942. **37**. С. 61.
12. Skobeltsyn D.V., Zatsepin G.T., Miller V.V. // Phys. Rev. 1947. **71**. P. 315.
13. Скобельцын Д.В. // Докл. АН СССР. 1949. **67**. С. 45.
14. Скобельцын Д.В. // Докл. АН СССР. 1949. **67**. С. 255.
15. Скобельцын Д.В. // Докл. АН СССР. 1950. **73**. С. 1157.
16. Зацепин Г.Т. // Докл. АН СССР. 1949. **67**. С. 993.
17. Зацепин Г.Т., Розенталь И.Л., Чудаков А. Е. // Вестн. РАН. 1992. № 11. С. 64.
18. Куликов Г.В., Христиансен Г.Б. // ЖЭТФ. 1958. **35**. С. 635.

### From extensive air showers to the primary cosmic rays characteristics

N. N. Kalmykov<sup>a</sup>, G. V. Kulikov<sup>b</sup>

D. V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: <sup>a</sup> kalm@eas.sinp.msu.ru, <sup>b</sup> kulikov@eas.sinp.msu.ru.

We consider D. V. Skobeltsyn's works that marked the beginning of the contemporary cosmic ray physics and the physics of high energies. D. V. Skobeltsyn demonstrated that cosmic rays contain particles with energies far exceeding typical ones for radioactive decays; found the existence of cosmic ray showers (several particles hitting an array simultaneously); performed fundamental investigations of extensive air showers that led to the discovery of the nuclear cascade process in the atmosphere. The results obtained by D. V. Skobeltsyn were essential to the further development of the cosmic ray physics.

*Keywords:* cosmic rays, cosmic ray showers, extensive air showers, primary cosmic ray spectrum.

PACS: 96.50s-, 96.50sd.

Received 30 August 2012.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 6(2012).

### Сведения об авторах

1. Калмыков Николай Николаевич — докт. физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-23-69, e-mail: kalm@eas.sinp.msu.ru.

2. Куликов Герман Викторович — докт. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-57-30, e-mail: kulikov@eas.sinp.msu.ru.