

P.Ya. Ufimtsev

50 Лет

Физической Теории Дифракции (ФТД)

ufim.la@verizon.net

Исполнилось в 2012 г. Этот год также был юбилейным и для Геометрической Теории Дифракции (ГТД), предложенной Келлером.

В связи с этими событиями журнал *Antennas & Propagation Magazine* опубликовал в 2013 г. специальную секцию из заказных статей под названием

**«Высоко-Частотные Методы
в Дифракционной Теории:
50 лет достижений в ГТД, ФТД
и относящихся к ним подходах».**

В секции 9 статей. Первой идет моя статья о ФТД (**PTD**)
а заключительной - статья Келлера о ГТД (**GTD**).

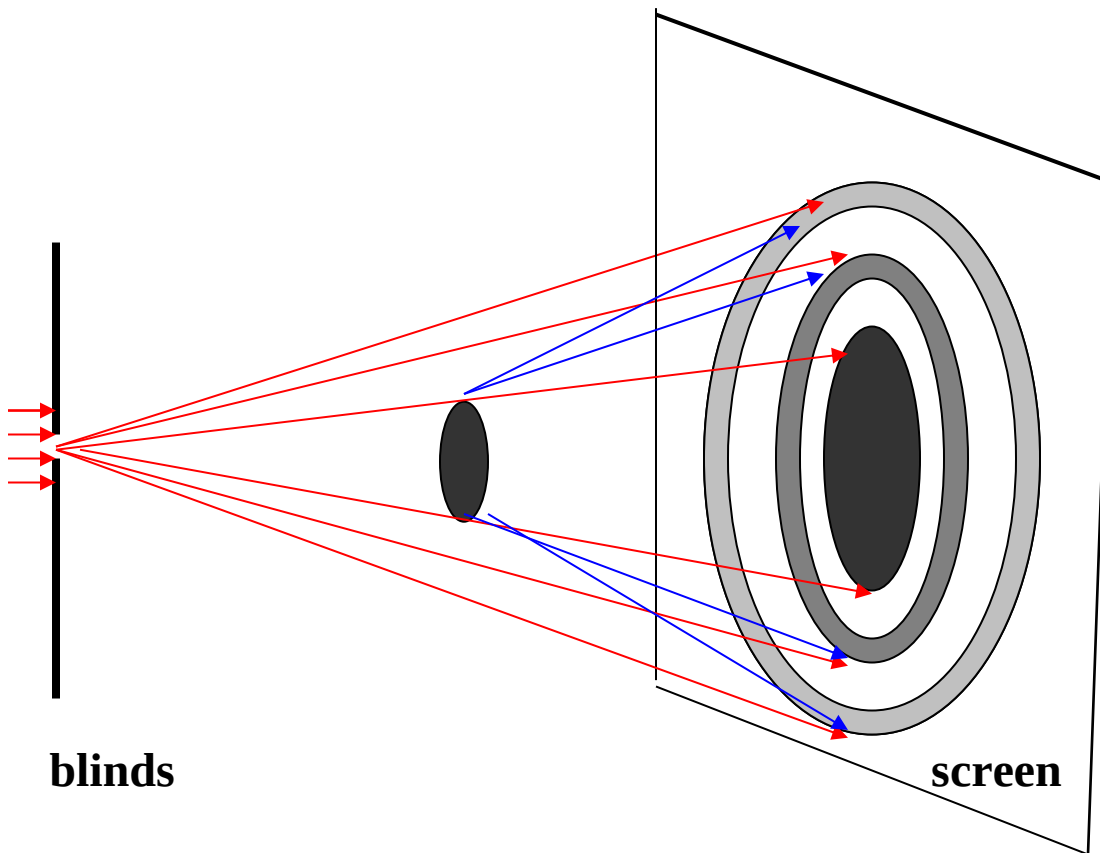
Данная лекция – это комментарии к ФТД.

**Фактически это будет краткое изложение статьи, упомянутой выше.
Это точная ссылка -**

**P.Ya. Ufimtsev, “The 50-Year Anniversary of the PTD:
Comments on the PTD’s Origin and Development”,
IEEE Antennas & Propagation Magazine,
vol. 55, № 3, June 2013, pp.18-28**

What is the Diffraction?

- **Grimaldi** (1665). Discovery of Diffraction



Simple Definition:

- any deviation in the wave behavior from GO laws

More general:

- **formation of wave fields in a space containing some objects**

- **Fresnel** (1818) - first quantitative theory of diffraction
Since then this phenomenon has been called
the **Fresnel diffraction**.

Discovery of Diffraction changed the World
It made a tremendous impact on Science
Better understanding of Wave Phenomena
Development of Technology

- **World of diffraction:**

We hear due to diffraction of acoustic waves

We see due to diffraction of light waves

Many modern technologies operate due to diffraction of waves:

Cell phone, iPhone, Radio, TV, Radar, Sonar

Mathematical Formulation

Задачи дифракции сводятся к решению волновых уравнений при заданных граничных условиях

Exact analytic solutions exist basically

- **For Simple shapes (лента, сфера, эллипсоид, ...) related to coordinate systems which allow separation of variables in the wave equation (вырожденные координаты трехосного эллипсоида)**
- **Infinite series are slow convergent for high frequencies and are Not of interest for modern H-F technologies**

- **Direct numeric methods**

MoM, Finite Differences, etc. also are not effective at high frequencies

На высоких частотах используются

Asymptotic Methods

- Watson transformations of infinite series
- Asymptotic solutions of integral equations
- Ray approaches: GTD and extensions
- Method PO, PTD, and extensions
- Limited accuracy, but allow useful estimations and clarify the physical picture of diffraction

Now consider in details

What is the Physical Theory of Diffraction (PTD)

- The term **Physical** Theory of Diffraction highlights that **physical concepts** play a central role in this theory.

Как будет показано в лекции ФТД построена
на **ТРЕХ Фундаментальных Физических Идеях - Концепциях.**

- Термин ФТД впервые был предложен в моем докладе

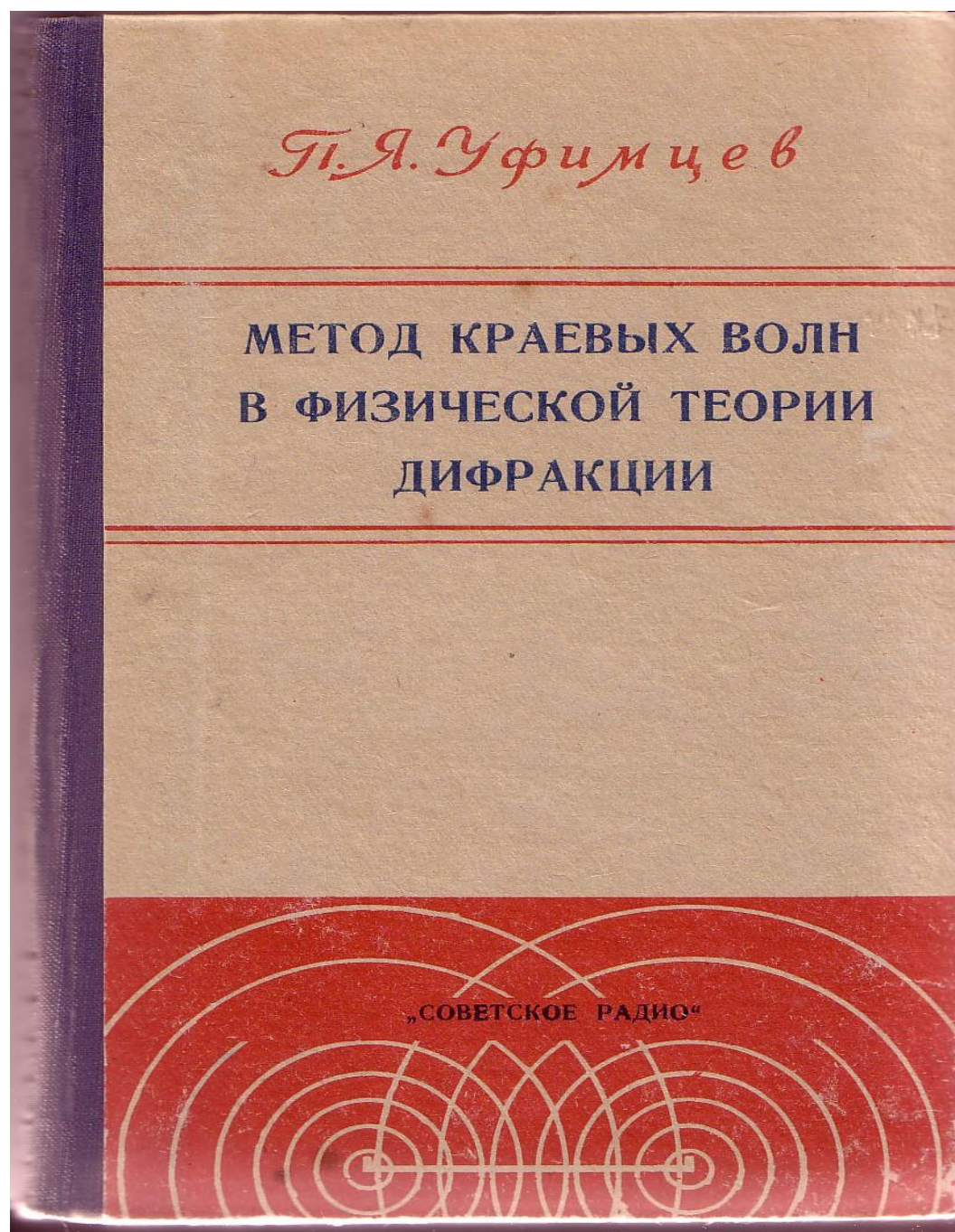
P. Ya. Ufimtsev, "**Physical Theory of Diffraction,**"

2nd All-Union Diffraction Symposium,

Gorky (Nizhny Novgorod) , USSR, 1962

И в книге

P.Ya. Ufimtsev, ***Method of Edge Waves in the Physical
Theory of Diffraction,*** Soviet Radio, Moscow, 1962



Москва, 1962

Как возникла ФТД

In 1954 after graduation from university I was selected to work in **ЦНИРТИ** (Central Research Radio Engineering Institute) of the Defense Ministry.

It was organized in 1943 by the **Stalin** decree.

В 2008 г. и 2013 г. в Москве в открытой печати вышли книги «65 Лет ЦНИРТИ» и «70 Лет ЦНИРТИ» с подробным описанием деятельности этого Института.

Теперь я имею право рассказать о ЦНИРТИ и о моей работе.

Это был **Центральный Институт по Проблемам Радиолокации.**

The initiator of this institute and its first director was

Academician A.I. Berg



Admiral-Engineer and a Deputy-Minister of the Defense

Many talented scientists worked in the Institute

Among them were World-Renowned scientists such as



Academician V.A. Fock

He was really a giant in Science - Fundamental results:

- Quantum Theory : Method Hartri –**Fock**, Theorem Born-**Fock**
- Теория Фока о Пространстве, Времени и Гравитации
- Теория Фока о Дифракции электромагнитных волн:
 - Установлен Принцип Локальности in HF diffraction
 - Введены Специальные функции –Функции Фока
 - Разработан Метод факторизации (method Wiener-Hopf-- **Фока**)



Academician M.A. Leontovich

В теории дифракции ему принадлежат фундаментальные результаты

- **Method of Parabolic Equation**
- **Impedance Boundary Conditions**

Замечательный ученый, Член-корреспондент АН СССР



L.A. Wainshtein

Ему принадлежат такие выдающиеся достижения как

- **Строгое решение задачи**
 - **Radiation from Open Waveguides**
- **Теория Открытых Резонаторов**
- **Nonlinear theory of UHF Electronics**

He was a manager of lab where I began work

There was a group that studied diffraction at simple shapes

Мне была поставлена задача —

- Дифракция на Сложных Телах (ракеты, самолеты,..)

Идея исследования -

Уточнить приближение Физической Оптики (ФО=РО**)**

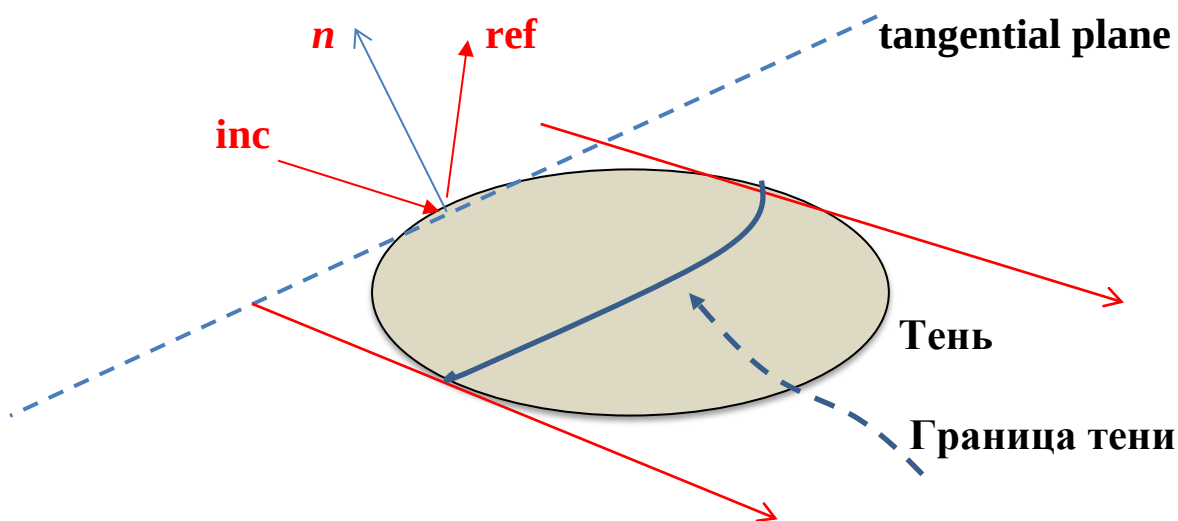
ФО was Introduced by Kirchhoff for scalar waves (1882)

and extended by Macdonald for Electromagnetic waves (1912)

В этом приближении

**дифракционное поле рассматривается как излучение создаваемое
поверхностными токами, которые определяются ПРИБЛИЖЕННО
согласно Геометрической Оптике**

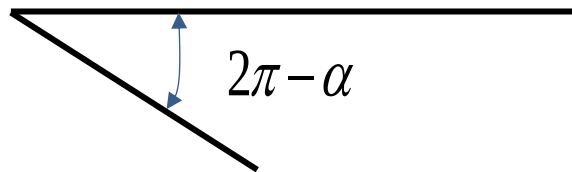
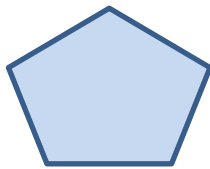
$$J = J^{GO}$$



Но полный ток содержит также диф. компоненту J^{Dif} .

Однако вдали от границы тени J^{Dif} мала по сравнению с J^{GO} , а вблизи границы тени она сравнима с J^{GO} . Эти оценки верны для гладких выпуклых тел.

- For objects with edges J^{Dif} концентрируется **near the edges**.



В зависимости от поляризации

$$J_{\perp}^{Dif} = O(J^{GO}) \text{ или}$$

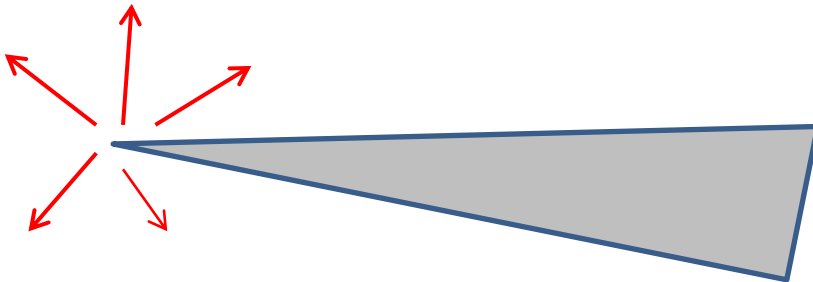
$$|J_{\parallel}^{Dif}| \gg |J^{GO}| \text{ with } \alpha > \pi, \quad J_{\parallel}^{Dif} \rightarrow \infty \text{ with } r \rightarrow 0$$

Из этих оценок следует что

- ФО **может правильно** описывать Отраженные Лучи
- Но ФО **не может правильно** определить краевые волны (КВ)
 - Моя задача была построить правильные асимптотики для КВ и уточнить ФО

Ключ к решению - это принцип локальности:

**Ток вблизи острой кромки сложного тела
асимптотически (при $f = \omega / 2\pi \rightarrow \infty$)
эквивалентен току на касательном клине**



Ее точное решение известно (Зоммерфельд-1896, Макдональд -1902).

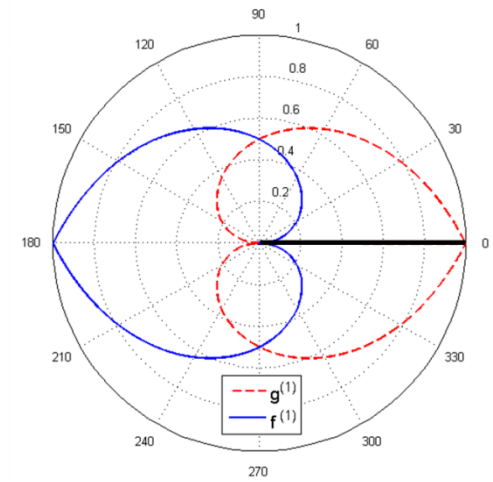
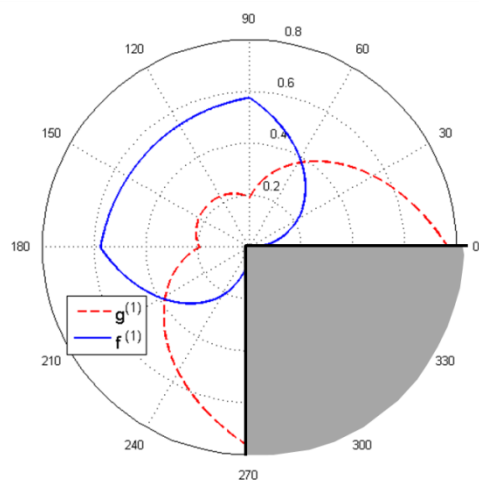
Оно описывает **полное диф. поле.**

Я выделил из полного поля ту его часть, которая создается

только диф. током J^{Dif} .

Она имеет вид краевых волн. Их диаграммы направленности

показаны для прямоугольного клина и полуплоскости



Этот результат был опубликован в ЖТФ в 1957 г.

Там же **впервые** была сформулирована

Центральная идея ФТД:

- Из полного тока на поверхности тела выделяется его диф. компонента J^{Dif} . **В общем случае она неизвестна**
- Мы находим ее **приближенно-асимптотически**, исходя из принципа локальности и решения канонической задачи
- Затем интегрируем найденную асимптотику и находим **приближенное выражение** для поля U^{Dif} излучаемого током J^{Dif}

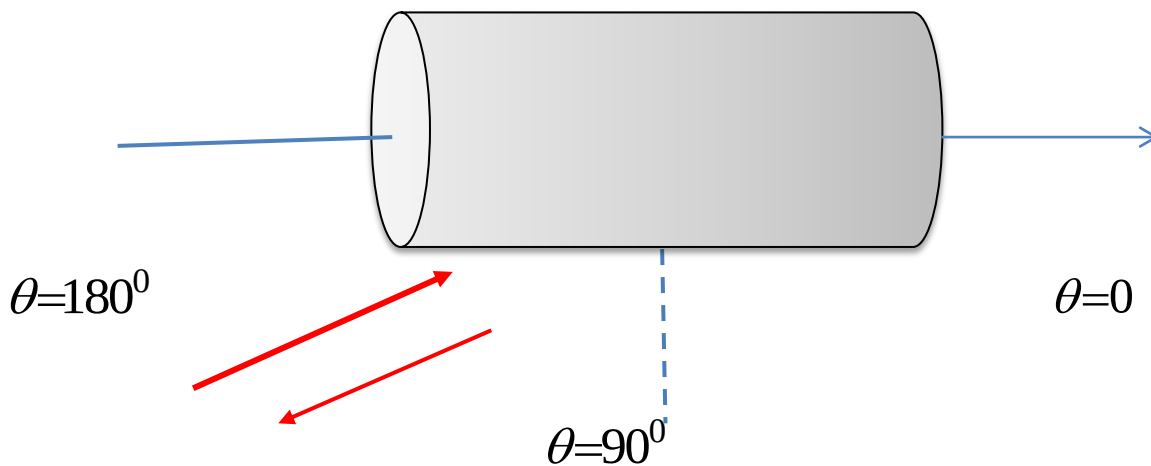
В результате полное диф. поле определяется как сумма

$$U^{\text{PTD}} = U^{\text{PO}} + U^{\text{Dif}}$$

- First I applied this PTD idea to the **Strip and Disk** diffraction problems. The results were inspiring –обнадеживающие

- Next problem

Scattering at a finite metallic cylinder with flat bases



Обратное рассеяние – Backscattering

Вычислена диаграмма рассеянного поля

для цилиндра с параметрами $d = \lambda$, $L = 5\lambda$

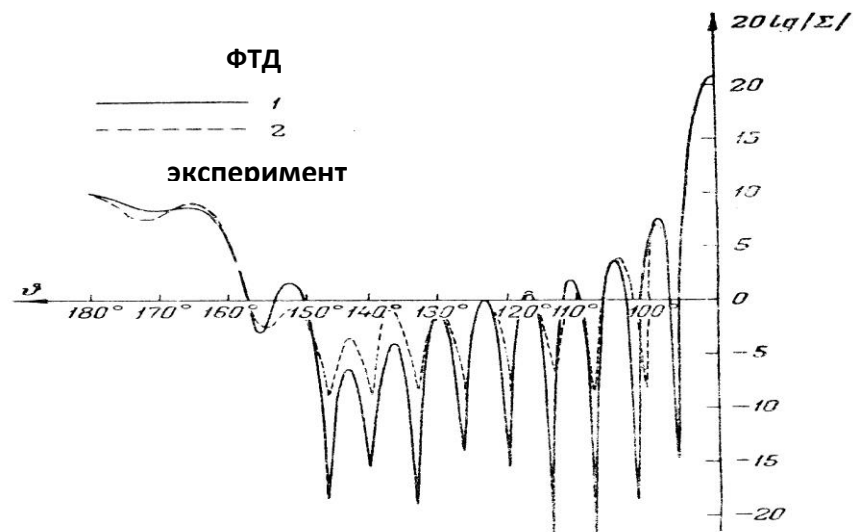


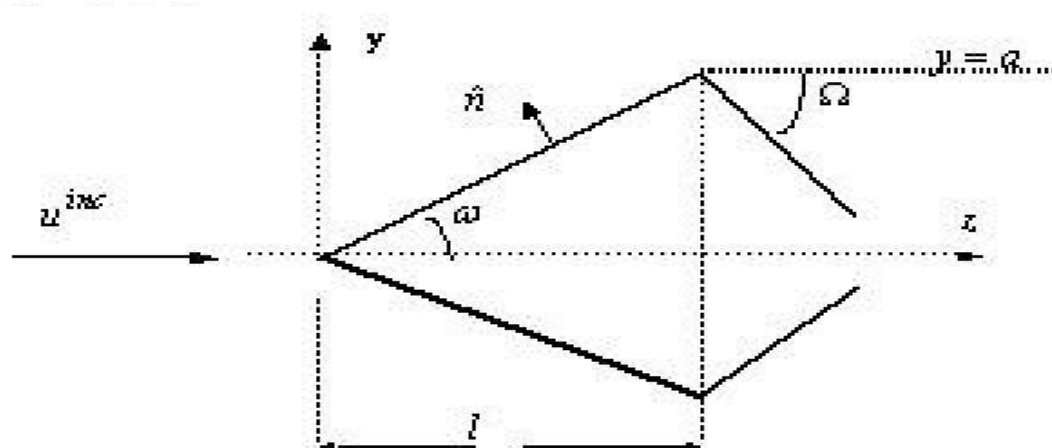
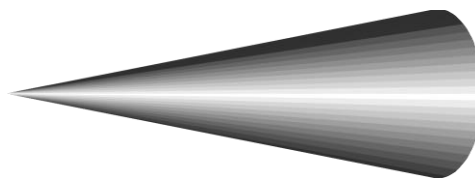
Рис. 7.
 $ka = \pi$. 1 — теоретическая; 2 — экспериментальная. $H \perp yoz$.

ЖТФ – 1958 г.

- Эта теория для цилиндра широко использовалась в СССР для калибровки измерительных полигонов и безэховых камер.
- Затем я применил ФТД для исследования дифракции на моделях баллистических ракет.

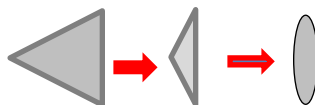
Пример

Отражение от модели Головной Части Ракеты в форме конуса



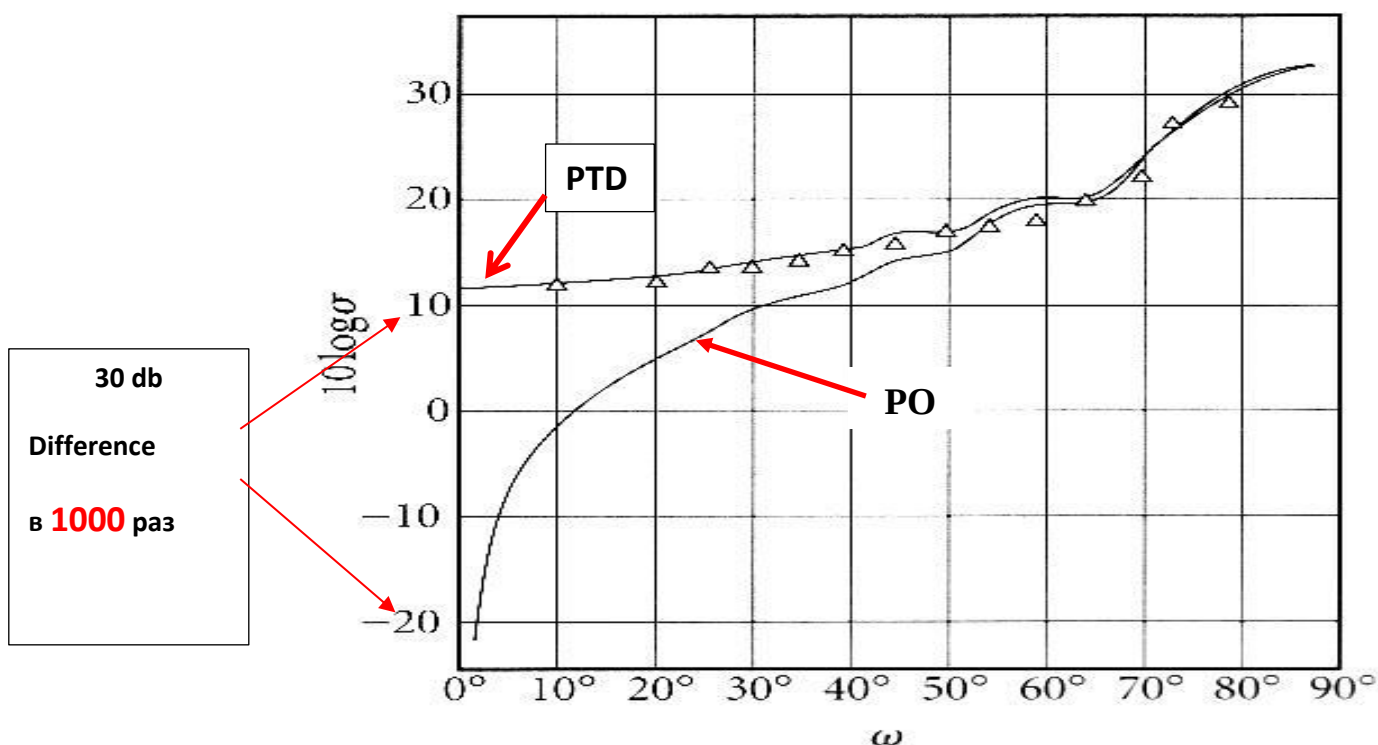
ФТД
$$E_x = -H_y = -E_{0x} \left[\frac{i}{2} \tan^2 \omega (1 - e^{i2kl}) + ka \frac{\frac{2}{n} \sin \frac{\pi}{n}}{\cos \frac{\pi}{n} - \cos \frac{2\omega}{n}} e^{i2kl} \right] \frac{e^{ikR}}{2kR}$$

When the angle $\omega \rightarrow 90^\circ$, the cone transforms into the disk



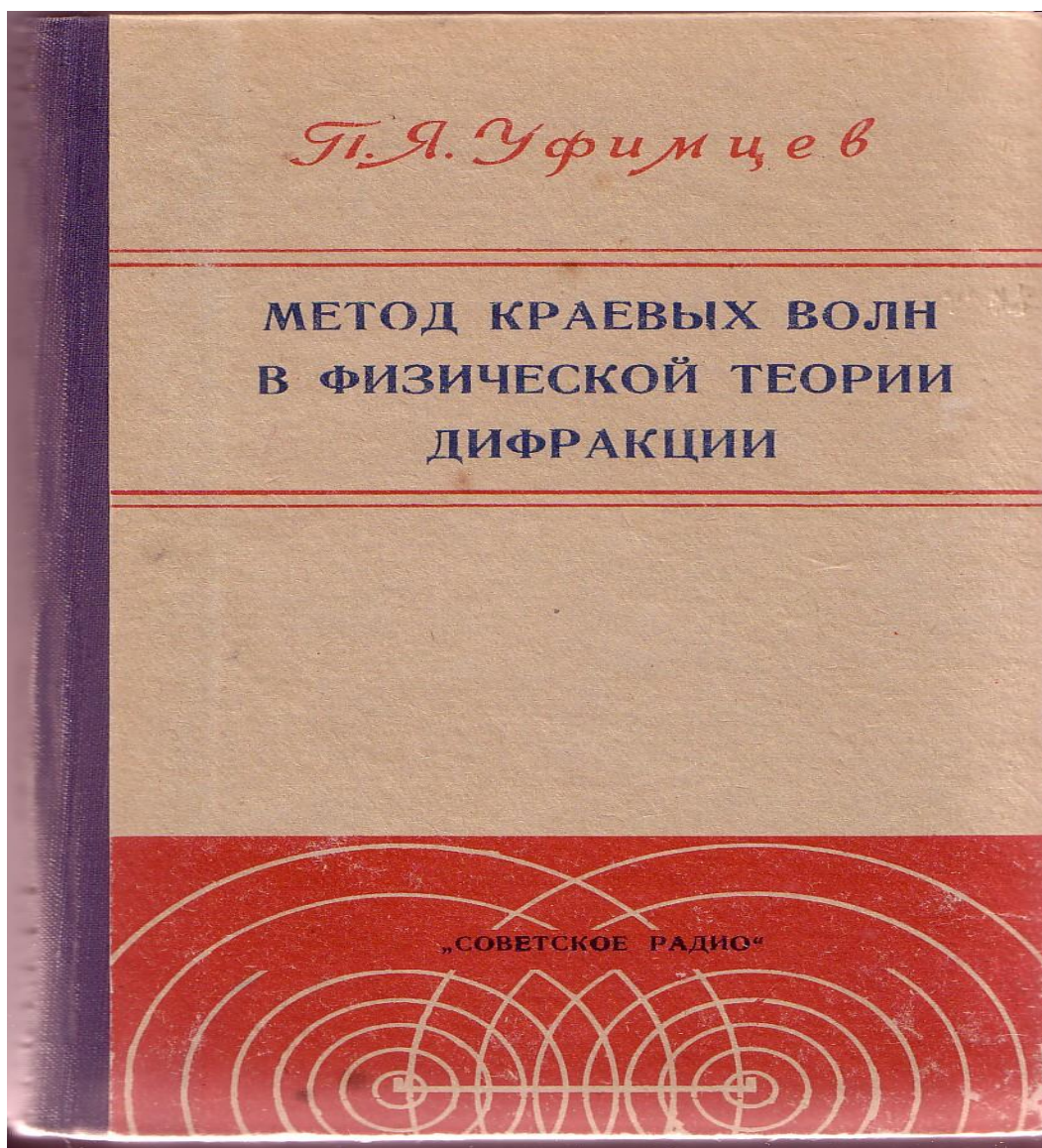
При этом отраженное поле изменяется как показано здесь:

Experimental validation of PTD



ФТД удовлетворительно согласуется с экспериментом, тогда как ФО дает неверные результаты. Ее погрешность достигает 30 dB , т.е. ФО значения **в 1000 раз меньше** экспериментальных!

- В ЦНИРТИ ФТД использовалась для расчетов отражения радарных волн от баллистических ракет.
- А в США - для расчетов отражения от самолетов. Там моя книга



была использована при конструировании самолетов невидимых для радаров.

Первое сообщение - в New York Times (Sci. Times Sec.), 14 мая 1991 г.

“Soviet Theory was critical in the design of USA Stealth Aircraft”



Stealth Fighter F-117



Stealth Bomber B - 2

История с использованием ФТД в дизайне этих самолетов нашла отражение в фильме

[Русский Стелс: В погоне за невидимкой / Russian Stealth](#)

Фильм был создан на Телеканале «Россия-1» в 2007 г. Он имеется на вебсайте - [rutube.ru...](#) Недавно на тех же принципах был создан **Stealth- Истребитель и в России**

Следующий этап в развитии ФТД

Исследовавние Дифракции на Черных Телах

Повод - Project for RAM

Снизить мощность рассеянного поля на **40 dB** , т.е. в **10 000** раз

Limiting case – Reflection Coefficient equals Zero

Черные Тела (ЧТ)

Это - вторая физическая идея ФТД

Для **тонких экранов модель ЧТ** - использована Кирхгофом
Я использовал ее для **Объемны Тел**
и получил новые результаты.

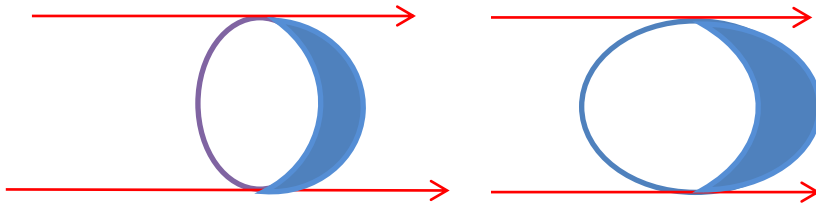
Наиболее важные из них:

- **ЧТ создают рассеянное поле !**

Оно сосредоточено в теневой области –

- **Теневое Излучение (ТИ)**

- Была сформулирована Теорема о Теневом Контуре



«Различные ЧТ, имеющие одинаковый теневой контур, создают одинаковое рассеянное поле»

- Было показано, что Полная Мощность ТИ по всем направлениям

$$P_{\text{Черное Тело}}^{\text{tot}} = \frac{1}{2} P_{\text{Полностью отражающее}}^{\text{tot}}$$

Это **фундаментальный** результат. Он устанавливает

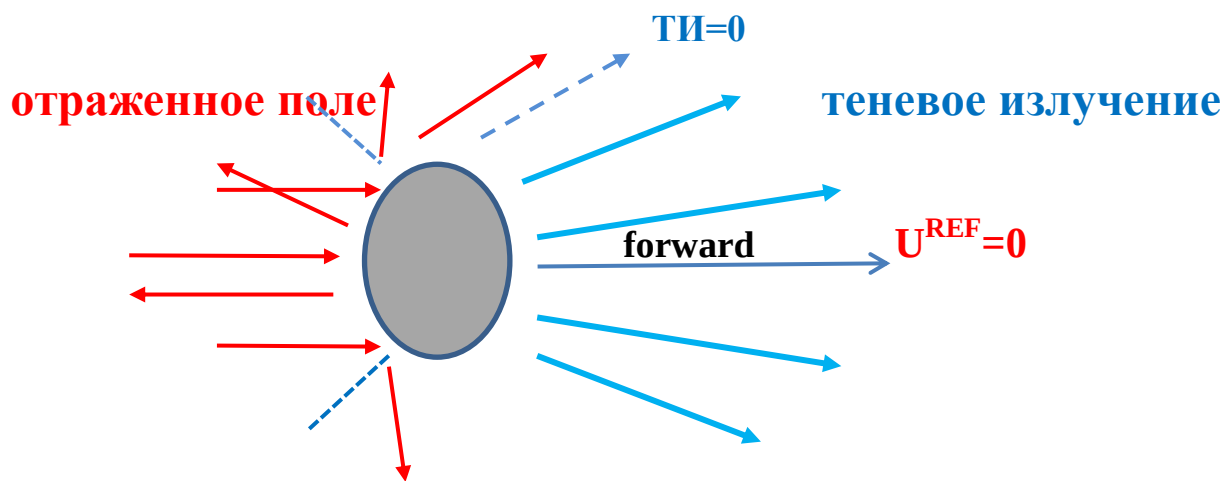
Дифракционный Предел снижения рассеянного поля.

Он означает, что с помощью любых РПМ **в принципе невозможно** полностью замаскировать отражающий объект

- Недавно (AP Magazine, 2008) мной было показано, что Теневое Излучение является **составной частью** поля ФО:

Это поле можно аналитически представить в виде

$$U^{PO} = U^{REF} + U^{TI}$$



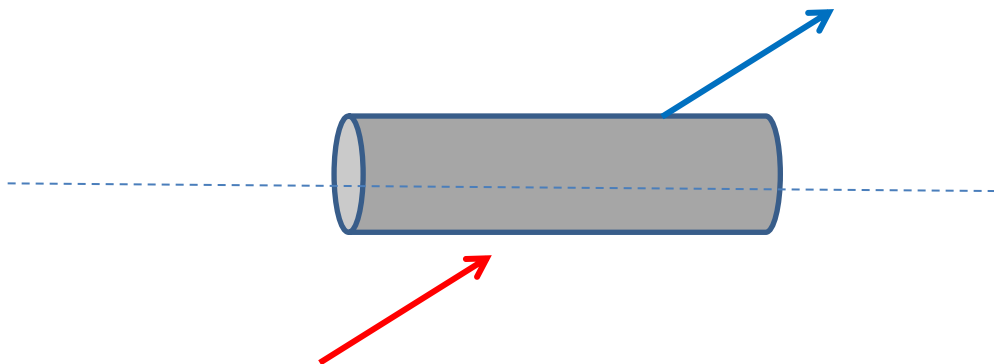
- Для этих компонент поля получены следующие асимптотические оценки:

$U^{TI} = 0$ in the directions of reflected rays

$U^{TI} = 0$ в направлении к источнику падающей волны
(backscattering – радиолокационный случай)

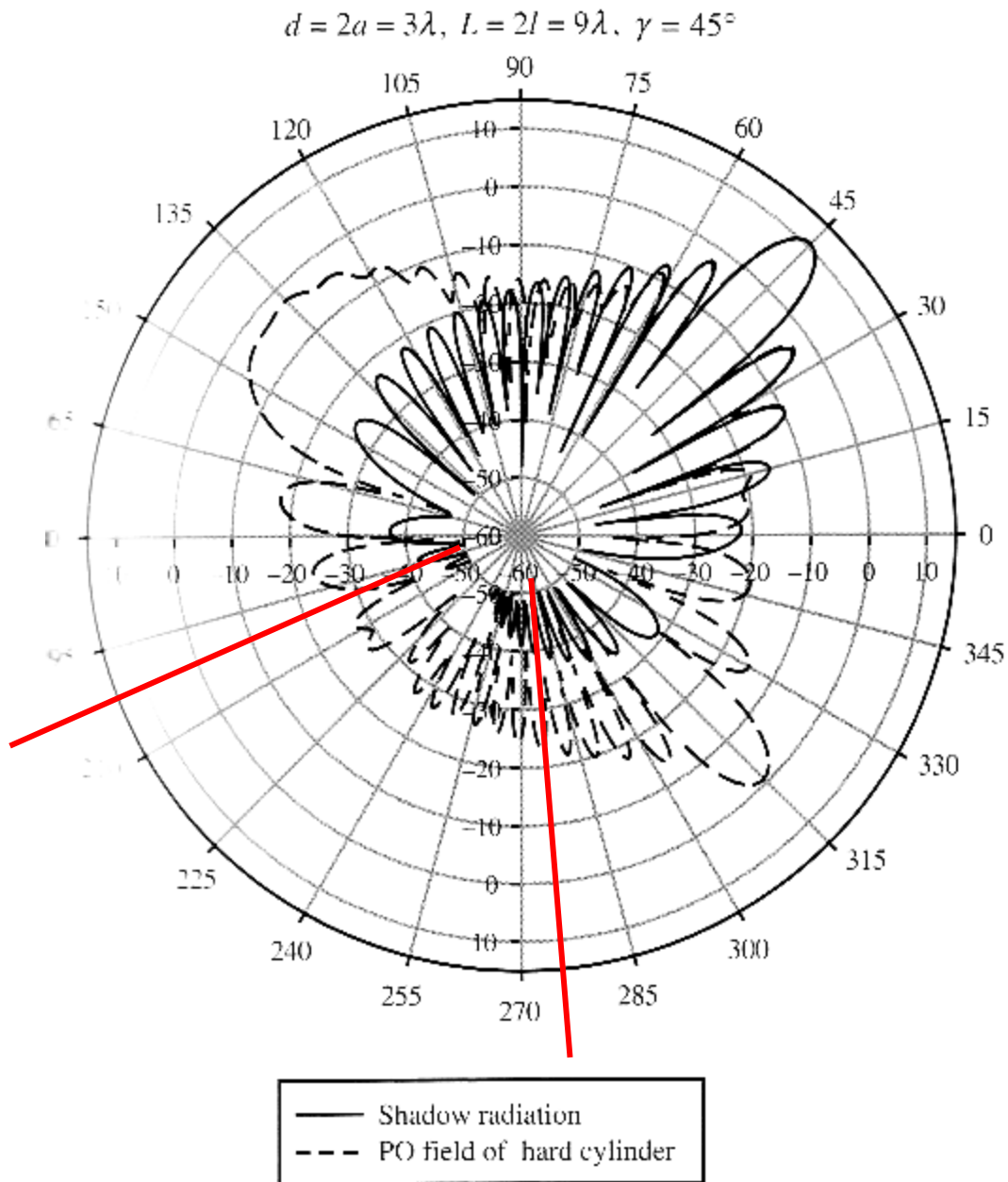
$U^{REF} = 0$ в главном теновом направлении

- **Теперь посмотрим как выглядит ТИ на примере дифракции акустических волн на жестком цилиндре (с неподвижной стенкой)**



Наклонное падение - 45^0 .

Вычислена диаграмма рассеянного поля



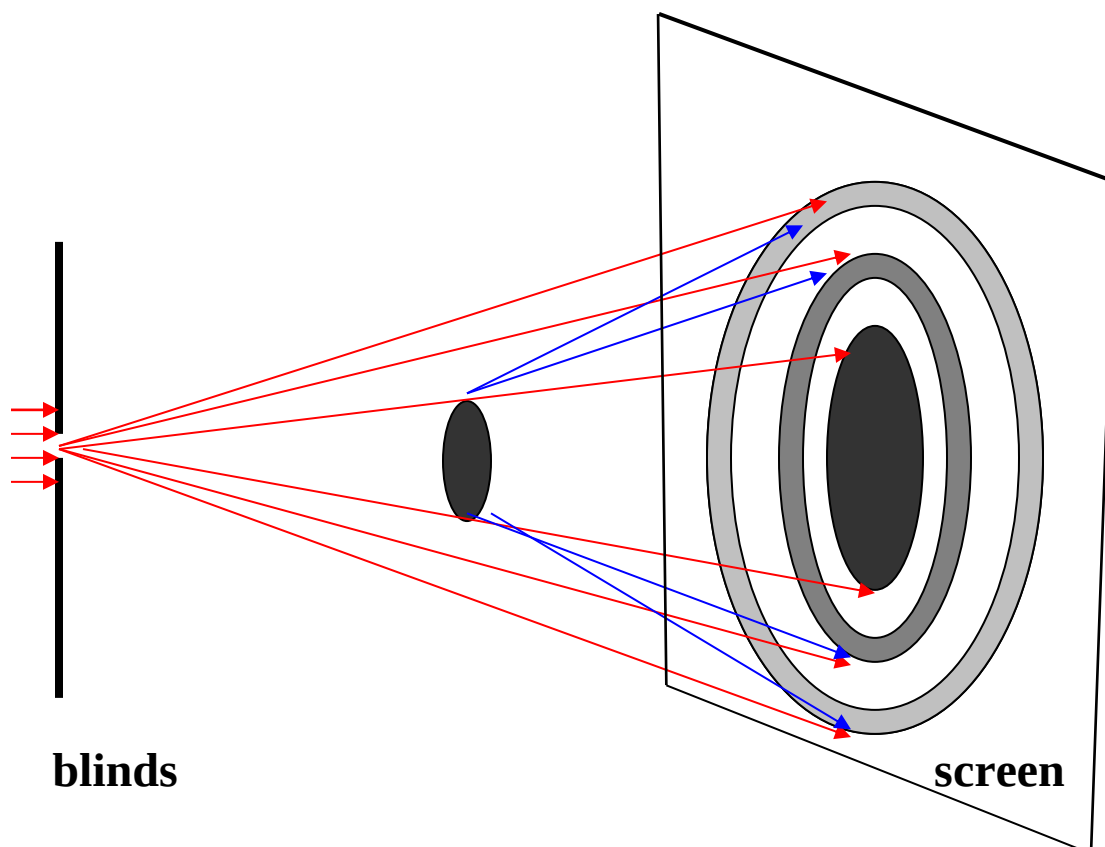
ТИ доминирует в теневой области.

Вследствие *поперечной диффузии* оно также проникает далеко в освещенную область.

- **ТИ – важная компонента диф. поля, которая проясняет его физическую структуру**

- Теория ТИ также позволяет установить **физическую природу** дифракции Френеля.

Вернемся к опытам Грималди



Темные Кольца – это результат интерференции Теневого Излучения (**blue lines**) и Падающих лучей (**red lines**) .

Здесь ТИ гасит падающий свет

- Эта интерпретация дифракции Френеля согласуется с математической теорией Фока (1950).

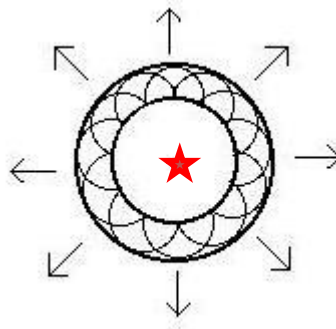
Следующий этап в развитии ФТД

Основан на

Концепции Элементарных Краевых Волн (ЭКВ)

Это -Третья Физическая идея ФТД

Ее можно рассматривать как Обобщение
Huygens' Principle of **Elementary Waves** (1690)

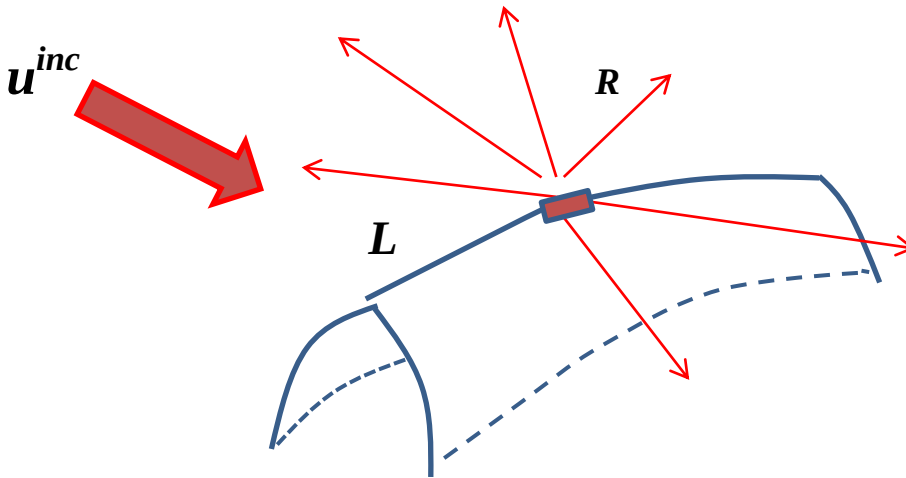


Exact mathematical formulation by Helmholtz (1859)

По аналогии с элементарными волнами Гюйгенса-Гельмгольца

в **ФТД** **вводится понятие ЭКВ** –

– это дифракционная волна du , создаваемая бесконечно малым элементом ребра.



Полная волна от всего ребра находится интегрированием ЭКВ

$$u = \int_L du$$

- Ключевая Задача состоит в вычислении ЭКВ.

Задача сводится к исследованию

Сложных Трехкратных Интегралов в комплексной плоскости.

ТФКП и Метод Стационарной Фазы.

Относительно простые асимптотики для ЭКВ

- Пример: акустическая ЭКВ в случае граничных условий Дирихле ($u = 0$ на поверхности тела)

$$du_s = u^{inc}(\zeta) \frac{d\zeta}{2\pi} F_s(\vartheta, \varphi) \frac{e^{ikR}}{R}.$$

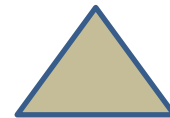
F –дифракционный коэффициент

$$F_s = -U_t(\sigma_1, \varphi_0) \sin^2 \gamma_0 \quad \text{где}$$

$$U_t(\sigma_1, \varphi_0) = \frac{\pi}{2\alpha \sin^2 \gamma_0} \left[\cot \frac{\pi(\sigma_1 + \varphi_0)}{2\alpha} - \cot \frac{\pi(\sigma_1 - \varphi_0)}{2\alpha} \right],$$

Аналогичные выражения получены для Электромагнитных Волн.

Развитая теория ЭКВ была использована
для решения ряда задач:



- Дифракция на многогранных цилиндрах
- На конечных телах вращения (ТВ)
 - Диск
 - Усеченный конус
 - Усеченный параболоид
 - Усеченная сфера
 - Произвольные выпуклые усеченные ТВ
- Исследовалась Вторичная и Многократная дифракция КВ
- Были получены асимптотики для КВ в окрестности фокусов, каустик и границ падающих и отраженных лучей

- Применяя метод стационарной фазы к интегралу для полной краевой волны

$$u = \int_L du,$$

получаем асимптотики

$$u_{s,h} = u^{inc}(\zeta_{st}) f_{s,h}(\varphi, \varphi_0, \alpha) \frac{e^{i\pi/4}}{\sqrt{2\pi k \Phi''(\zeta_{st})}} \frac{e^{ikR}}{R}$$

которые можно интерпретировать как **дифракционные лучи**.

- Именно эти выражения постулируются в ГТД Келлера. Там они постулируются **как гипотеза**, мы же получили их **в результате асимптотической оценки** ФТД интегралов. Таким образом, ГТД можно интерпретировать как асимптотическую форму ФТД.
- Существенное преимущество ФТД по сравнению с ГТД состоит в том, что наши интегралы ФТД позволяют вычислять поле всюду, включая окрестности фокусов, каустик, границ тени. Т.е. там, где поле не имеет лучевой структуры и где ГТД неприменима в принципе. Согласно ГТД поле там обращается в бесконечность.

Точность ФТД

- ФТД правильно описывает только **главный член** в асимптотическом разложении для КВ.
- Это максимальная точность достижимая в современной теории дифракции для трехмерных тел конечных размеров **с острыми краями**
- Только в задачах для простых тел (лента, сфера, эллипсоид, параболоид, ...) удастся построить асимптотики высоких порядков.
- В частности для бесконечно длинной ленты в моей книге

"The Lockheed F-117 Stealth fighter and the Northrop B-2 Stealth Bomber play key roles in today's United States Air Force. These were the first two major aircraft designs to employ the principles of Pyotr Ufimisev's Physical Theory of Diffraction (PTD)."
From foreword by Kenneth M. Mitzner

This volume is a new revised printing which includes additional comments and incorporates corrections of misprints found in the first printing. It supplements *Fundamentals of the Physical Theory of Diffraction* (John Wiley & Sons, Inc., 2007). Together these two books provide a comprehensive description of the high-frequency asymptotic technique—Physical Theory of Diffraction (PTD)—widely used in antenna design and RCS calculations. This book contains basic original ideas of PTD, examples of its practical application, and its validation by the mathematical theory of diffraction. The derived analytic expressions are convenient for numerical calculations and clearly illustrate the physical structure of the scattered field.

This book is an essential resource for researchers involved in designing antennas and RCS calculations. It is also useful for students studying high-frequency diffraction techniques.

KEY TOPICS

- > Theory of diffraction at black bodies introduces the Shadow Radiation, a fundamental component of the scattered field
- > RCS of finite bodies of revolution—cones, paraboloids, etc.—models of construction elements for aircraft and missiles
- > Scheme for measurement of that part of a scattered field which is radiated by the diffraction (so-called nonuniform) currents induced on scattering objects
- > Development of the parabolic equation method for investigation of edge-diffraction
- > New exact and asymptotic solutions in the strip diffraction problems, including scattering at an open resonator

BOOKS OF RELATED INTEREST

Fundamentals of the Physical Theory of Diffraction, P.Ya. Ufimtsev; ISBN 9780470097717

Radar Cross Section, Second Edition - Knott, Tukey and Shaffer; ISBN 9781891121258

Advances in Bi-static Radar - Willis and Griffiths, Editors; ISBN 9781891121487

Introduction to RF Stealth - D. Lynch, Jr.; ISBN 9781891121210



SciTech Publishing, Inc., Raleigh, NC
scitechpublishing.com

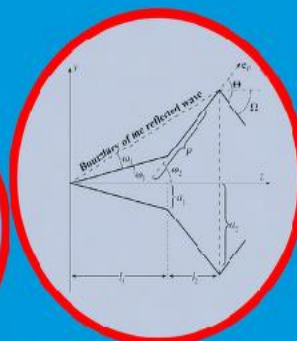


UFIMTSEV

Theory of Edge Diffraction
in Electromagnetics

Theory of Edge Diffraction in Electromagnetics

Origination and Validation of the Physical Theory of Diffraction



Revised Printing

P. Ya. Ufimtsev



построены равномерные асимптотики с какой угодно высокой точностью.

- Точность в пределах первого члена асимптотики обычно приемлема в инженерных расчетах

- **Леонтович:**

Он считал, что в асимптотическом решении **полезным** является **только его первое приближение.**

Действительно, **высшие члены асимптотики**, обычно не имеют практического значения. Они малы по величине, и довольно сложны для вычислений



Цель этой лекции -дать общее представление о ФТД .

Более полное представление дано в статье

Р.Ya. Ufimtsev, “The 50-Year Anniversary of the PTD”, *APM*, June 2013

Детальное изложение - в моих книгах:

«Теория Дифракционных Краевых Волн»

"The Lockheed F-117 Stealth Fighter and the Northrop B-2 Stealth Bomber play key roles in today's United States Air Force. These were the first two major aircraft designs to employ the principles of Pyotr Ufimtsev's Physical Theory of Diffraction (PTD)."
From foreword by Kenneth M. Mitzner

This volume is a new revised printing which includes additional comments and incorporates corrections of misprints found in the first printing. It supplements *Fundamentals of the Physical Theory of Diffraction* (John Wiley & Sons, Inc., 2007). Together these two books provide a comprehensive description of the high-frequency asymptotic technique—Physical Theory of Diffraction (PTD)—widely used in antenna design and RCS calculations. This book contains basic original ideas of PTD, examples of its practical application, and its validation by the mathematical theory of diffraction. The derived analytic expressions are convenient for numerical calculations and clearly illustrate the physical structure of the scattered field.

This book is an essential resource for researchers involved in designing antennas and RCS calculations. It is also useful for students studying high-frequency diffraction techniques.

KEY TOPICS

- > Theory of diffraction at black bodies introduces the Shadow Radiation, a fundamental component of the scattered field
- > RCS of finite bodies of revolution—cones, paraboloids, etc.—models of construction elements for aircraft and missiles
- > Scheme for measurement of that part of a scattered field which is radiated by the diffraction (so-called nonuniform) currents induced on scattering objects
- > Development of the parabolic equation method for investigation of edge-diffraction
- > New exact and asymptotic solutions in the strip diffraction problems, including scattering at an open resonator

BOOKS OF RELATED INTEREST

- Fundamentals of the Physical Theory of Diffraction*, P.Ya. Ufimtsev; ISBN 9780470097717
- Radar Cross Section*, Second Edition - Knott, Tuley and Shaffer; ISBN 9781891121258
- Advances in Bi-static Radar* - Willis and Griffiths, Editors; ISBN 9781891121487
- Introduction to RF Stealth* - D. Lynch, Jr.; ISBN 9781891121210



SciTech Publishing, Inc., Raleigh, NC
scitechpublishing.com



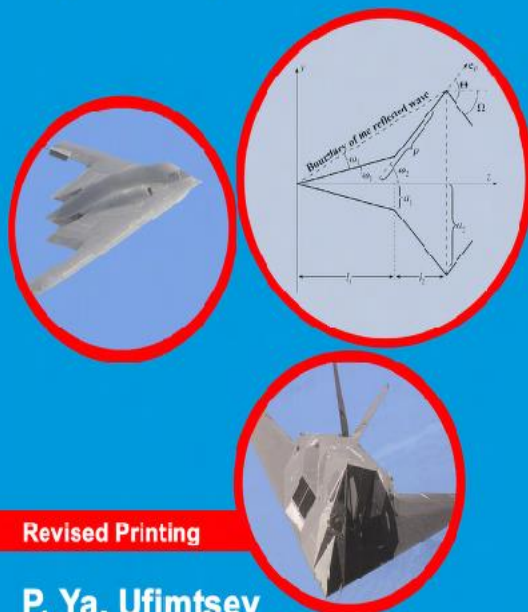
UFIMTSEV

Theory of Edge Diffraction
in Electromagnetics



Theory of Edge Diffraction in Electromagnetics

Origination and Validation of the
Physical Theory of Diffraction



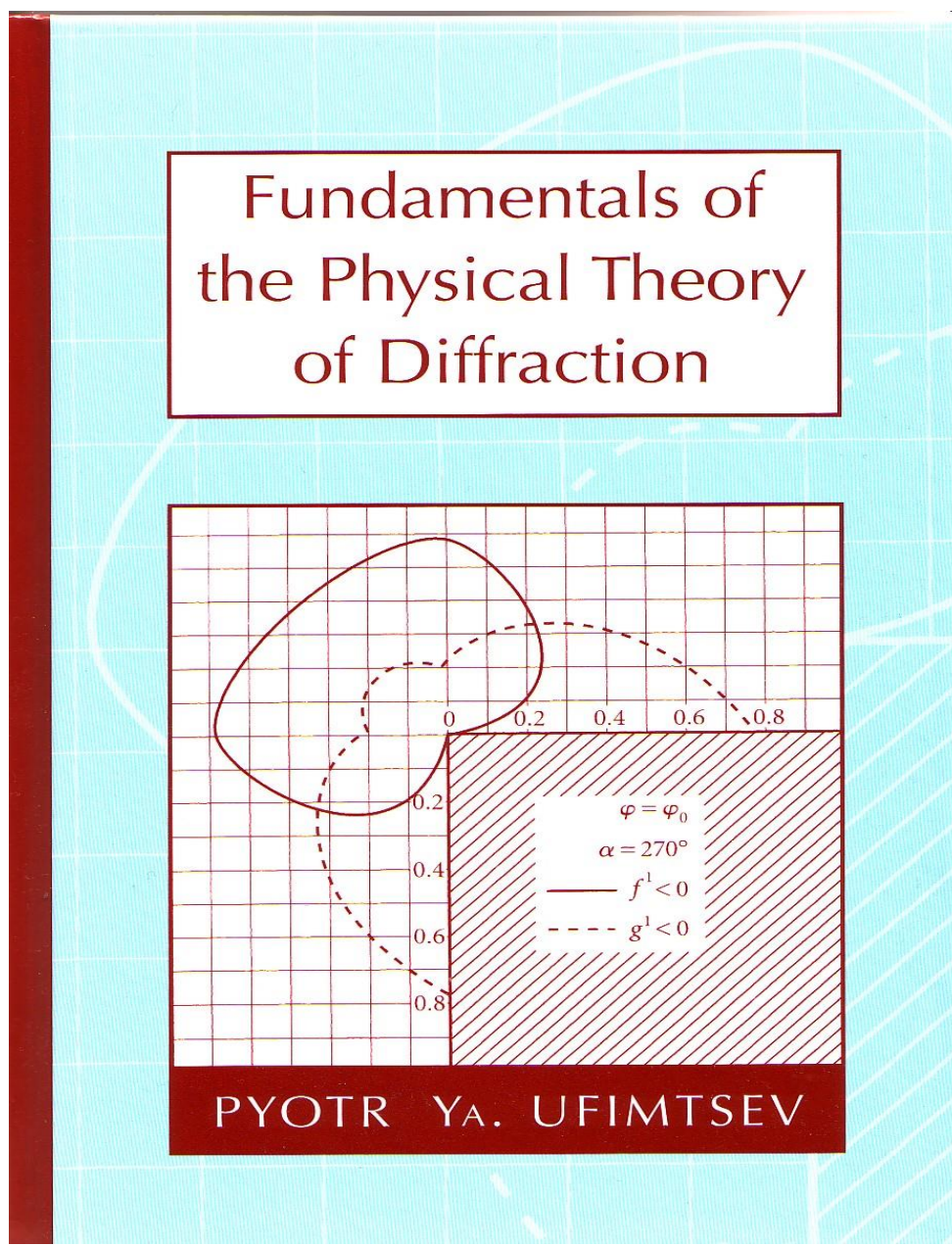
Revised Printing

P. Ya. Ufimtsev

SciTech, 2009

Переведена на русский язык, Бином, Москва, 2012

«Основы Физической Теории Дифракции»



Wiley & Sons, 2007

Осенью того же года по этой книге я прочитал курс лекций на Физическом Факультете МГУ.

Книга издана также и на русском языке, Бином, Москва, 2009

«Основы ФТД», 2-е издание

15/16in

The book is a complete, comprehensive description of the modern physical theory of diffraction (PTD) based upon the concept of elementary edge waves. The theory is demonstrated with examples of the diffraction of acoustic and electromagnetic waves at perfectly reflecting objects.

Readers develop the skills to apply PTD to solve various scattering problems. The derived analytic expressions clearly illustrate the physical structure of the scattered field. They additionally describe all of the reflected and diffracted rays and beams, as well as the fields in the vicinity of caustics and foci. Shadow radiation, a fundamental component of PTD, is introduced and proven to contain half the total scattered power. The equivalence relationships between acoustic and electromagnetic diffracted waves are established and emphasized. Throughout the book, the author enables readers to master both the theory and its practical applications.

- Plotted numeric results supplement the theory and facilitate the visualization of individual contributions of distinct parts of the scattering objects to the total diffracted field
- Detailed comments help readers understand and implement all the critical steps of the analytic and numeric calculations
- Problem sets in each chapter give readers an opportunity to analyze and investigate the diffraction phenomena

PYOTR YA. UFIMTSEV, PhD, D.Sc, has been recognized for his outstanding work in the theory of diffraction and propagation of electromagnetic and acoustic waves. Dr. Ufimtsev has been affiliated with the Central Research Radio Engineering Institute of the USSR Defense Ministry, Moscow; the Institute of Radio Engineering and Electronics of the USSR Academy of Sciences, Moscow; the Moscow Aviation Institute; and the University of California at Los Angeles and Irvine. Among Dr. Ufimtsev's many honors and awards are the USSR State Prize and the Leroy Randle Grumman Medal.

Subscribe to our free eNewsletter at wiley.com/enewslenters

www.wiley.com

WILEY



Also available
as an ebook

Cover Image: Pyotr Ya. Ufimtsev



Ufimtsev

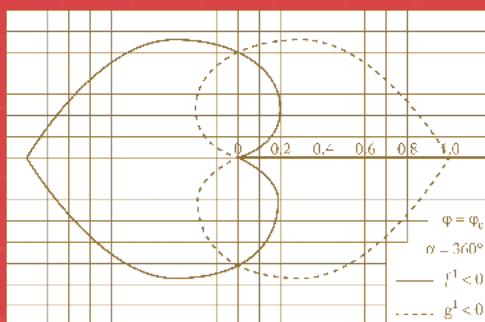
Fundamentals of the
Physical Theory of Diffraction

Second
Edition

WILEY

Fundamentals of the Physical Theory of Diffraction

Second Edition



Pyotr Ya. Ufimtsev



WILEY

Wiley & Sons, 2014

- Более 40% новых результатов !
- В конце каждой главы даны задачи и их решения
- MATLAB программы для дифракционных полей
- Wiley имеет электронную версию, E-book

- Все эти книги содержат
только оригинальные результаты ФТД
полученные **АВТОРОМ**,
Некоторые из них - в сотрудничестве с коллегами.
- В книгах имеется обширная библиография работ, относящихся к ФТД и к другим, альтернативным подходам.
- Книги могут быть полезны в разнообразных вузовских курсах, которые включают в себя высоко-частотные асимптотические методы в теории дифракции.
- Термин –**Физическая Теория Дифракции** – уже давно используется как *ключевое слово (key words)* в классификации научных публикаций

Главные Итоги ФТД

- **Асимптотические оценки радиолокационных поперечников рассеяния для моделей баллистических ракет**
- **ФТД использована в дизайне стелс самолетов и кораблей**
- **Развита Теория Теневого Излучения, которая позволила**
 - **выяснить физическую природу дифракции Френеля**
 - **определить Дифракционный Предел уменьшения рассеянного поля с помощью поглощающих покрытий**
- **Развита теория Элементарных Краевых Волн (КВ), которая позволяет исследовать дифракцию на телах сложной формы**

Возможные Применения ФТД

- **конструирование микроволновых антенн**
- **распознавание объектов по их дифракционным характеристикам**
- **распространение радиоволн в городских условиях**
- **расчет отражателей с заданными характеристиками**
- **в комбинации с численными методами , ФТД может быть использована при разработке эффективных гибридных методик для решения сложных дифракционных задач**

The End, Thank you for attention!