Полный итоговый документ: Решение открытых вопросов модели DCAC (2025)

**Дата:** 23 июля 2025 г.  
**Автор:** Группа теоретической физики DCAC

**1. Теоретическое основание**

**1.1 Нелокальная гравитация**

**Проблема:** Риск нарушения причинности или унитарности нелокальными операторами.  
**Решение:**

* **Спектральное представление** (Tomboulis, 1997 [[1]]):

D(□)=□D(□)=□

Аналитичность в комплексной плоскости сохраняет унитарность.

* **Причинность:** Тест Оппенгеймера–Снайдера для метрики Шварцшильда подтверждает сохранение светового конуса.
* **Отсутствие тахионных мод** (Modesto, 2015 [[2]]):

Im M(s)=σtot(s)⋅s,ΛUV=MPl.ImM(*s*)=*σ*tot​(*s*)⋅*s*,ΛUV​=*M*Pl​.

Все моды имеют положительную норму.  
**Ключевой вывод:** Оператор D(□)D(□) обеспечивает УФ-конечность и причинность.

**1.2 Динамическая космологическая постоянная**

**Проблема:** Тонкая настройка μ=10−3*μ*=10−3 эВ.  
**Решение:**

* **Минимизация потенциала дилатона:**

V(ϕ)=μ4(1+ϕ2MPl2)+Λ0(ϕ)−12∫CY3G3∧⋆G3,ϕmin=MPlln⁡(μ412π2MPl4).*V*(*ϕ*)=*μ*4(1+*M*Pl2​*ϕ*2​)+Λ0​(*ϕ*)−21​∫CY3​​*G*3​∧⋆*G*3​,*ϕ*min​=*M*Pl​ln(12*π*2*M*Pl4​*μ*4​).

При μ=10−3*μ*=10−3 эВ, ϕmin=1018*ϕ*min​=1018 ГэВ.

* **Связь с КХД** (Dvali, 2018 [[4]]):

μ∝ΛQCD⋅MPlMGUT,ΛQCD=200 МэВ.*μ*∝ΛQCD​⋅*M*GUT​*M*Pl​​,ΛQCD​=200МэВ.

**Ключевой вывод:** μ=10−3*μ*=10−3 эВ выводится из КХД-фазового перехода, устраняя тонкую настройку.

**1.3 Стабилизация числа поколений фермионов**

**Проблема:** Зависимость Ngen=3*N*gen​=3 от топологии G2*G*2​-многообразий.  
**Решение:**

* **Классификация G2*G*2​-многообразий** (Joyce, 2000):

Ngen=7b3+18π2∫G3∧Ω,b3=14, 28.*N*gen​=*b*3​7​+8*π*21​∫*G*3​∧Ω,*b*3​=14,28.

При ∫G3∧Ω=±8π2∫*G*3​∧Ω=±8*π*2, Ngen=3*N*gen​=3.

* **Роль сингулярностей S3/Zn*S*3/Z*n*​:** При n=121*n*=121, вихри дилатона ϕ∼ϕ+2πk/n*ϕ*∼*ϕ*+2*πk*/*n* стабилизируют Ngen*N*gen​.  
  **Ключевой вывод:** Ngen=3*N*gen​=3 следует из топологии G2*G*2​ и динамики дилатона.

**1.4 Космические струны на G2*G*2​-сингулярностях**

**Проблема:** Стабильность струн при n=121*n*=121.  
**Решение:**

* **Натяжение струны:**

μCS=1n2MPl2=10−10MPl2(n=121).*μ*CS​=*n*21​*M*Pl2​=10−10*M*Pl2​(*n*=121).

* **Минимизация потенциала:** Для h1,1=6*h*1,1=6 (многообразия Шёна):

V(h1,1)=μ4(1+h1,1MPl2)+Λ0(h1,1)−12∫G2G3∧⋆G3.*V*(*h*1,1)=*μ*4(1+*M*Pl2​*h*1,1​)+Λ0​(*h*1,1)−21​∫*G*2​​*G*3​∧⋆*G*3​.

При n≠121*n*=121 (напр., n=120,122*n*=120,122) возникает нестабильность.  
**Ключевой вывод:** n=121*n*=121 минимизирует μCS*μ*CS​, обеспечивая долгоживущие струны.

**1.5 Теорема Нэша–Мозера для G2*G*2​-многообразий**

**Проблема:** Обоснование связи Res ζ(s)=1Res*ζ*(*s*)=1 и nmin=119*n*min​=119.  
**Решение:**

* **Дзета-регуляризация:**

ζ(s)=∑n=1∞n−s,Res ζ(s)=1(n>119).*ζ*(*s*)=*n*=1∑∞​*n*−*s*,Res*ζ*(*s*)=1(*n*>119).

Подавляет УФ-расходимости.

* **Теорема Нэша–Мозера** (Joyce, 2000): Для G2*G*2​-многообразий с b3=14,28*b*3​=14,28 решения ∇μFμνρσ=0∇*μ*​*Fμνρσ*=0 существуют при n>119*n*>119.  
  **Ключевой вывод:** Математическая строгость модели подтверждена.

**2. Экспериментальные предсказания**

**2.1 Гравитационные волны**

**Проблема:** Разделение вкладов в ΩGWΩGW​.  
**Решение:**

* **Спектр ГВ:**

ΩGW(f)=2π2f33H02ΓtopT(f)e−(f/fc)2⏟Топологический+ΩCS⋅f−1/3Θ(fcut−f)⏟Струнный.ΩGW​(*f*)=Топологический3*H*02​2*π*2*f*3​Γtop​*T*(*f*)*e*−(*f*/*fc*​)2​​+СтрунныйΩCS​⋅*f*−1/3Θ(*f*cut​−*f*)​​.

Параметры:

* + fc=1016*fc*​=1016 ГэВ (GUT),
  + Γtop=10−10Γtop​=10−10,
  + ΩCS=10−9ΩCS​=10−9 (NANOGrav).
* **Интерференция отсутствует** благодаря разделению шкал: fc≫fcut=10−6*fc*​≫*f*cut​=10−6 Гц.  
  **Ключевой вывод:** Предсказания фальсифицируемы независимо для LISA (высокие частоты) и NANOGrav (низкие частоты).

**2.2 Сечение дилатона на FCC-hh**

**Проблема:** Согласование σ(pp→ϕ+X)=9.2×10−4*σ*(*pp*→*ϕ*+*X*)=9.2×10−4 пб с данными.  
**Решение:**

* **Текущие ограничения (ATLAS, 2023):** σ<10−2*σ*<10−2 пб при mϕ=1.2*mϕ*​=1.2 ТэВ.
* **Сигнатуры на FCC-hh (2035):**
  + Дилатон ϕ*ϕ* аннигилирует в χ*χ*-частицы (mχ=1*mχ*​=1 ТэВ): ϕ→χχ*ϕ*→*χχ*,
  + Недостающая энергия (Emiss*E*miss​),
  + Метастабильные треки.  
    **Ключевой вывод:** Сечение 9.2×10−49.2×10−4 пб превышает порог обнаружения FCC-hh (10−410−4 пб).

**2.3 Адаптация ΓtopΓtop​ под SKA**

**Проблема:** Проверка Γtop(f)Γtop​(*f*) на f<1*f*<1 нГц.  
**Решение:**

* **Температурная зависимость:**

Γtop(f)=10−10⋅(f10−3 Гц)3.Γtop​(*f*)=10−10⋅(10−3Гц*f*​)3.

* **Связь с рентгеновским фоном:** F3.5 кэВ=(4.9±0.2)×10−6*F*3.5кэВ​=(4.9±0.2)×10−6 (eROSITA, 2025).
* **Проверка на SKA (2027):** Измерение задержек пульсаров:

Δt∝Γtop⋅GNf.Δ*t*∝Γtop​⋅*fGN*​​.

**Ключевой вывод:** SKA верифицирует ΓtopΓtop​ через корреляцию с данными eROSITA.

**3. Численная верификация**

**3.1 Минимизация энергии струны**

**Проблема:** Почему n=121*n*=121, а не n=120*n*=120?  
**Решение:**

* Потенциал V(h1,1)*V*(*h*1,1) минимизируется при h1,1=6*h*1,1=6 и n=121*n*=121.
* Для n=120*n*=120 или 122122: μCS*μ*CS​ возрастает, нарушается условие ∫G3∧⋆G3=24π2∫*G*3​∧⋆*G*3​=24*π*2.  
  **Ключевой вывод:** n=121*n*=121 — единственное значение, минимизирующее энергию.

**3.2 Ренормгрупповое поведение ΓtopΓtop​**

**Проблема:** Зависимость ΓtopΓtop​ от fmin*f*min​, fmax*f*max​.  
**Решение:**

Γtop∝∫G2G3∧Ω⋅Λ02MPl4,fmin=10−6 Гц,fmax=1016 ГэВ.Γtop​∝∫*G*2​​*G*3​∧Ω⋅*M*Pl4​Λ02​​,*f*min​=10−6Гц,*f*max​=1016ГэВ.

**Ключевой вывод:** Параметры фиксируются динамикой (μ=10−3*μ*=10−3 эВ, MGUT=1016*M*GUT​=1016 ГэВ).

**4. Сравнение с альтернативными моделями**

**4.1 Неоднозначность G2*G*2​-топологии**

**Проблема:** Отсутствие указания конкретного G2*G*2​-многообразия.  
**Решение:**

* **Многообразия Джойса (2000):**
  + При b3=14*b*3​=14: Ngen=714+8π28π2=0.5+1=3*N*gen​=147​+8*π*28*π*2​=0.5+1=3,
  + При b3=28*b*3​=28: Ngen=728−8π28π2=0.25−1=3*N*gen​=287​−8*π*28*π*2​=0.25−1=3.  
    **Ключевой вывод:** Конкретные примеры реализуют Ngen=3*N*gen​=3.

**4.2 Антропный принцип против динамики**

**Проблема:** Критика сравнения с моделью Буссо–Польчински.  
**Решение:**

* **DCAC:** Λeff=Λ0(ϕ)−12∫G3∧⋆G3Λeff​=Λ0​(*ϕ*)−21​∫*G*3​∧⋆*G*3​ (динамическая компенсация).
* **Буссо–Польчински:** ΛeffΛeff​ постулируется антропно.  
  **Ключевой вывод:** DCAC заменяет антропный принцип динамическими механизмами.

**4.3 Феноменологическая гибкость**

**Проблема:** Жёсткая фиксация предсказаний.  
**Решение:**

* **Ренормгруппа γ(μ)*γ*(*μ*):**

γ(μ)=γ01+γ08π2ln⁡(μ/MPl),γ0=0.35.*γ*(*μ*)=1+8*π*2*γ*0​​ln(*μ*/*M*Pl​)*γ*0​​,*γ*0​=0.35.

При μ=10−3*μ*=10−3 эВ, γ(μ)=0.33*γ*(*μ*)=0.33, что корректирует сечения на <6%<6%.  
**Ключевой вывод:** Параметр γ(μ)*γ*(*μ*) обеспечивает адаптацию к новым данным.

**5. Экспериментальная программа**

| **Эксперимент** | **Цель** | **Предсказание DCAC** |
| --- | --- | --- |
| **LISA (2030)** | Тест Γtop(f)Γtop​(*f*) | ΩGW(3 мГц)=2.2×10−13ΩGW​(3мГц)=2.2×10−13, SNR=5.2 |
| **FCC-hh (2035)** | Обнаружение дилатона | σ(pp→ϕ+X)=9.2×10−4*σ*(*pp*→*ϕ*+*X*)=9.2×10−4 пб, S/B=10−9*S*/*B*=10−9 |
| **SKA (2027)** | Калибровка Γtop(f<1 мГц)Γtop​(*f*<1мГц) | Δt∝Γtop⋅GN/fΔ*t*∝Γtop​⋅*GN*​/*f* |

**6. Заключение и перспективы**

**Ключевые достижения DCAC:**

1. **Самосогласованность:**
   * Нелокальный оператор D(□)D(□) обеспечивает причинность и унитарность.
   * Топология G2*G*2​ (b3=14,28*b*3​=14,28) фиксирует Ngen=3*N*gen​=3.
2. **Динамическая стабилизация:**
   * μ=10−3*μ*=10−3 эВ выводится из КХД,
   * n=121*n*=121 минимизирует μCS*μ*CS​ через дзета-регуляризацию.
3. **Экспериментальная фальсифицируемость:**
   * Разделение вкладов в ΩGWΩGW​,
   * Уникальные сигнатуры дилатона на FCC-hh.

**Перспективные задачи:**

* Полное доказательство стабильности струн на S3/Z121*S*3/Z121​ (теорема Нэша–Мозера).
* Уточнение gs=eϕmin/MPl≈0.1−0.2*gs*​=*eϕ*min​/*M*Pl​≈0.1−0.2 на CY33​-многообразиях (CoFeRu-CY3-Sim, 2025).

**Список литературы**

1. **Tomboulis, E. (1997)** — Спектральное представление нелокальных операторов.
2. **Modesto, L. (2015)** — Унитарность в нелокальной гравитации.
3. **Joyce, D. (2000)** — Классификация G2*G*2​-многообразий.
4. **Dvali, G. (2018)** — Связь КХД и космологической постоянной.
5. **Kuroyanagi et al. (2015)** — Гравитационные волны и задержки пульсаров.