



XXXIV Международная зимняя школа физиков-теоретиков
«Коуровка-2012» (Зеленый Мыс, 26 февраля – 3 марта 2010)

Переключатели тока на основе асимметричных трехслойных наноструктур ферромагнетик/сверхпроводник

Юрий Прошин

в сотрудничестве с

Мансуром Хусаиновым и **Максимом Авдеевым**

Казанский федеральный университет





**Светлой памяти
моих соавторов и друзей
посвящается**





<http://ufn.ru/ru/ufn90.html>



Самые цитируемые статьи, опубликованные в
в III-ем тысячелетии по данным ISI.

В.А. Рубаков «[Большие и бесконечные дополнительные измерения](#)» 171 913
(2001)

В.Е. Фортов, А.Г. Храпак, С.А. Храпак, В.И. Молотков, О.Ф. Петров «[Пылевая плазма](#)» 174 495 (2004)

А.В. Гуревич, К.П. Зыбин «[Пробой на убегающих электронах и электрические разряды во время грозы](#)» 171 1177 (2001)

Ю.А. Изюмов, Ю.Н. Прошин, М.Г. Хусаинов «[Конкуренция сверхпроводимости и магнетизма в гетероструктурах ферромагнетик/сверхпроводник](#)» **172 113** (2002)

В.Ф. Тарасенко, С.И. Яковленко «[Механизм убегания электронов в плотных газах и формирование мощных субнаносекундных электронных пучков](#)» 174 953 (2004)

А.Н. Васильев, В.Д. Бучельников, Т. Такаги, В.В. Ховайло, Э.И. Эстрин «[Ферромагнетики с памятью формы](#)» 173 577 (2003)

М.Ю. Каган, К.И. Кугель «[Неоднородные зарядовые состояния и фазовое расслоение в манганитах](#)» 171 577 (2001)



Не могли бы Вы кратко описать основные результаты Вашей статьи и их значение для Вашей области исследований?



Вопросами взаимосвязи двух явлений сверхпроводимости и магнетизма я заинтересовался давно, начиная с работы В.Л.Гинзбурга, но идея написать обзорную статью на эту тему появилась довольно случайно. Лет десять назад с интервалом примерно год я оппонировал по докторским диссертациям двум казанским теоретикам Ю.Н.Прошину и М.Г.Хусаинову. Их работы были посвящены теории многослоек, состоящих из чередующихся сверхпроводящих и ферромагнитных слоев. Вместе с ними я углубился в эту проблему, в которой появилось уже много экспериментальных исследований. Мы выполнили ряд совместных работ по данной теме, которые и завершились написанием обзора. Эта наша совместная работа перешла в долгую дружбу.





Казань 2001 г, гостиница Булгар. Вычитывание обзора





Казань 2001 г, гостиница Булгар. Вычитывание обзора





Outline

1. Introduction

- The proximity effect
- The asymmetry origin in the FS structures
- Theoretical and experimental motivations

2. Asymmetrical spin switch (spin-valve)

- FSF asymmetrical system
- FFS asymmetrical system

3. Conclusions

In memory of Yu.A. Izyumov





Outline

1. Introduction

- The proximity effect
- The asymmetry origin of the FS structures
- Theoretical and experimental motivations

2. Asymmetrical spin switch (spin-valve)

- FSF asymmetrical system
- FFS asymmetrical system

3. Conclusions

In memory of Yu.A. Izyumov





Introduction: ferromagnetism vs. superconductivity in homogeneous materials

Coexistence superconductivity and ferromagnetism in homogeneous materials requires special conditions:

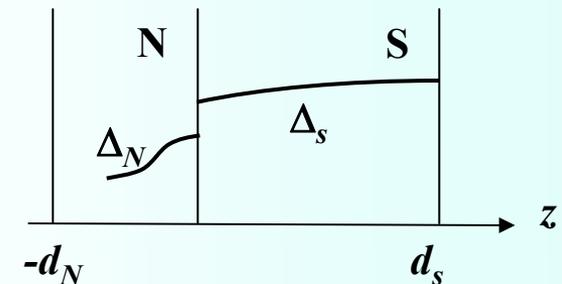
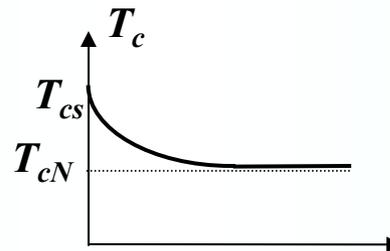
- "paramagnetic" and "orbital" effect of exchange field I suppresses superconductivity
- electron-electron interactions in ferromagnet (F) (repulsion? or attraction?)
- the Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov (FFLO) state

In homogeneous ferromagnet coexistence of *superconductivity* and *ferromagnetism* is practically impossible ???

- Proximity effect (N/S contact \Rightarrow import of attraction through S/N boundary [P. de Gennes, 1964]

$$D \frac{\partial F(z)}{\partial z} \Big|_{z=\pm 0} \propto \sigma [F(+0) - F(-0)]$$

$$T_{cN} \leq T_c \leq T_{cS}$$





Introduction: superconductivity vs. magnetism

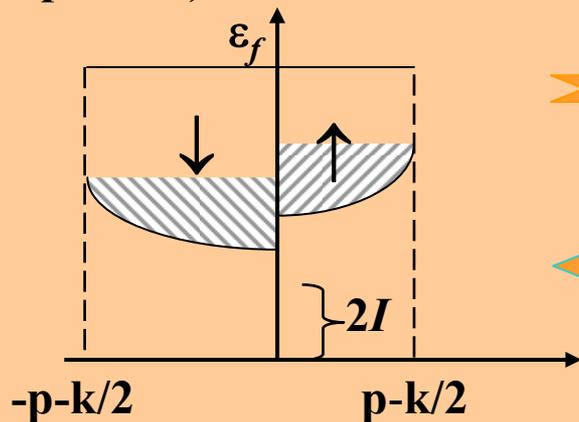
Coexistence superconductivity and ferromagnetism in homogeneous materials requires special conditions, but this coexistence is easily achievable in artificially prepared layered FS systems:

➤ superconductivity in the FS systems:

proximity effect with BCS (into S layers) + FFLO analogue (into F layers)

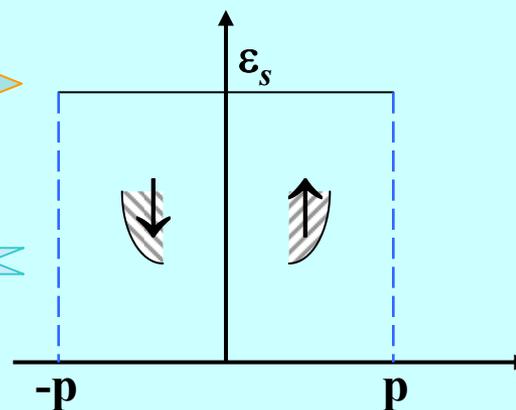
F layer – FFLO like pairing:

$(p-k/2, \downarrow; -p-k/2, \uparrow)$



S layer – BCS pairing:

$(p, \downarrow; -p, \uparrow)$



$\text{sign}(\Delta) = \text{const}$

$$\Delta(\mathbf{r}) \propto \Delta_k \cos(\mathbf{k}\mathbf{r})$$

\mathbf{k} is the FFLO pair quasimomentum:

$$k = a_f^{-1} \approx 2I/v_f$$



Outline

1. Introduction

- The proximity effect
- **The asymmetry origin in the FS structures**
- Theoretical and experimental motivations

2. Asymmetrical spin switch (spin-valve)

- FSF asymmetrical system
- FFS asymmetrical system

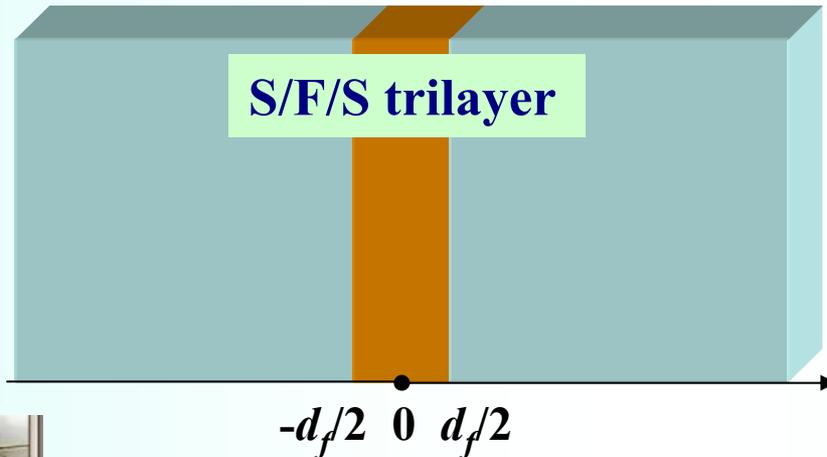
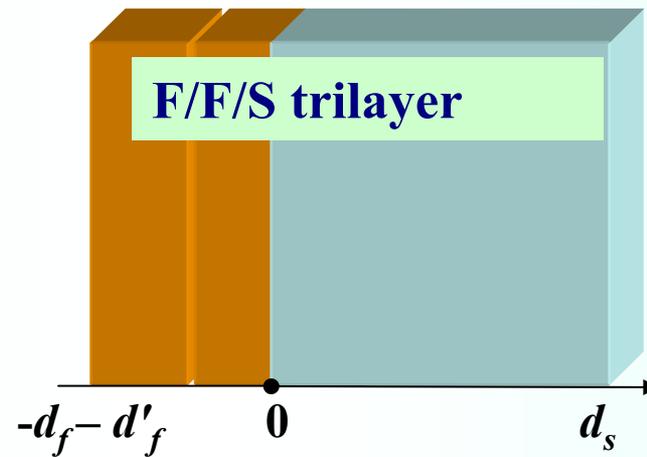
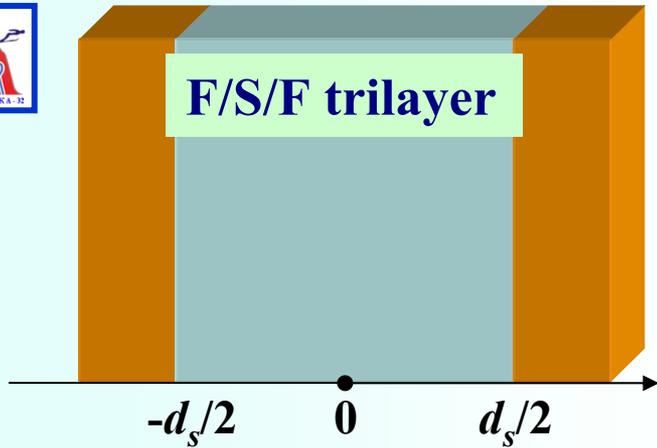
3. Conclusions

In memory of Yu.A. Izyumov





trilayer structures in experimental studies



$$200 \text{ \AA} \leq d_s < 2000 \text{ \AA}$$

$S (T_{c0})$:
Nb (8.8-9.4 K),
V (5.1-5.4 K),
Pb (6.8-7.3 K),
Al (~1.3 K),
La (~5 K)
In ...

$$0 \leq d_f < \sim 60 \text{ \AA}$$

F:
Fe, Gd, Co,
Ni, Py,
alloys...





The asymmetry origin in the FS structures

- The structures finiteness leads to layer's nonequivalence
 - boundary conditions
 - local environment

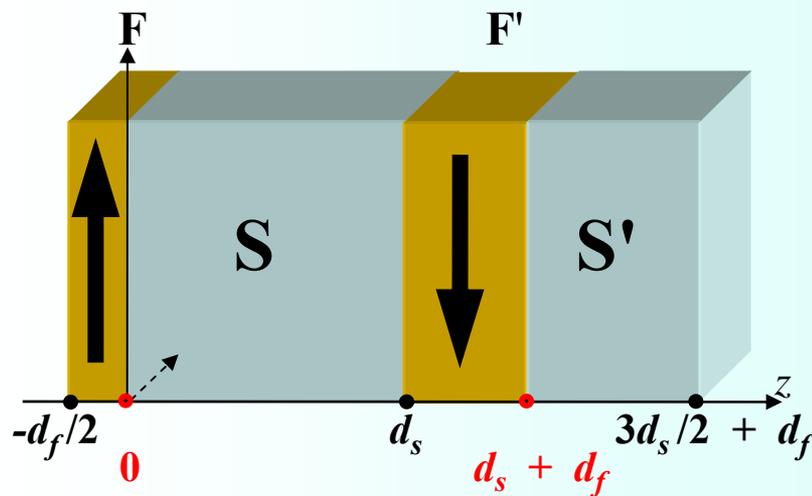
Vivid example is
a four-layered system FSF'S'

[Proshin, *et al*, PRB (2006)]

- ❖ The **decoupled superconductivity** may appear in dirty limit:

$$T_c(S) \neq T_c(S'), \quad H_c(S) \neq H_c(S').$$

- ❖ The **tetralayer** has **considerably** more logical variants than the FSF trilayer and FS superlattices.





The asymmetry origin in the FS structures

➤ The structures finiteness leads to layer's nonequivalence

- boundary conditions
- local environment

Vivid example is a four-layered system FSF'S'

➤ Differences in thicknesses of the same metal layers $d_{S,F}$

➤ Differences in metals $\Rightarrow F, F', \dots$ or/and S, S', \dots

➤ Technology (diff. parameters of interfaces and layers)

$I, T_{cS}, \xi_{S,F}, l_{S,F}, \nu_{S,F}, N_{S,F}, \dots, \sigma_{S,F}$ and so on...

Conclusion: it is more difficult to grow completely symmetrical superlattice!





Outline

1. Introduction

- The proximity effect
- The asymmetry origin in the FS structures
- **Theoretical and experimental motivations**

2. Asymmetrical spin switch (spin-valve)

- FSF asymmetrical system
- FFS asymmetrical system

3. Conclusions

In memory of Yu.A. Izyumov





Theoretical F/F/S spin switch

Appl. Phys. Lett. **71** (16), 20 October 1997

A superconductive magnetoresistive memory element using controlled exchange interaction

Sangjun Oh and D. Youm

Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Kusung-Dong, Yusung-Gu, Taejon 305-701, Korea

M. R. Beasley^{a)}

Department of Applied Physics, Stanford University, Via Palou, Stanford, California 94305-4085

(Received 14 January 1997; accepted for publication 24 July 1997)

A memory device that can be switched between the normal state and superconducting state by an external magnetic field is proposed. The device consists of a superconducting/double magnetic (SM_1M_2) trilayer and is switched in a manner analogous to giant magnetoresistive memory devices. Using Usadel equations it is shown that the superconducting transition temperature of the device changes when the magnetic configurations of magnetizations of the two lower layers are switched between parallel and antiparallel. Appropriate design parameters are discussed and the materials issues analyzed. © 1997 American Institute of Physics. [S0003-6951(97)00238-6]





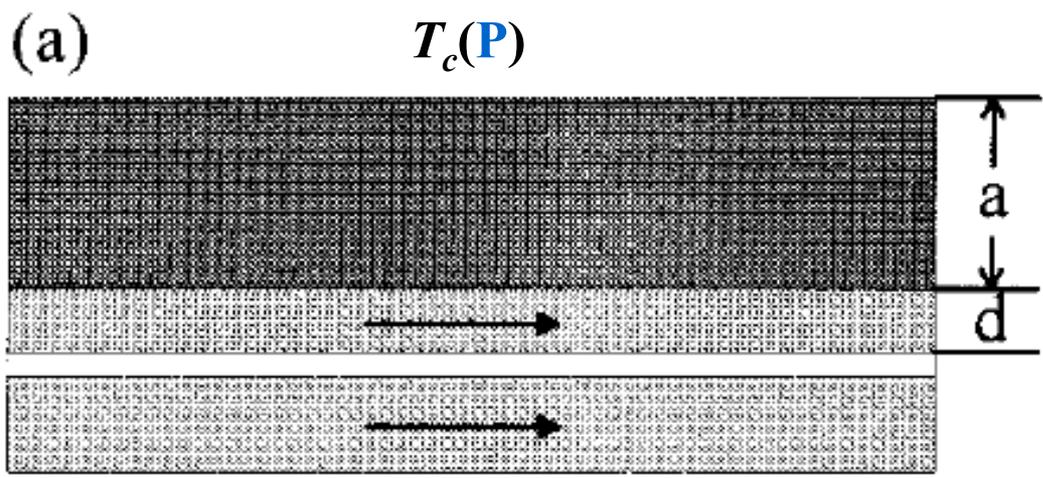
A supercond exchange int

Sangjun Oh
Department of
Taejon 305-701

M. R. Beasley
Department of

(Received 14

A memory c
external mag
(SM_1M_2) ti
devices. Usi
device chang
switched bet
materials iss

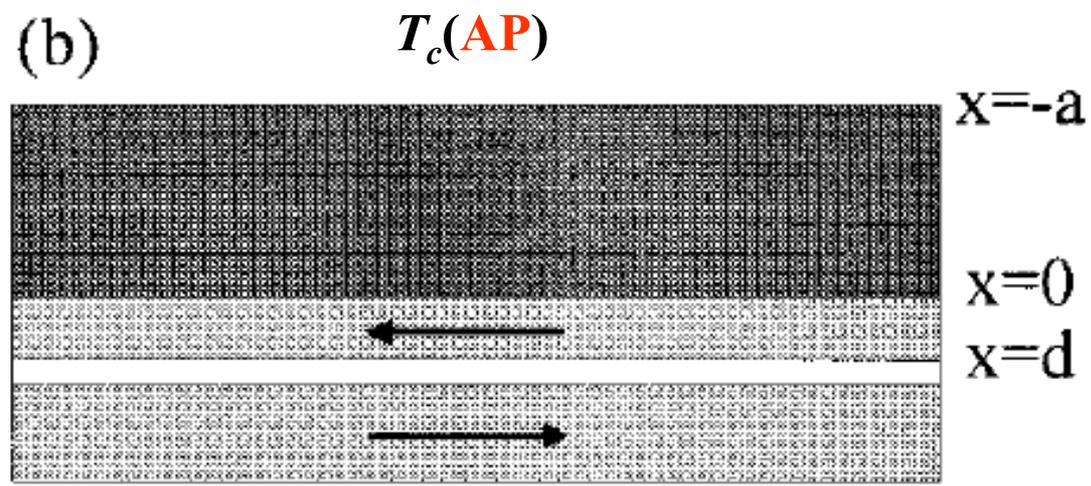


g controlled

ing-Gu,

Oh, Youm, Beasley
Appl.Phys.Lett. 71,
2376 (1997)

$$T_c(P) < T_c(AP)$$



tate by an
magnetic
; memory
ure of the
layers are
d and the
38-6]





Theoretical FSF spin valve

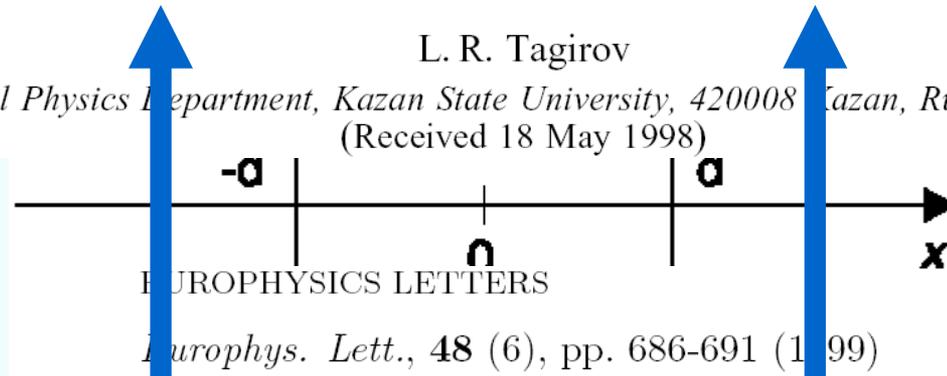
VOLUME 83, NUMBER 10

PHYSICAL REVIEW LETTERS

6 SEPTEMBER 1999

Low-Field Superconducting Spin Switch Based on a Superconductor/Ferromagnet Multilayer

L. R. Tagirov
Theoretical Physics Department, Kazan State University, 420008 Kazan, Russian Federation
 (Received 18 May 1998)



$$T_c(\mathbf{P}) < T_c(\mathbf{AP})$$

EUROPHYSICS LETTERS

Europhys. Lett., **48** (6), pp. 686-691 (1999)

Spin-orientation-dependent superconductivity in F/S/F structures

Buzdin *at al.*
Eur.Phys.Lett.
48, 686 (1999)

A. I. BUZDIN, A. V. VEDYAYEV(*) and N. V. RYZHANOVA(*)

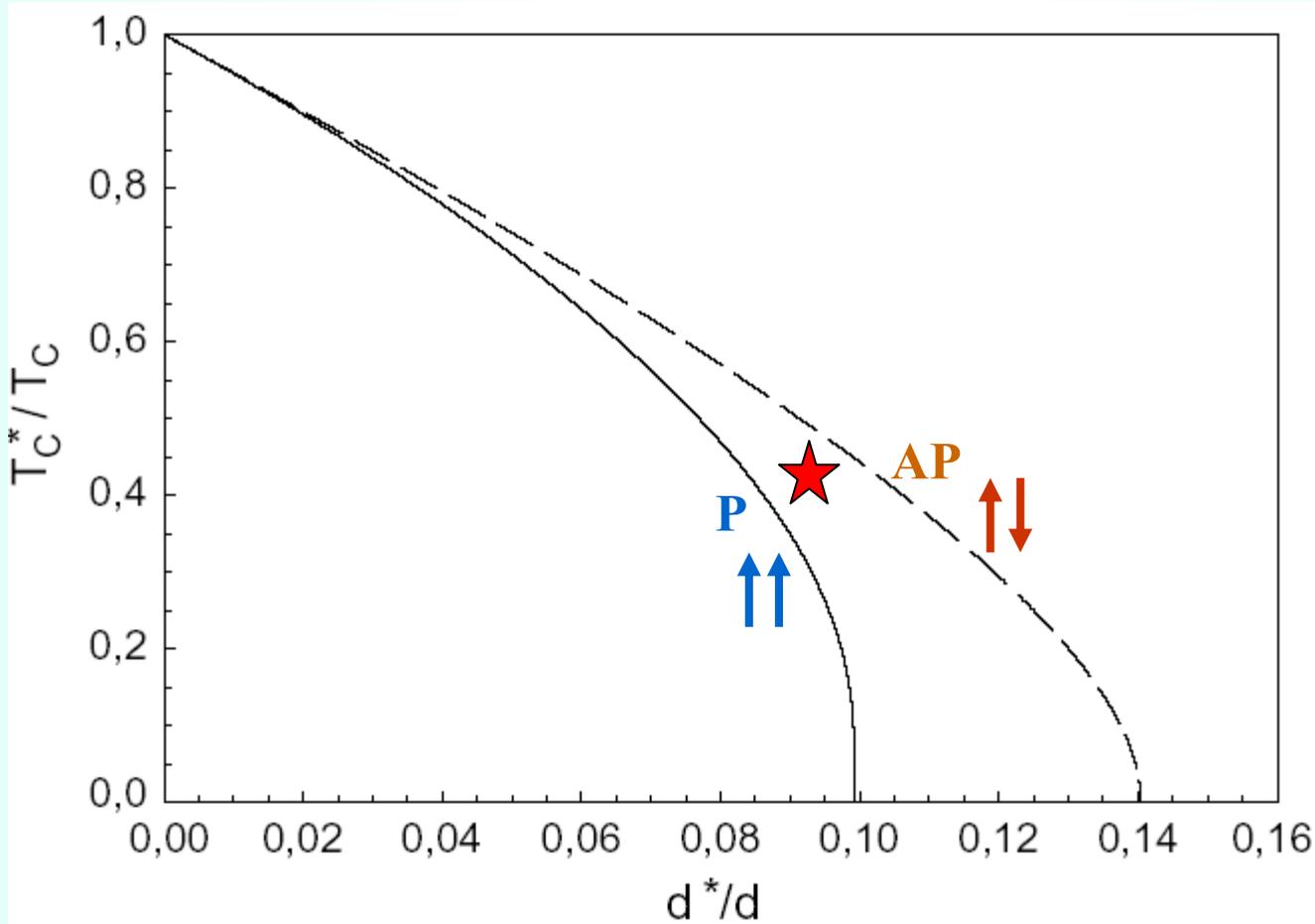
Fig. 1. – Schematic representation of the geometry of F/S/F sandwich. F (ferromagnetic) layer and S (superconducting) layer with thickness $2d$.

(received 20 April 1999; accepted in final form 13 October 1999)





Theoretical FSF spin valve



$$\frac{\rho(H) - \rho(0)}{\rho(0)}$$

$$\frac{\rho(H) - \rho(0)}{\rho(H)}$$

$$T_c(\text{P}) < T_c(\text{AP})$$



Buzdin *et al.*
Eur.Phys.Lett.
48, 686 (1999)

Fig. 2. – The calculated dependence of the superconducting transition temperature T_c^*/T_c vs. the reduced inverse half-thickness d^*/d of the superconducting layer. The solid line corresponds to the P-phase and the dashed one to the AP-phase.



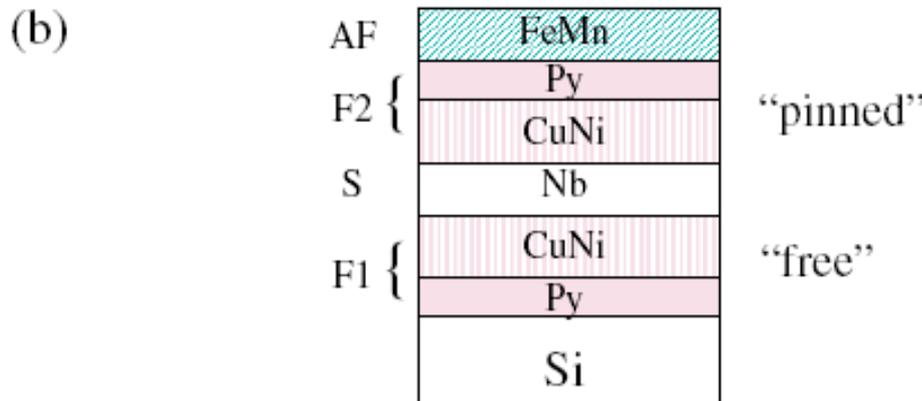
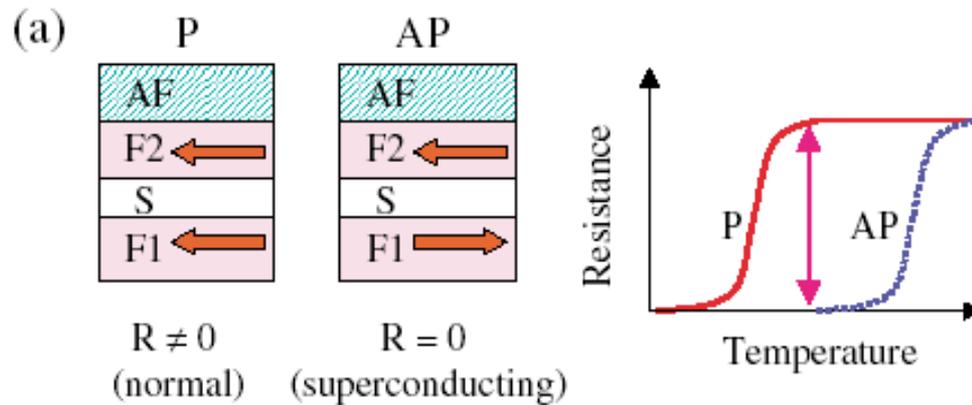
Experimental FSF spin valve (Gu *et al.*) (a)

VOLUME 89, NUMBER 1

Magnetization-
in the Fer

J.
Ma

The super
has been pre
such that T_c^F
layers. We h
prediction by
find an $\sim 25\%$
layers chang
correspondi



Gu *et al.* PRL **89**,
267001 (2002)

ion Temperature
'Nb/CuNi

er
1439

agnet systems
agnetic layers
erromagnetic
re theoretical
netic field. We
the two CuNi
there is no

FIG. 1 (color online). (a) Schematic structure of an F/S/F/AF proximity switch device. (b) Sample structure of an exchange-biased spin valve, Py/CuNi/Nb/CuNi/Py/FeMn. As shown by the arrow in (a), resistance can change from a finite value to zero at $T_c^P < T < T_c^{AP}$.





Experimental FSF spin valve (Gu *et al.*) (b)

Gu *et al.* PRL **89**,
267001 (2002)

See also
Potenza@ Marrows PRB,
71, 180503 (2005)
Rusanov *et al.*, PRB, **73**,
060505 (2006)
Moraru I.C. *et al.* PRB,
74, 220507 (2006)
Leksin *et al.* PRB
(2009,2011)

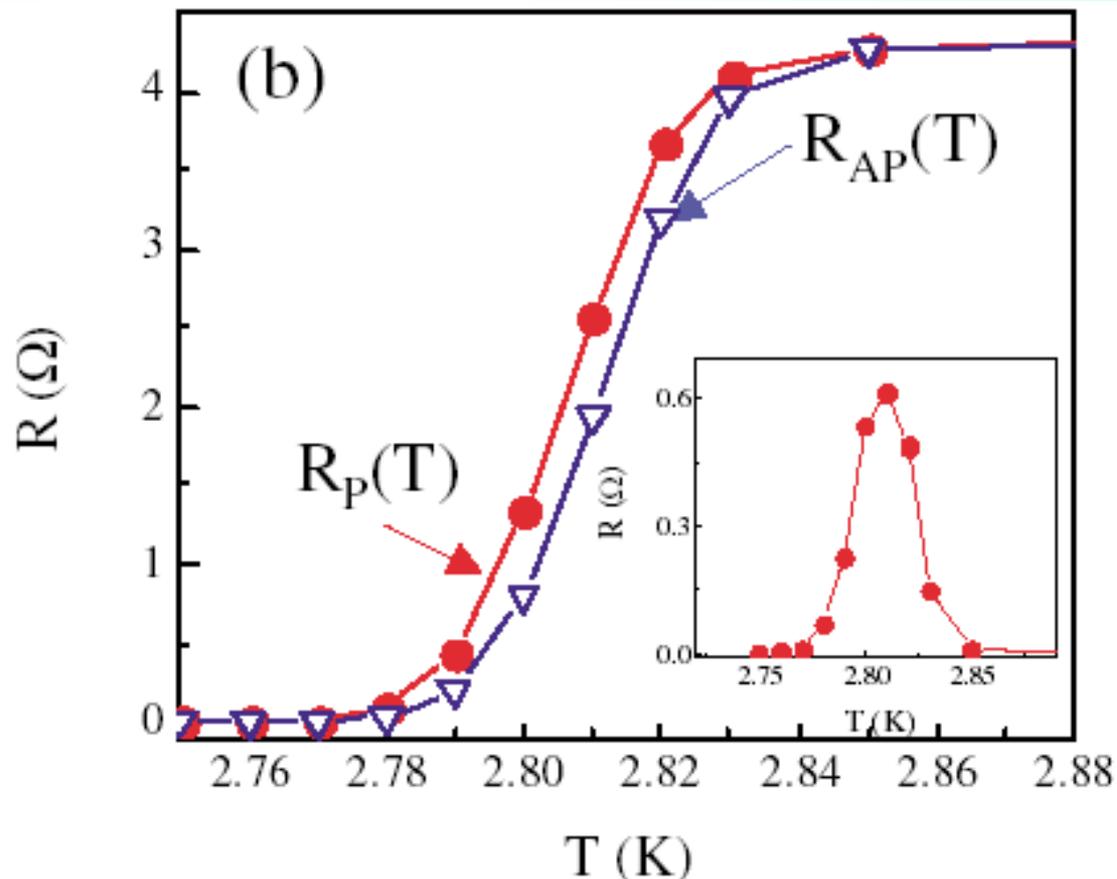


FIG. 3 (color online). (a) $R(H)/R(500 \text{ Oe})$ curves at $T = 5 \text{ K}$ ($> T_c$) and $T = 2.81 \text{ K}$ ($\sim T_c$) and (b) $R_P(300 \text{ Oe}, T)$ and $R_{AP}(-300 \text{ Oe}, T)$ for $\text{Py}(4 \text{ nm})/\text{Cu}_{0.47}\text{Ni}_{0.53}(5)/\text{Nb}(18)/\text{CuNi}(5)/\text{Py}(4)/\text{FeMn}(6)$. $\Delta R(T) = R_P(T) - R_{AP}(T)$ is shown in the inset of (b).





On the

^a Centre de Ph.

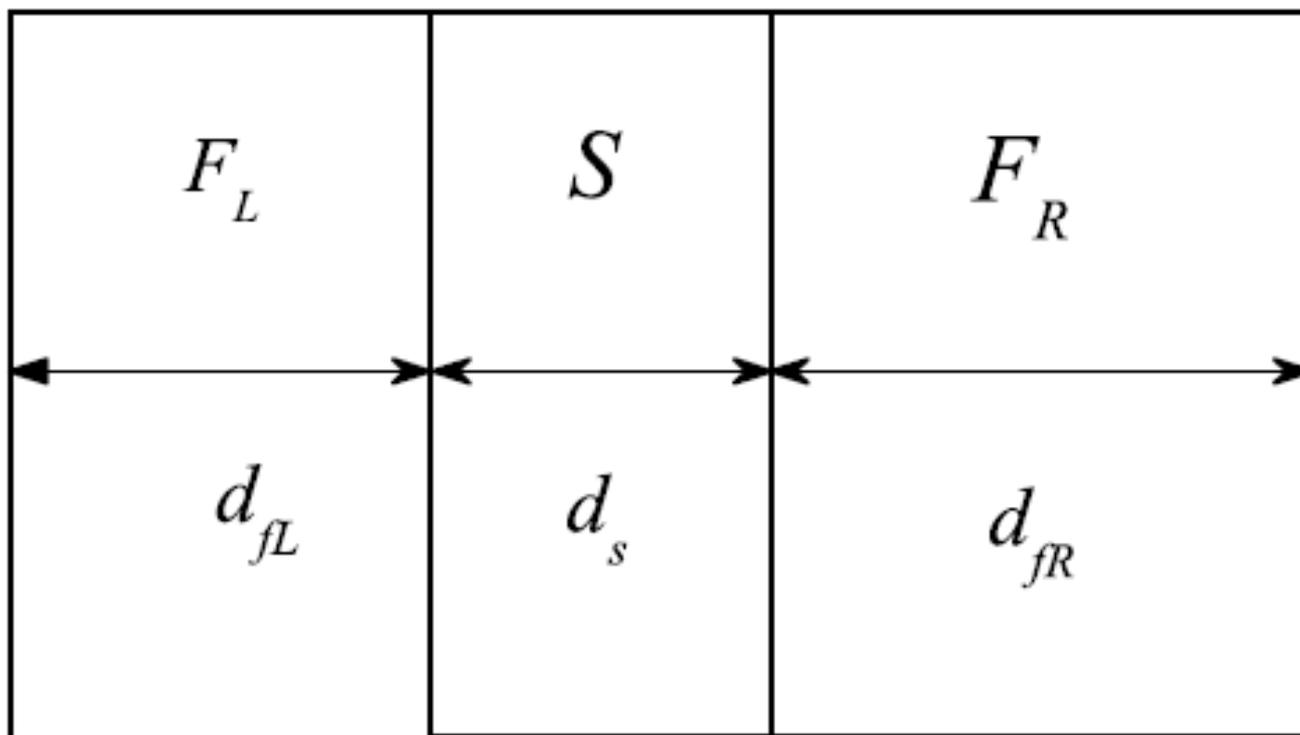


Fig. 1. Geometry of the studied F/S/F trilayer.

Abstract

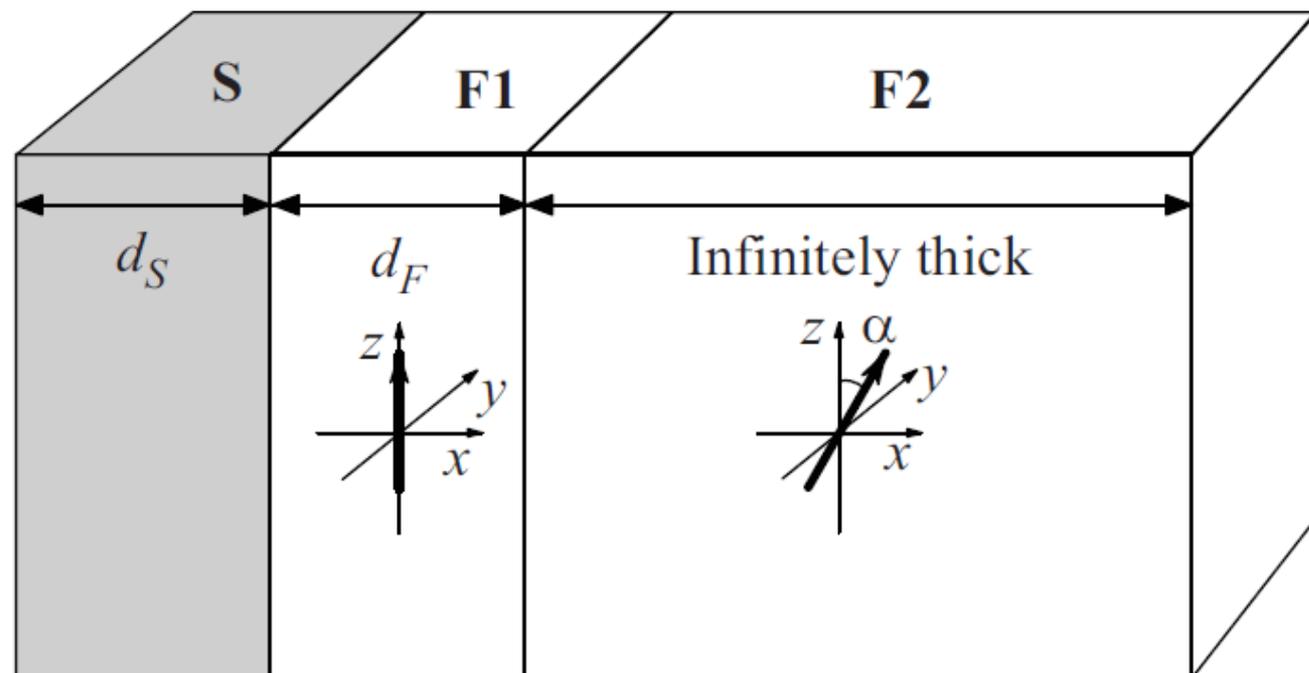
We investigate ferromagnet/superconductor/ferromagnet (F/S/F) hybrid structures in the dirty limit, described by the Usadel equations. More precisely, the critical temperature is studied as a function of the ferromagnetic layer thickness for parallel and antiparallel orientations of the ferromagnetic moments. We show that an asymmetry in the ferromagnetic layers may lead to an enhancement of the spin-valve effect, while spin-flip scattering leads to its decrease, which could explain the small experimentally measured values. ...



Superconducting triplet spin valve

Ya. V. Fominov⁺, A. A. Golubov^{*}, T. Yu. Karminskaya[∇], M. Yu. Kupriyanov[∇], R. G. Deminov[□], L. R. Tagirov[□]

We study the critical temperature T_c of SFF trilayers (S is a singlet superconductor, F is a ferromagnetic metal), where the long-range triplet superconducting component is generated at noncollinear magnetizations of the F layers. We demonstrate that T_c can be a nonmonotonic function of the angle α between the magnetizations of the two F layers. The minimum is achieved at an intermediate α , lying between the parallel (P, $\alpha = 0$) and an antiferromagnetic (AF) state. At temperatures above T_c and at temperatures above the collinear superconducting transition temperature T_c^P (at the same time, consider “inverse” ($T_c^P > T_c^A$)) and



-valve effect: T_c only in the vicinity. At the T_c^A ($< T_c^{AP}$) and





More and more...

➤ Take into account too

-- possible noncollinearity of magnetizations that leads to triplet superconductivity

[Bergeret, Volkov, Efetov, PRL (2001), RMP (2005)]

[Fominov et al, JETPL (2003)]

[Golubov, Tanaka, etc. (2007-2012)]

-- parallel external magnetic field

[Radović, Buzdin, *et al* PRB (1988)].

[Krunavakarn & Yoksan, Phys. C: Sup-ty (2006)]





Outline

1. Introduction

- The proximity effect
- The asymmetry origin of the FS structures
- Theoretical and experimental motivations

2. Asymmetrical spin switch (spin-valve)

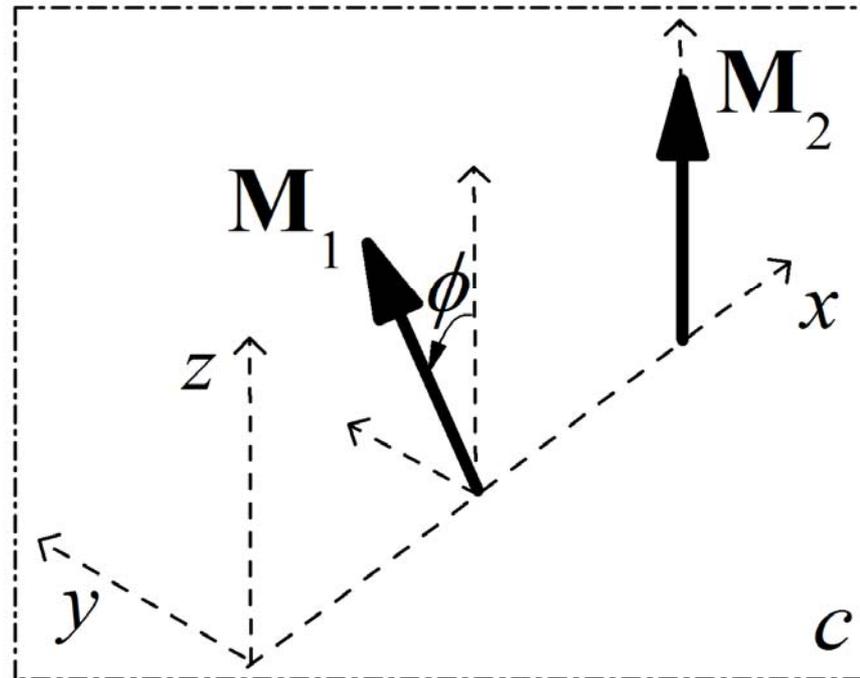
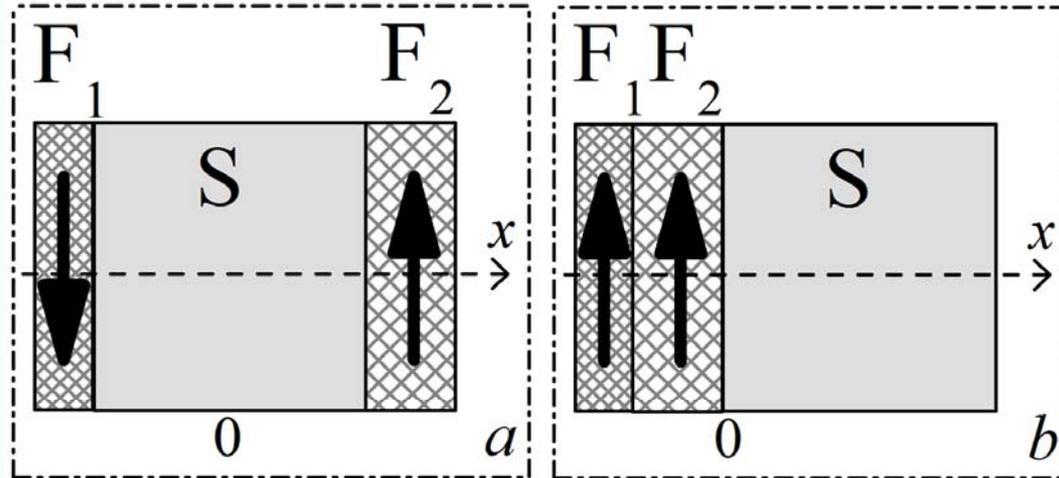
- FSF asymmetrical system
- FFS asymmetrical system

3. Conclusions

In memory of Yu.A. Izyumov



The geometry of asymmetrical trilayers F_1SF_2 and F_1F_2S





Outline

1. Introduction

- The proximity effect
- The asymmetry origin of the FS structures
- Theoretical and experimental motivations

2. Asymmetrical spin switch (spin-valve)

- **FSF asymmetrical system**
- FFS asymmetrical system

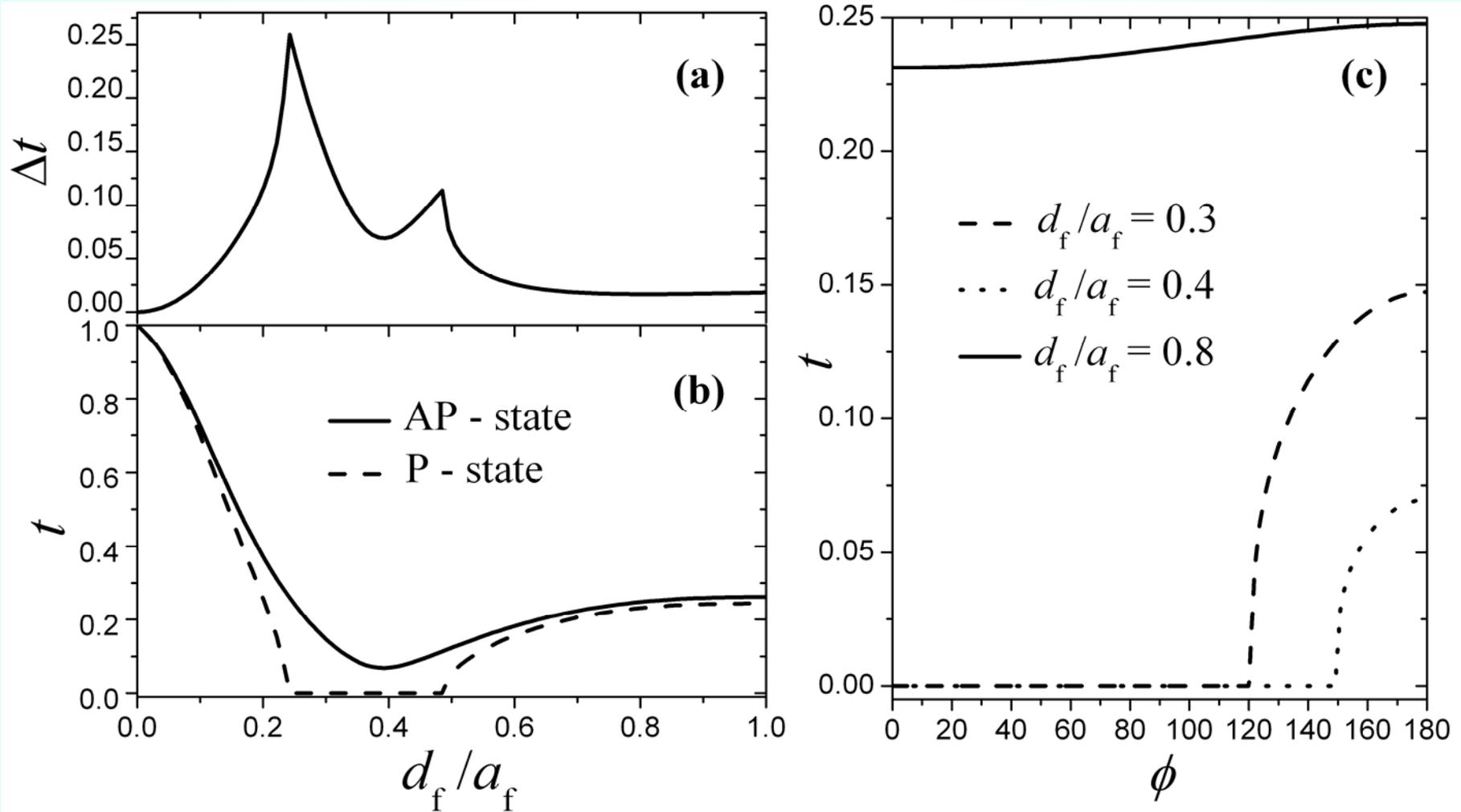
3. Conclusions

In memory of Yu.A. Izyumov

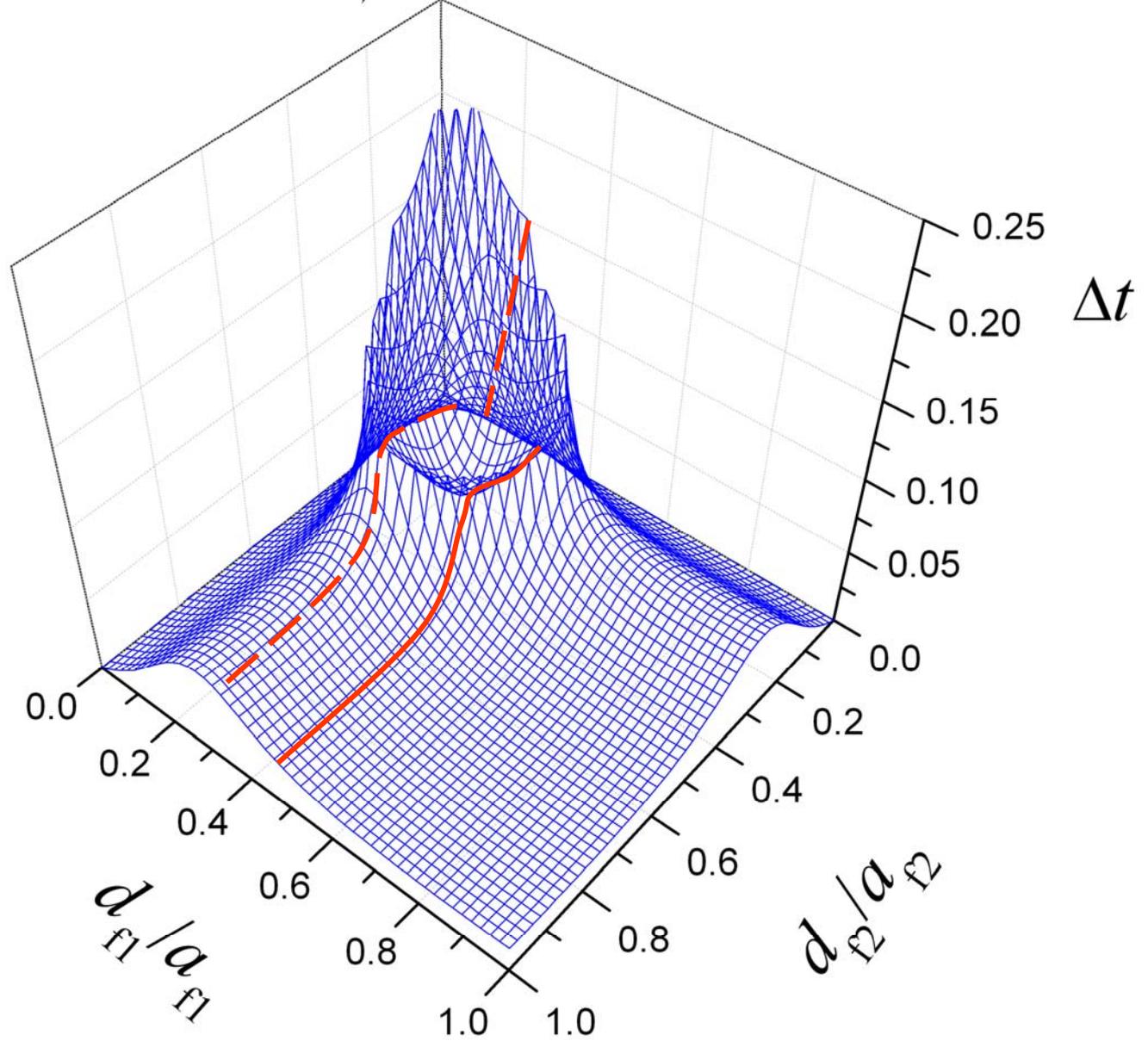




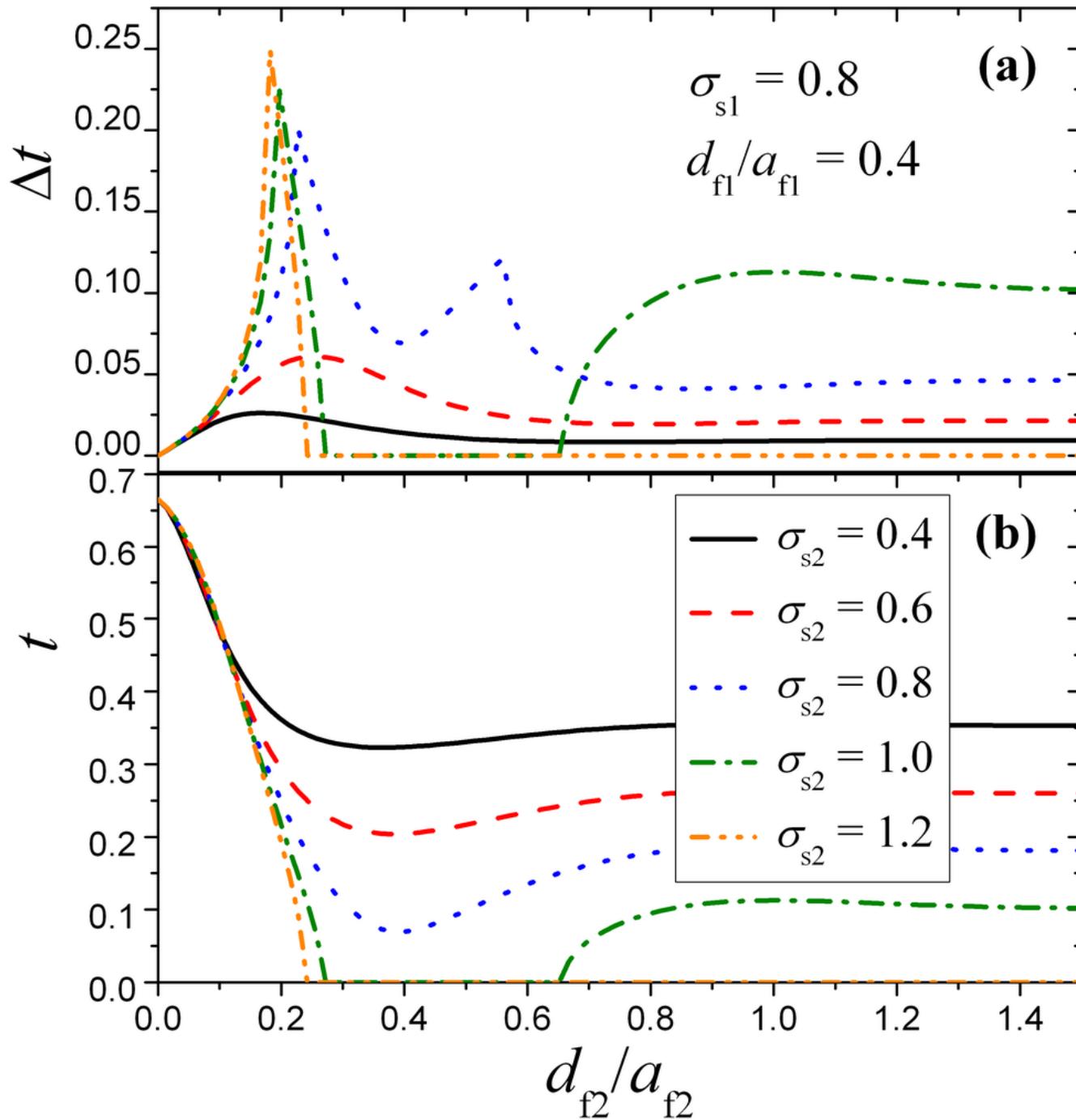
Результаты (FSF)

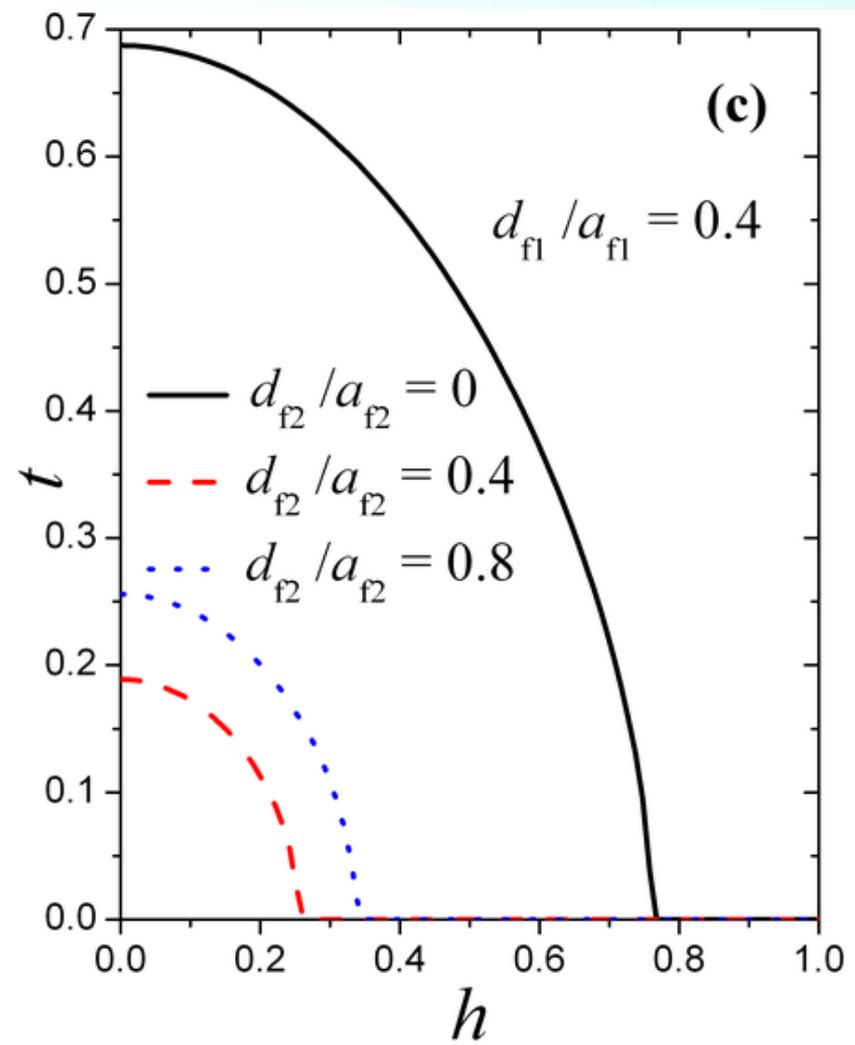
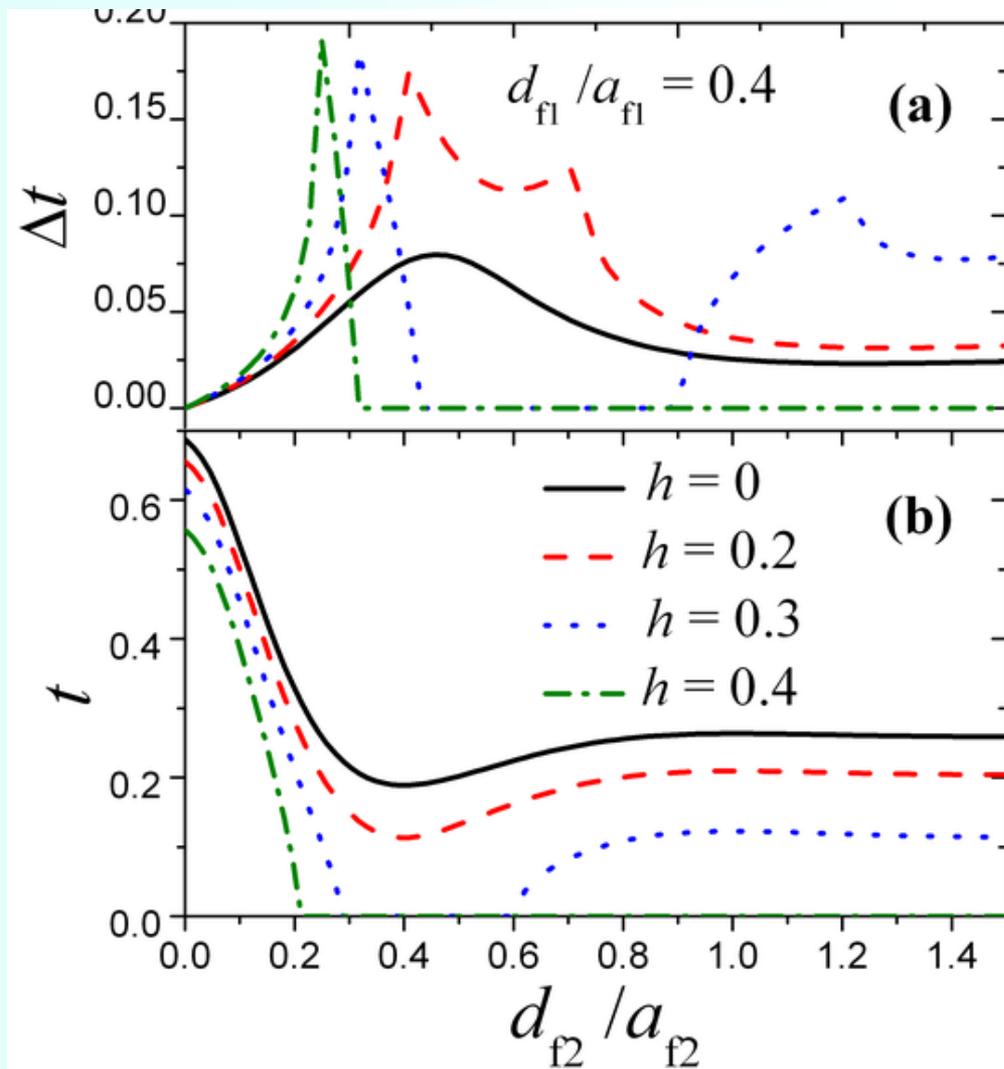


Значения остальных параметров следующие: $d_s/\xi_{s0} = 0.7$, $l_s/\xi_{s0} = 0.2$,
 $l_{f1}/a_{f1} = l_{f2}/a_{f2} = 0.25$, $\sigma_{s1} = \sigma_{s2} = 0.8$, $n_{sf1} = n_{sf2} = 1.5$, $I_1/\pi T_{cs} = I_2/\pi T_{cs} = 10$, $h = 0$.



Значения остальных параметров следующие: $d_s/\xi_{s0} = 0.7$, $l_s/\xi_{s0} = 0.2$,
 $l_{f1}/a_{f1} = l_{f2}/a_{f2} = 0.25$, $\sigma_{s1} = \sigma_{s2} = 0.8$, $n_{sf1} = n_{sf2} = 1.5$, $I_1/\pi T_{cs} = I_2/\pi T_{cs} = 10$, $h = 0$.







Outline

1. Introduction

- The proximity effect
- The asymmetry origin in the FS structures
- Theoretical and experimental motivations

2. Asymmetrical spin switch (spin-valve)

- FSF asymmetrical system
- **FFS asymmetrical system**

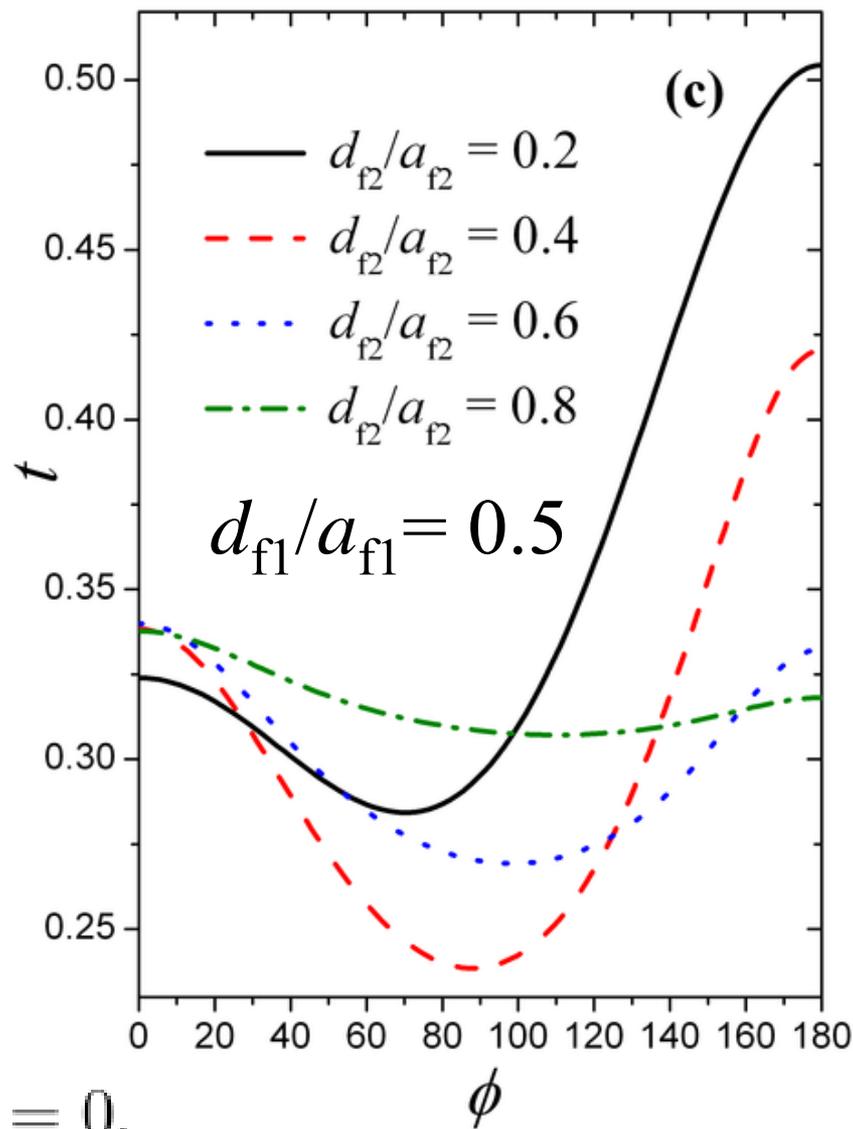
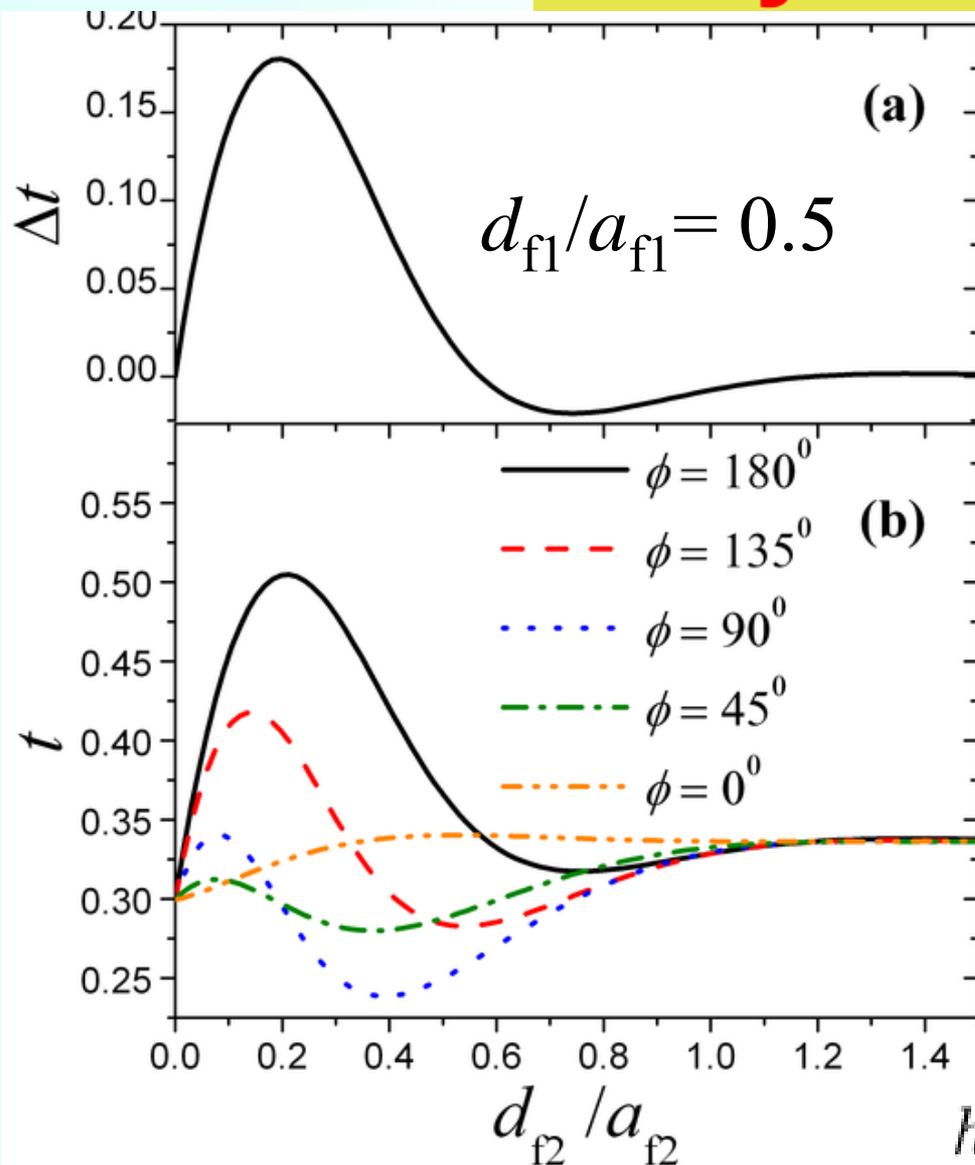
3. Conclusions

In memory of Yu.A. Izyumov





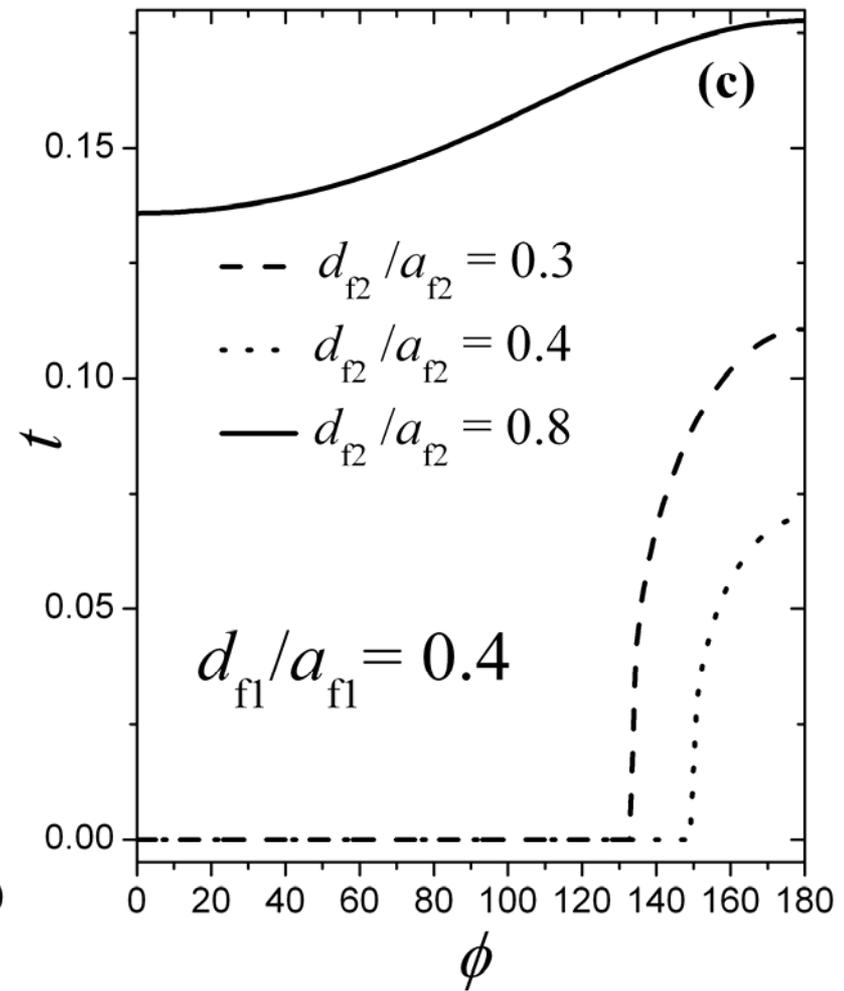
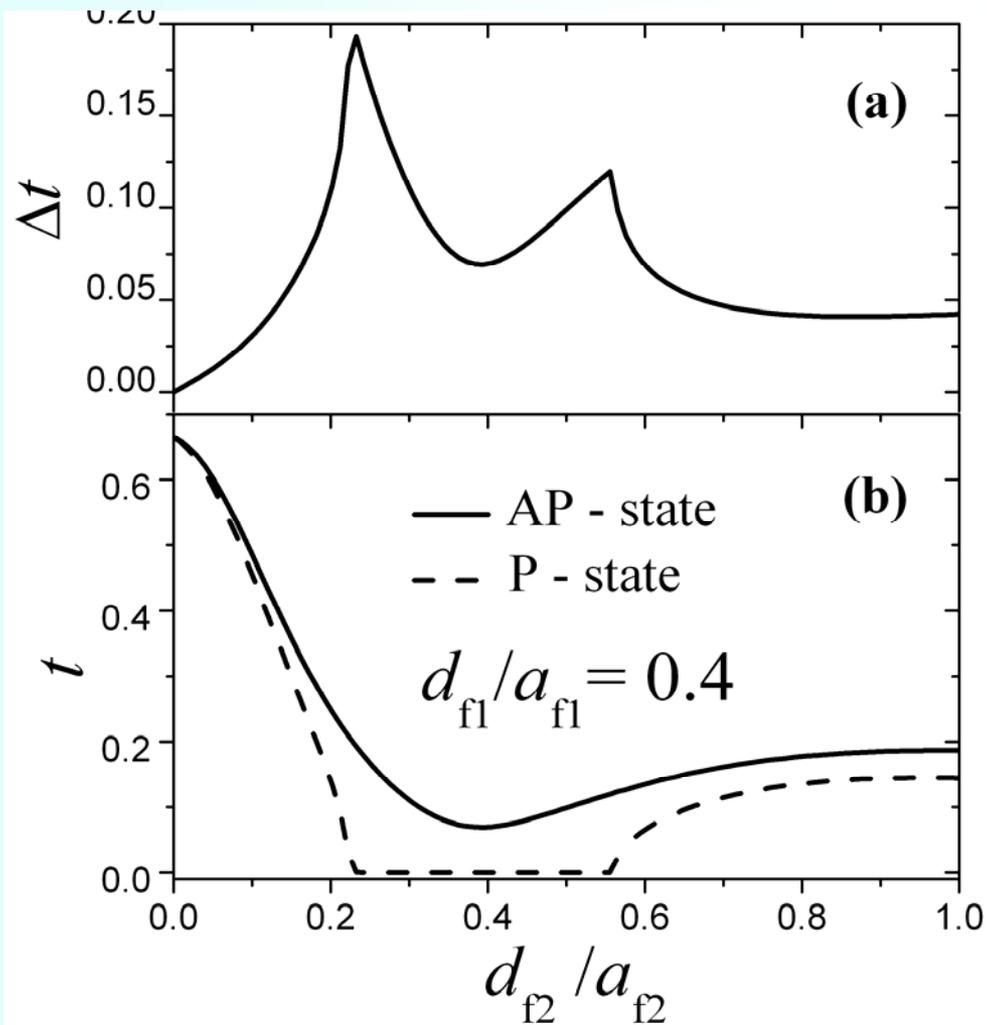
Результаты (FFS)



Значения остальных параметров следующие: $d_s/\xi_{s0} = 0.6$, $l_s/\xi_{s0} = 0.2$, $d_{f2}/a_{f2} = 0.5$, $\sigma_s = 2$, $n_{sf} = 1$, $l_{f1}/a_{f1} = 0.3$, $\sigma_{f1} = 10$, $I_1/\pi T_{cs} = 10$, $l_{f2}/a_{f2} = 0.3$, $\sigma_{f2} = 10$, $I_2/\pi T_{cs} = 10$,



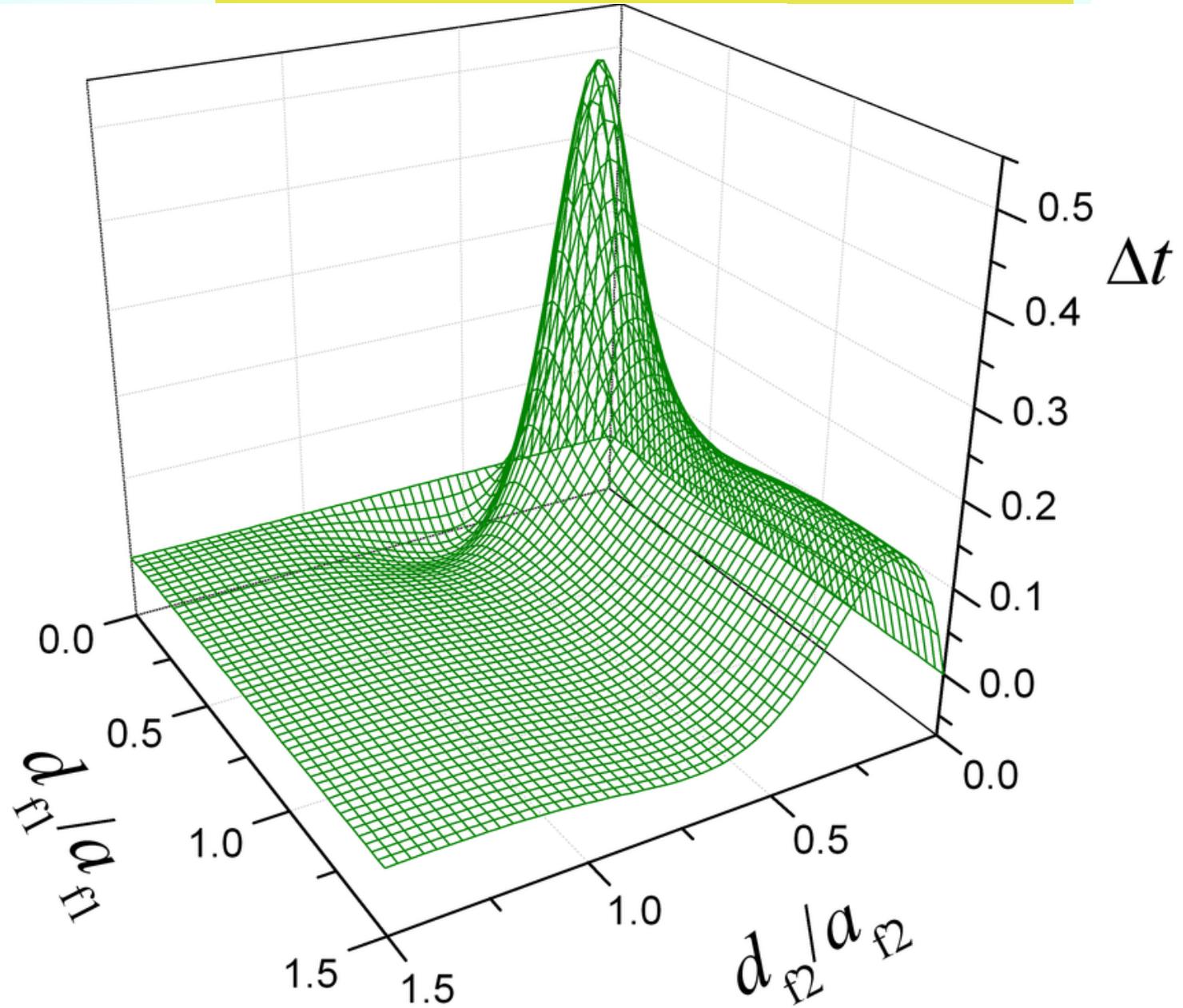
Результаты (FSF)



Значения остальных параметров следующие: $d_s/\xi_{s0} = 0.7$, $l_s/\xi_{s0} = 0.2$,
 $l_{f1}/a_{f1} = l_{f2}/a_{f2} = 0.25$, $\sigma_{s1} = \sigma_{s2} = 0.8$, $n_{sf1} = n_{sf2} = 1.5$, $I_1/\pi T_{cs} = I_2/\pi T_{cs} = 10$, $h = 0$.

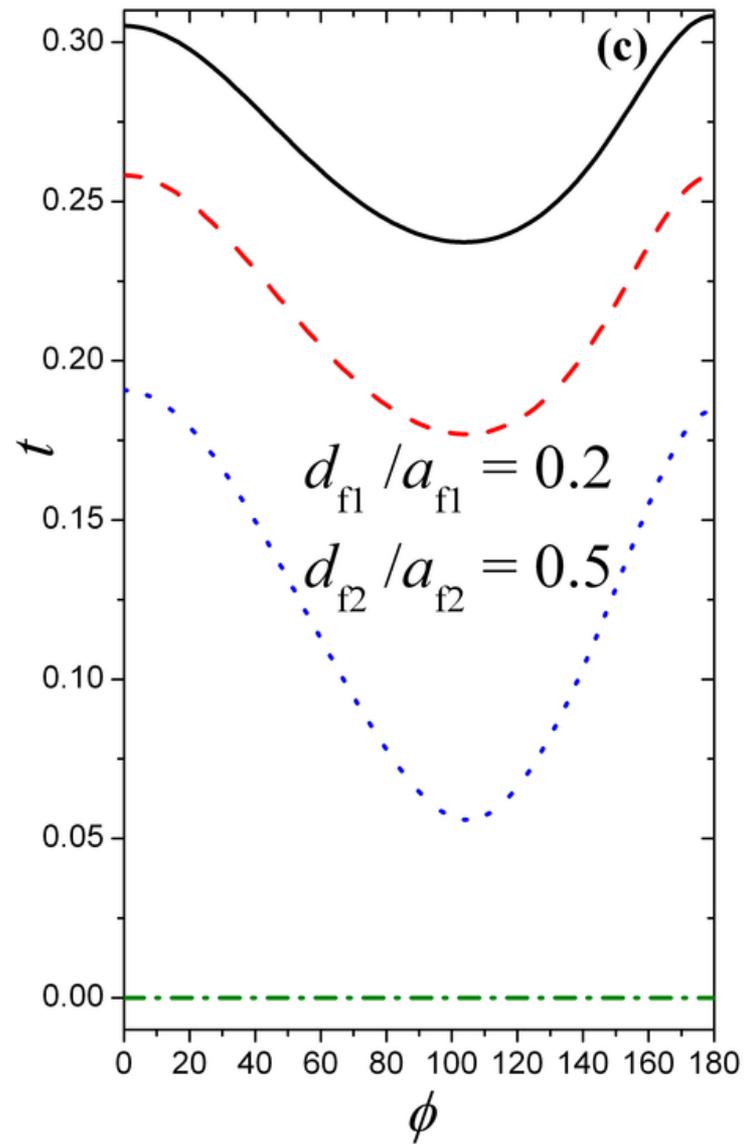
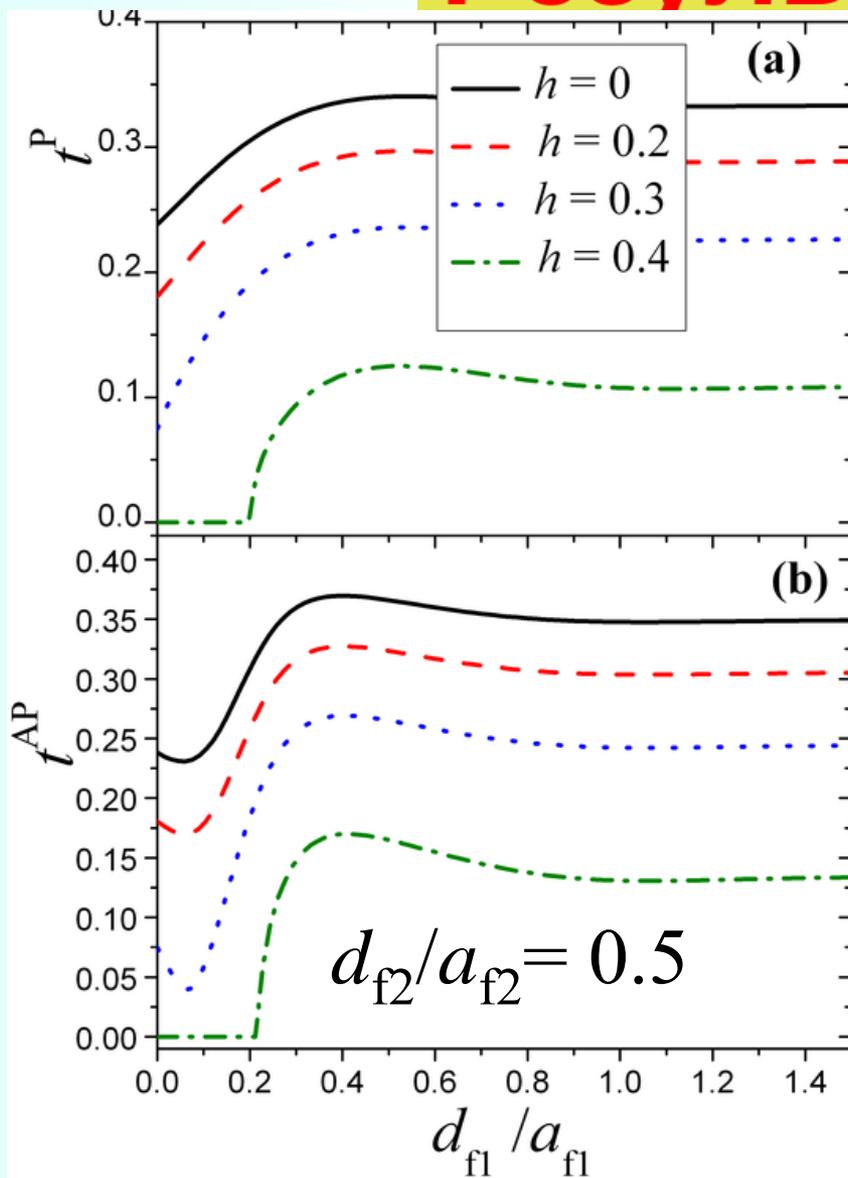


Результаты (FFS)





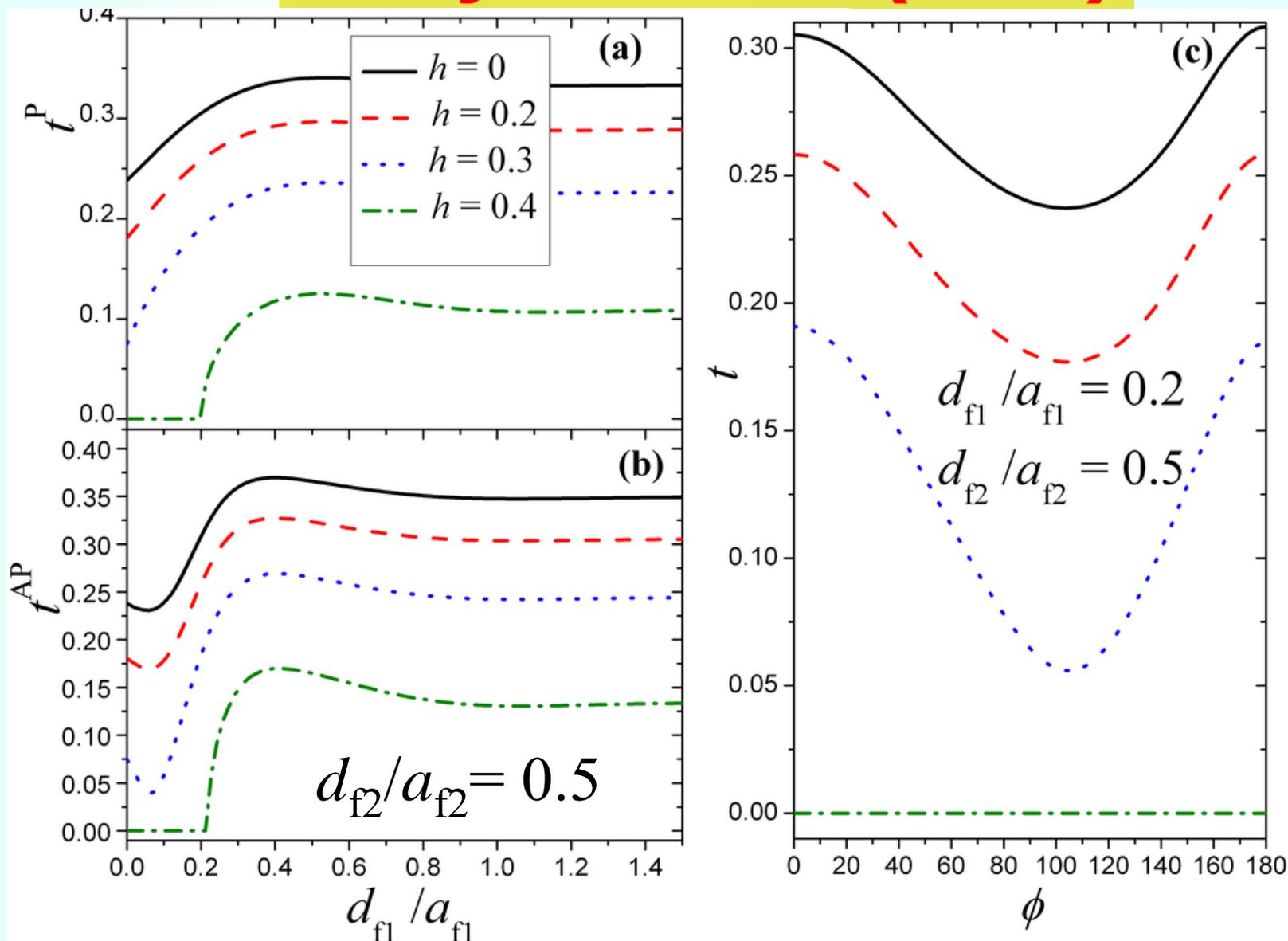
Результаты (FFS)



Значения остальных параметров следующие: $d_s/\xi_{s0} = 0.7$, $l_s/\xi_{s0} = 0.2$,
 $l_{f1}/a_{f1} = l_{f2}/a_{f2} = 0.25$, $\sigma_{s1} = \sigma_{s2} = 0.8$, $n_{sf1} = n_{sf2} = 1.5$, $I_1/\pi T_{cs} = I_2/\pi T_{cs} = 10$, $h = 0$.



Результаты (FFS)



Значения остальных параметров следующие: $d_s/\xi_{s0} = 0.6$, $l_s/\xi_{s0} = 0.2$, $\sigma_s = 2$, $n_{sf} = 1$, $l_{f1}/a_{f1} = 0.3$, $\sigma_{f1} = 10$, $I_1/\pi T_{cs} = 10$, $l_{f2}/a_{f2} = 0.3$, $\sigma_{f2} = 10$, $I_2/\pi T_{cs} = 10$.



Outline

1. Introduction

- The proximity effect
- The asymmetry origin in the FS structures
- Theoretical and experimental motivations

2. Asymmetrical spin switch (spin-valve)

- FSF asymmetrical system
- FFS asymmetrical system

3. Conclusions

In memory of Yu.A. Izyumov





Для **FSF** и **FFS** систем

- 1) минимум $t(\phi)$ может достигаться при отличном от нуля значении угла [Fominov *et al*, 2010];
- 2) для несимметричных F_1F_2S систем максимум $\Delta t(d_{f1,2})$ может быть значительно выше аналогичного значения для симметричной FFS системы, когда толщины обеих F слоев ($d_{f1} = d_{f2} = d_f$) меняются синхронно;
- 3) при увеличении d_{f2} разность Δt стремится к нулю, что обусловлено потерей когерентной связи между границами FF и FS в силу быстрого затухания парной амплитуды в F металле;
- 4) в отличие от **FSF** системы, величина Δt может быть отрицательна при определенных значениях параметров.
(?)





Выводы

- Асимметричность сильно влияет на критическую температуру и, соответственно, на условия наблюдения эффекта спинового переключателя («spin valve») при выборе параметров вблизи реализации возвратной сверхпроводимости
- Управляемая несоразмерность конечных F/S структур → конструированию парных амплитуд.

Учет (создание!) неэквивалентности слоев (границ) может являться средством тюнинга (настройки) конечных F/S структур.





The end ?





XXXV Международная зимняя школа
физиков-теоретиков «Кюуровка-2014»
февраль? март? 2014 г.

ЮБИЛЕЙНАЯ...

To be continued ...





Outline

1. Introduction

- The proximity effect
- The asymmetry origin in the FS structures
- Theoretical and experimental motivations

2. Asymmetrical spin switch (spin-valve)

- FSF asymmetrical system
- FFS asymmetrical system

3. Conclusions

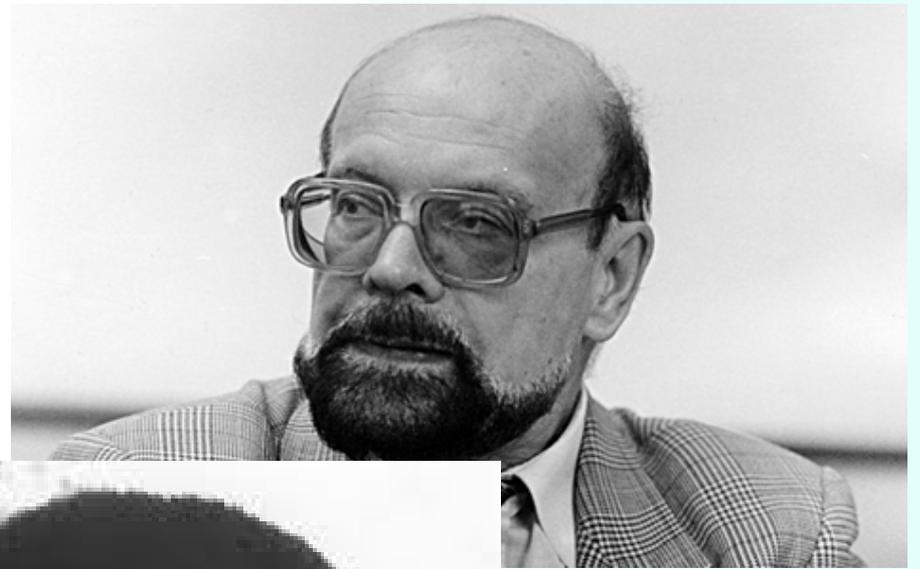
In memory of Yu.A. Izyumov

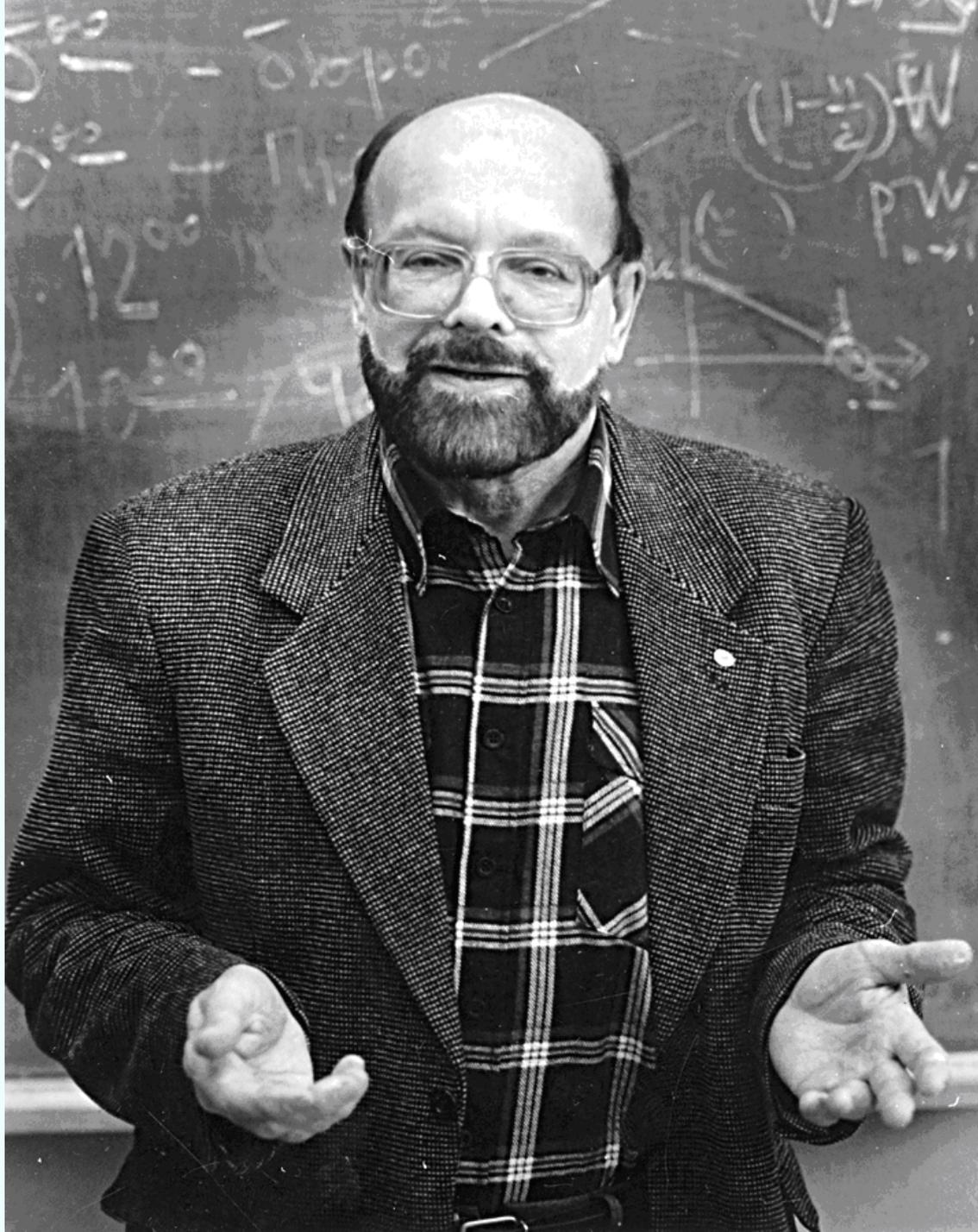






Участники первой "Коуровки" на "Коуровке-XXV" в 1994 г.
Стоят: М.И.Куркин, А.А.Кокин, В.Г.Песчанский, В.Г.Шавров, Ю.А.Изюмов,
А.А.Рухадзе, А.К.Звездин,
сидят: К.Б.Власов, В.М.Елеонский, Е.А.Туров, С.В.Вонсовский и В.П.Силин.





Борису Кочелаеву Поздравления 75-летнего...

Дорогой мой друг, Борис Иванович!

Прими от меня, которому уже исполнилось 75 в прошлом году, сердечные поздравления с Юбилеем. Кто-то бы сказал не «поздравления», а «соболезнование». Я категорически против. С высоты нашего с тобой возраста виден большой путь и результаты наших усилий.

Я не могу точно вспомнить, когда и где мы впервые встретились, но наши пути многие десятилетия шли рядом. Многие яркие события мы переживали вместе.

Во-первых, успехи твоих многочисленных учеников, в научной судьбе которых мне приходилось участвовать.

А помнишь наше с тобой оппонирование в Ленинграде, где мы жили в одной большой комнате на улице Халтурина возле Эрмитажа в Ленинграде?

А помнишь нашу встречу в Чикаго лет тридцать назад, и чем она закончилась? Помнишь как той ночью мы попали в клуб-стриптиз и какие там были девочки?

А многочисленные «Коуровки» с большой компанией твоих учеников и учениц, застолье и песни с казанской диаспорой?

Я хочу:

1. Оппонировать в Казани еще многим твоим ученикам.
2. Видеть тебя в «Коуровках» в окружении твоей большой свиты.
3. Присутствовать на твоём следующем юбилее.

Обнимаю, и поднимаю бокал за твое здоровье и дальнейшие успехи.

Твой Юра Изюмов

Апрель, 2009



Октябрь 1995, Казань, после защиты докторской Прошиным Ю....



Декабрь 2004, Казань, после защиты кандидатской мисс Коуровка ...





На кафедре теор. физики КГУ. После защиты.



Японский рестораник. В Казани ...





В музее КГУ ...



Коуровка 2008. «Прием» казанской делегации ...





Коуровка 2006. Устали ...





В трюмах кораллы и жемчуг,
Старый пиратский бриг.
Судно ведёт с похмелья
Сам капитан старик.

Припев:

Ночь - голубая тайна,
Сколько на небе звёзд!
Сколько в начале мая
Пролило горьких слёз.
Тонет пиратское судно,
Некому им помочь.
А на востоке тает
Та голубая ночь.
Море, верни мне сына!
Море, отдай мне дочь!
Больше они не увидят
Ту голубую ночь...

(привезено с Арктру из альпинистского лагеря Северо-Чуйские Белки
М.М. Носковым и Ю.А. Изюмовым в 1962 году)



"В трюмах полно..."

(переделано к 70-летию Ю.А. Изюмова в 2003 г.)

В трюмах полно загадок,
Но наш силен напор,
Твердо ведет команду,
Сам капитан - член-корр.

И уступают тайны

Натиску физиков-звезд:

Двадцать Восьмое мая -

За капитана тост!

В трюмах пусть будет жемчуг,

А на душе - весна!

70 - возраст силы,

Мудрости и озорства!

И уступают тайны

Натиску физиков-звезд:

Двадцать Восьмое мая -

За капитана тост!





Пусть будут встречи в Казани
И новых радостей вкус.
Новые с "лошадью сани"*
И на вершине арбуз! **
И уступают тайны
Натиску физиков-звезд:
Двадцать Восьмое мая -
За Изюмова тост!

Люда и Юра Прошины.
28 мая 2003 г.
Казань

*Коуровка-4. Катание на санях. "Изюмов! Если вы не лошадь, верните сани!"

** Подарок Лиде Чащиной. Пик Абая, Заилийское Алатау, 1968 г.

(рук. А.К. Кикоин)

«Из настоящего - в прошлое и будущее...» Ю.А. Изюмов, Екатеринбург, 2000 г.



