

Спектрометры на реакторе ТИК. Концепция

Члены рабочей группы по нейтронной
спектроскопии:

П.А. Алексеев

С.Б. Вахрушев

А.С. Иванов

Е.С. Клементьев

И. Кулда

Е.В. Москвин

А.А. Подлесняк

Рабочее совещание по неупругому рассеянию на реакторе ПИК (Гатчина, июнь 2014)



О чем будет рассказано?

Нейтронная спектроскопия и ее роль в физике конденсированного состояния
закон (функция) нейтронного рассеяния
конкуренция НРН с прочими типами спектроскопии

Типы спектрометров

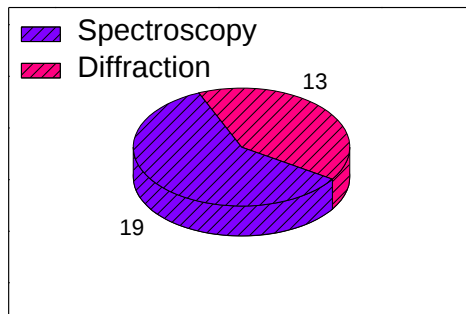
- времяпролетные спектрометры (TOF)
 прямая и обратная геометрии
- трехосные спектрометры (TAS)
 классические и с мультиплицированием
- гибридные спектрометры
- спектрометры обратного рассеяния
- спин-эхо спектрометры

Нейтронная спектроскопия на ПИКе

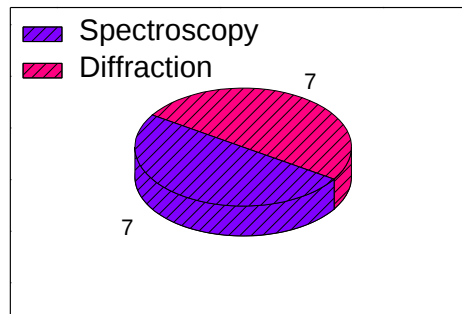
ПИК в конкурентной среде
"неупругие" приборы на реакторе ПИК (планы)

Нейтронные спектроскопия и дифракция, соотношение в мире

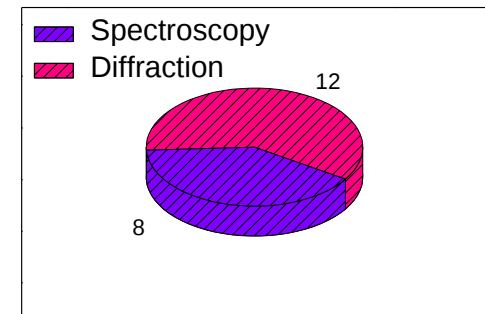
HFR, Institute Laue Langevin



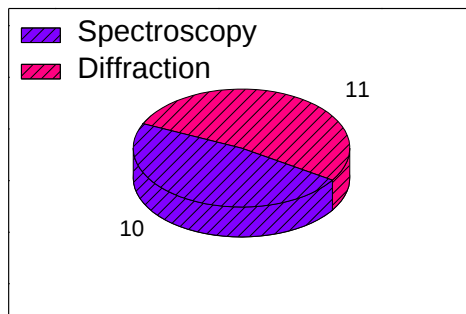
SNS, Oak Ridge



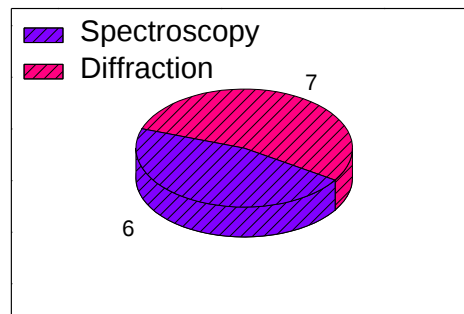
ISIS-1&2, RAL



FRM-II, MLZ

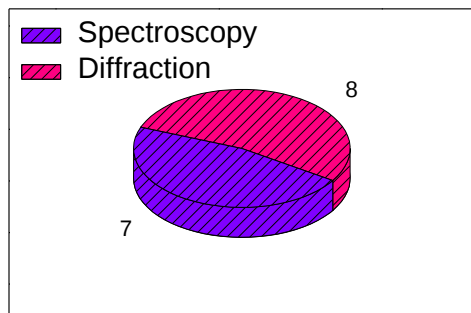


JSNS, J-PARC

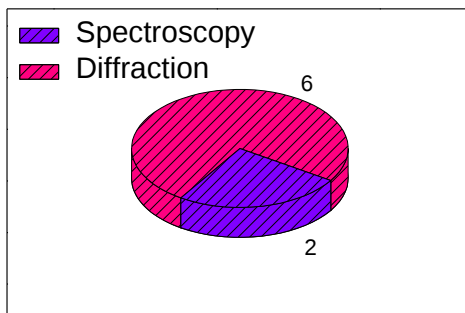


Нейтронные спектроскопия и дифракция, соотношение в мире и в РФ

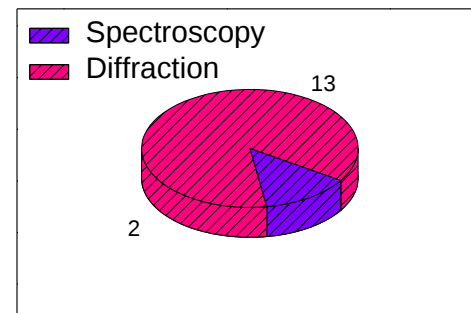
ESS, 1st stage



IBR-2, JINR

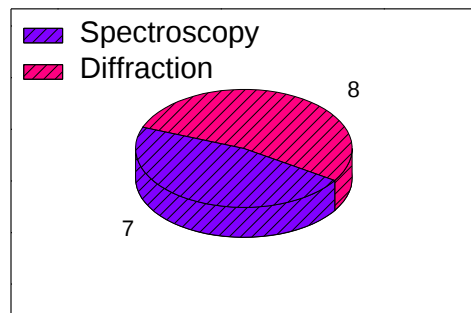


Russian Federation

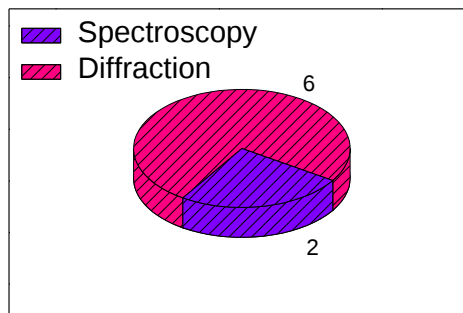


Нейтронные спектроскопия и дифракция, соотношение в мире и в РФ

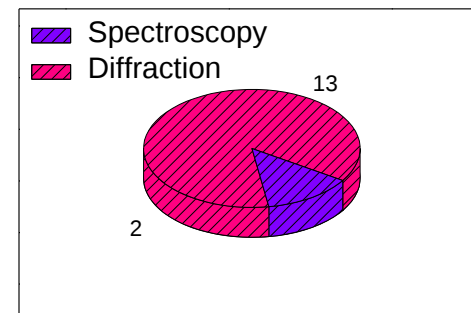
ESS, 1st stage



IBR-2, JINR



Russian Federation



Исторические вехи нейтронной спектроскопии

1932 - Открытие нейтрона, мизерные нейтронные потоки

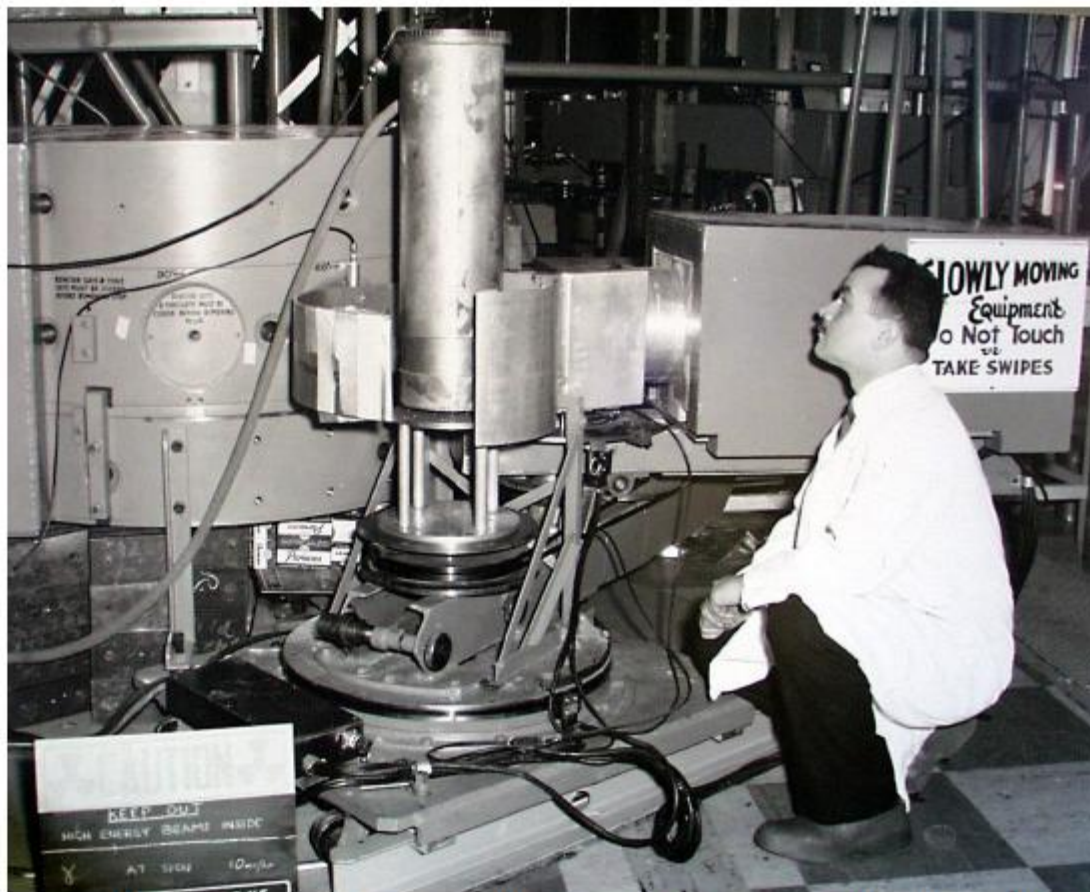
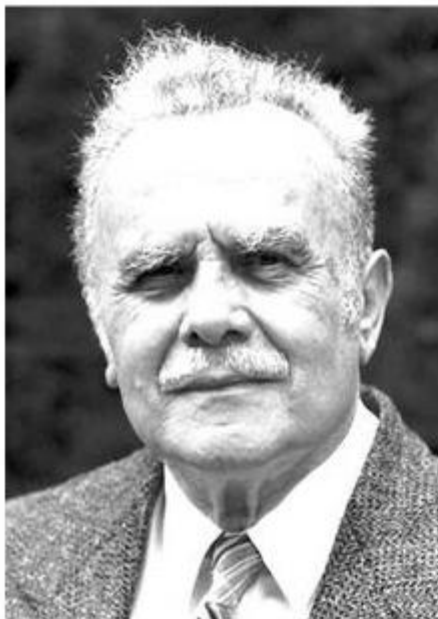
1952 - Рождение метода, появление интенсивных нейтронных пучков

1970 - Нейтронная спектроскопия становится продуктивным экспериментальным методом

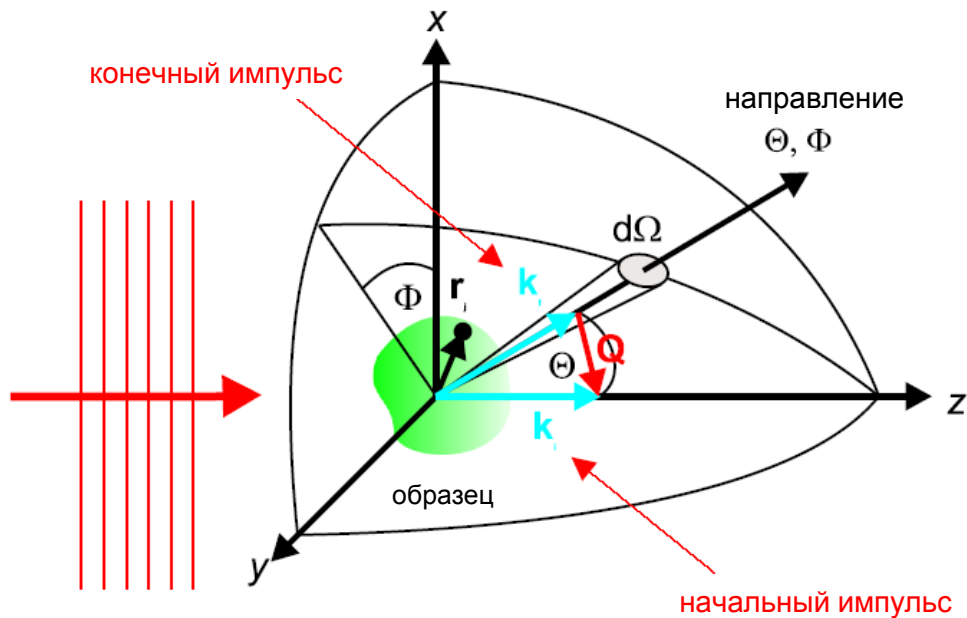
1994 - Нобелевская премия по физике присуждена за:
"for the development of neutron spectroscopy"

Основатель методики

Bertram N. Brockhouse



Дважды дифференциальное сечение рассеяния нейтронов



Законы сохранения

$$\vec{Q} = \vec{k}_i - \vec{k}_f$$

$$\hbar\omega = E_i - E_f$$

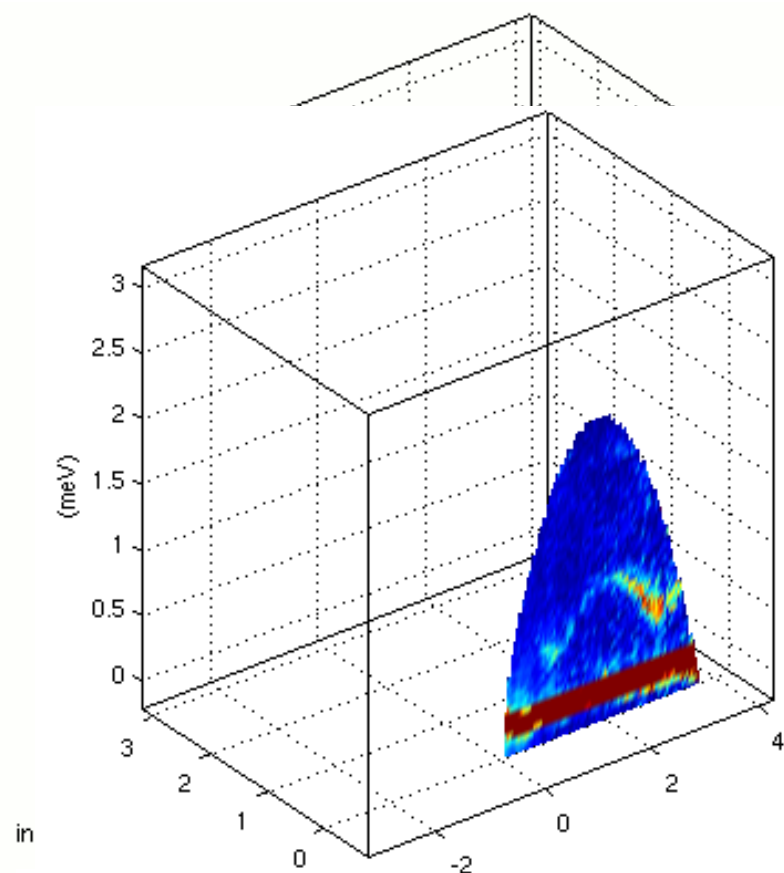
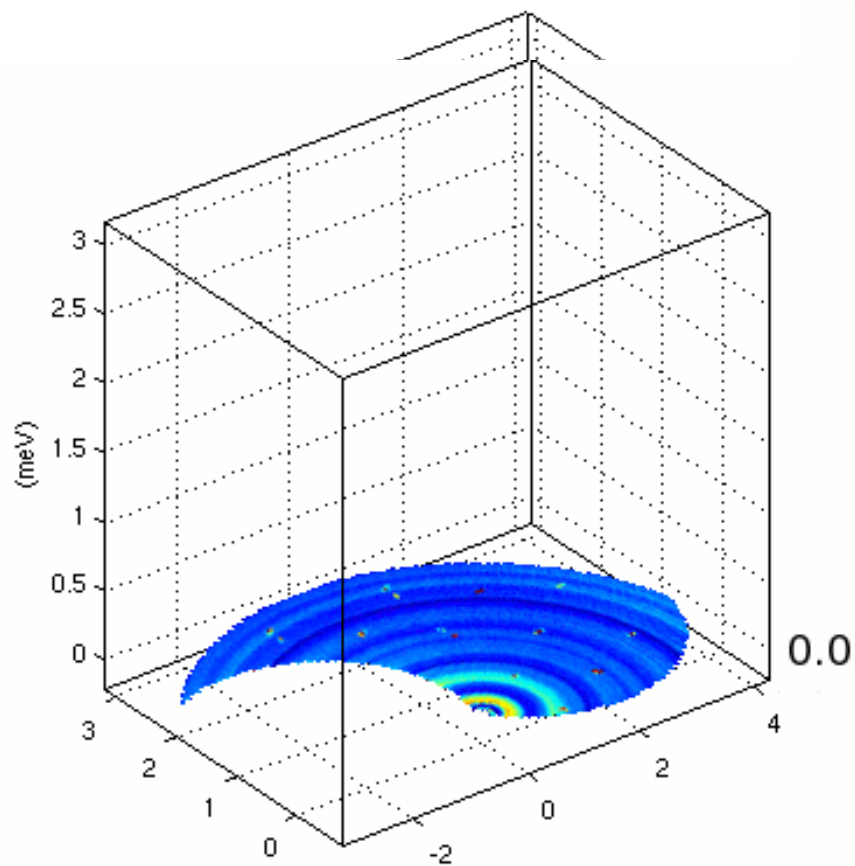
Полное сечение рассеяния

$$\sigma = \int d\Omega \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right) = \int d\Omega \int dE_f \left(\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE_f} \right)$$

дважды дифференциальное сечение рассеяния

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE_f} = \left(\frac{m}{2\pi\hbar^2} \right)^2 \frac{k_f}{k_i} \sum_{\lambda_i} p_{\lambda_i} \sum_{\lambda_f} |\langle \mathbf{k}_f, \lambda_f | \hat{U} | \mathbf{k}_i, \lambda_i \rangle|^2 \delta(E_{\lambda_i} - E_{\lambda_f} + \hbar\omega)$$

$\text{Ni}_3\text{V}_2\text{O}_8$ $E_i=3.07$ meV; $T=1.4\text{K}$, $(0kl)$ scattering plane



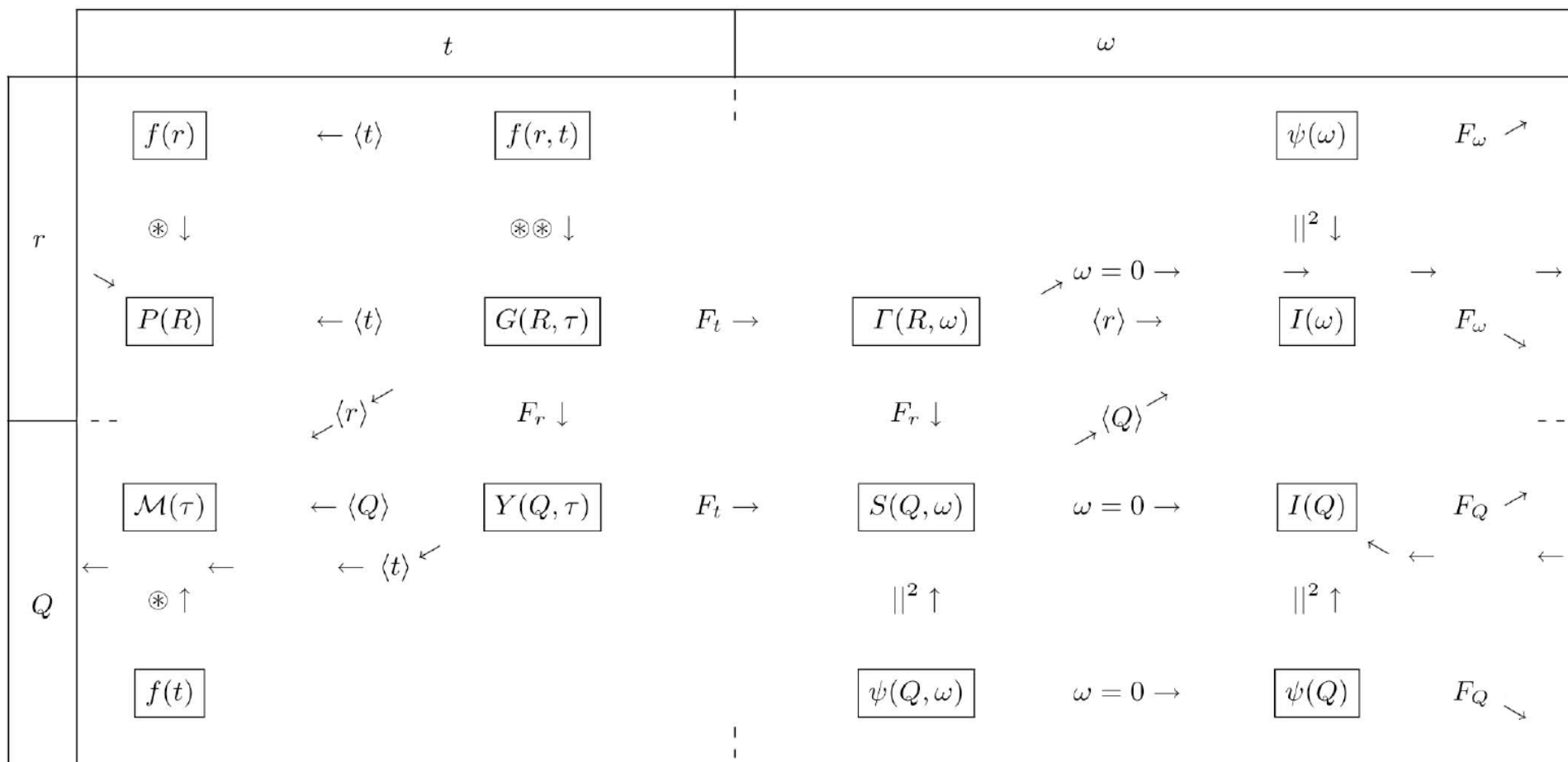
эксперимент проведен на спектрометре CNCS (SNS) "time-event" методом
данные предоставлены А. Подлесняком (ORNL)

Все небесмысленные функции для рассеяния

- $S(Q, \omega)$ is the “scattering law.”
- $Y(Q, \tau)$ is the (unnamed) momentum-time correlation function.
- $\Gamma(R, \omega)$ is the (unnamed) space-energy correlation function.
- $G(R, \tau)$ is the Van Hove space-time correlation function.
- $P(R)$ is the Patterson function.
- $\mathcal{M}(\tau)$ is the “memory function,” a time correlation function for dynamics at a site (sometimes called $G_s(\tau)$, a self-correlation function).
- $I(Q)$ is a diffraction pattern.
- $I(\omega)$ is an inelastic spectrum.
- $f(r, t)$ is a scattering length density.
- $\psi(Q, \omega)$ is a neutron wavefunction.

http://neutrons.ornl.gov/media/pubs/pdf/inelastic_book.pdf

Взаимосвязь основных функций для рассеяния



http://neutrons.ornl.gov/media/pubs/pdf/inelastic_book.pdf

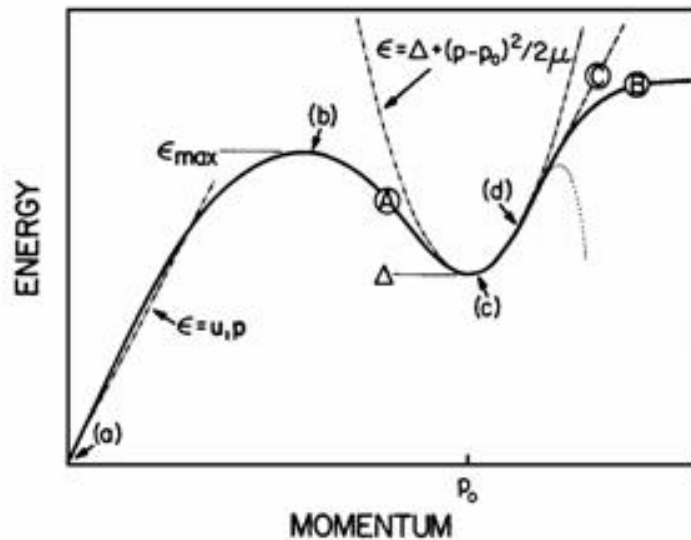
Пример квазичастиц – возбуждения в гелии

Физика продвинулась в понимании сверхтекучести гелия и его макроскопических свойств только после выяснения особенностей спектров его возбуждений:

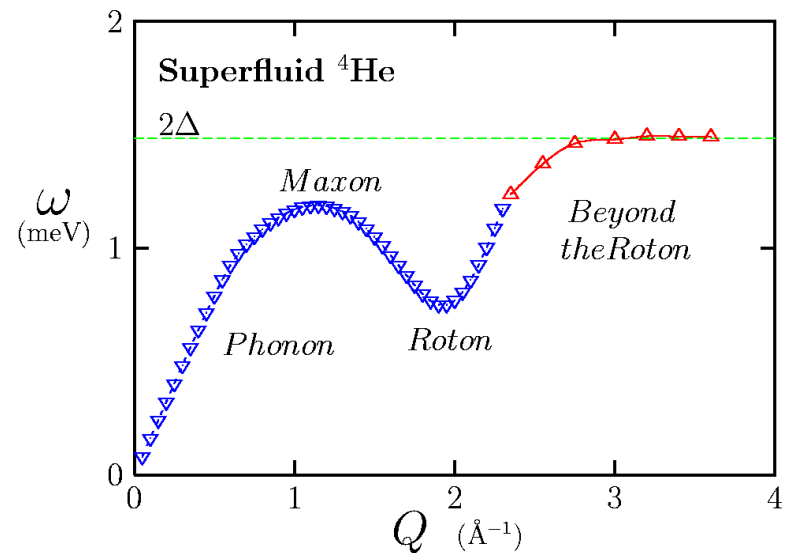
1. участка с линейной дисперсией (в обычных жидкостях такого не бывает)
2. ротонного минимума

Эти особенности были постулированы Ландау в "донецкую" эпоху а затем блестяще подтверждены нейтронной спектроскопией

Дисперсия квазичастиц в жидком гелии-II,
Гипотеза Л.Д. Ландау, 1941

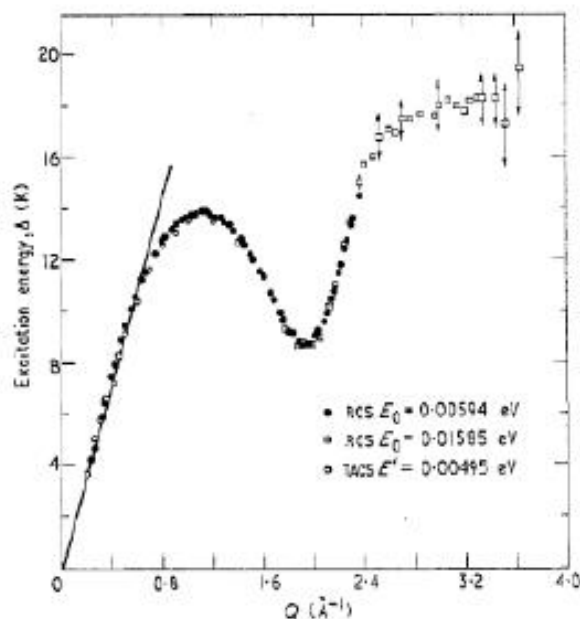


Нейтронный эксперимент (1971)



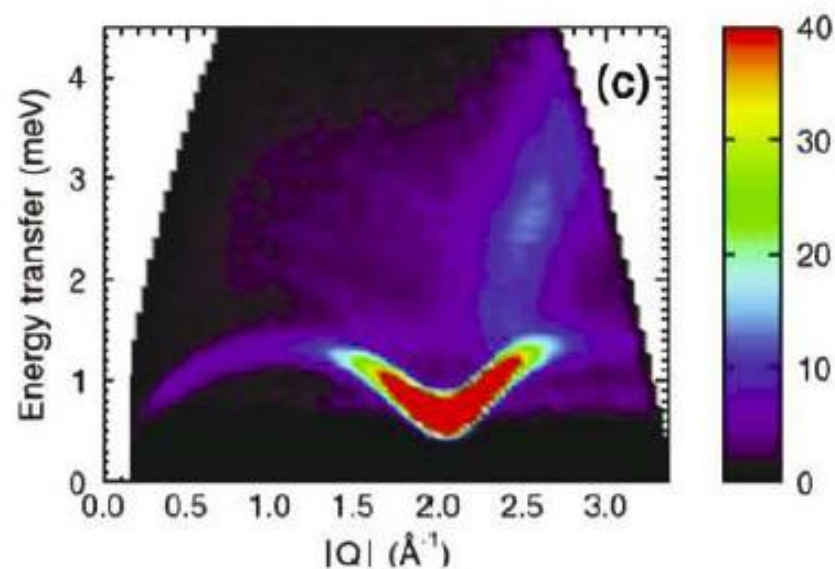
Квазичастицы в жидком гелии - 2008 vs 1971

TAS



Cowley and Woods., Can. J. Phys. 49, 177 (1971)

TOF

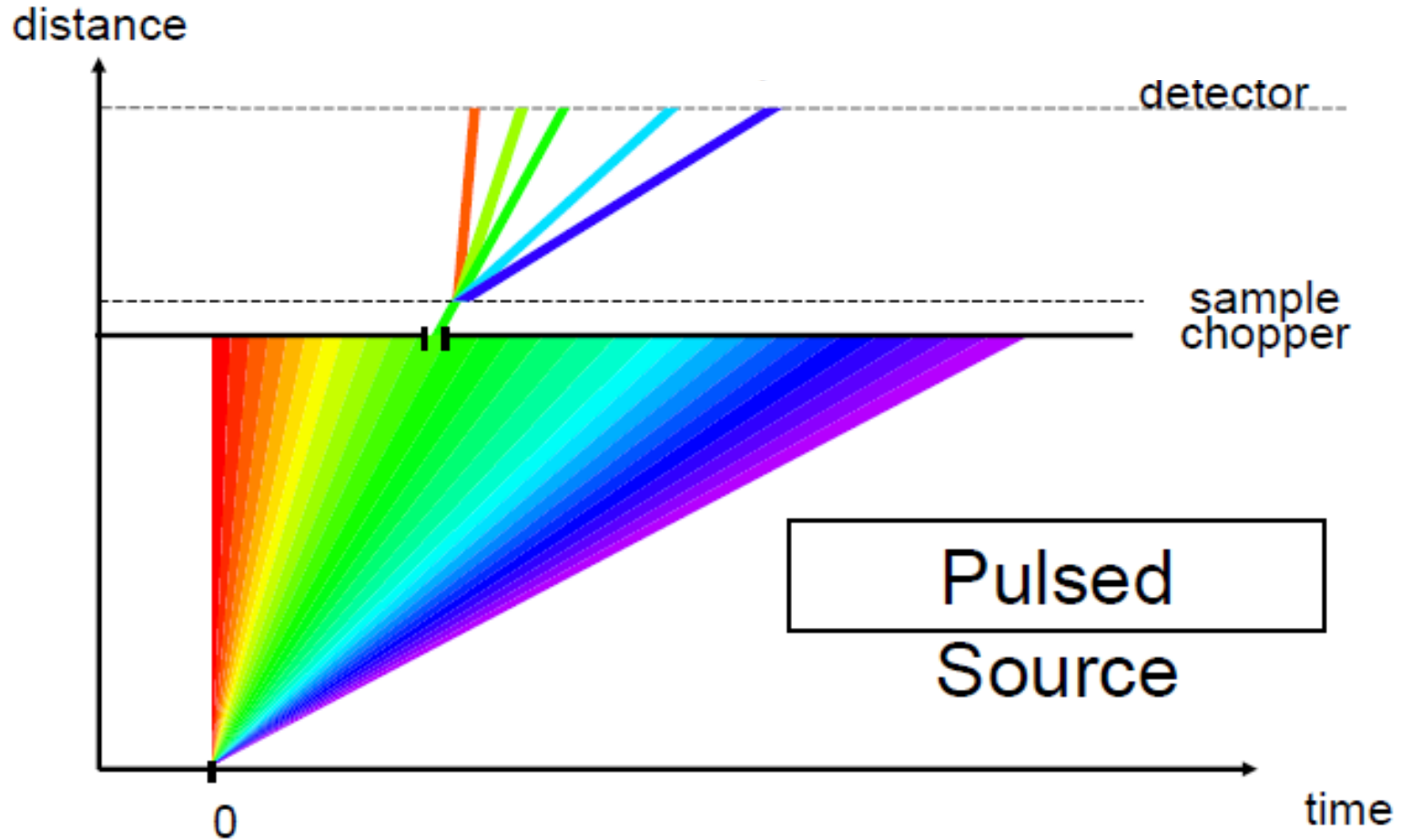


Blackburn *et al.*, Pramana 71, 673 (2008)

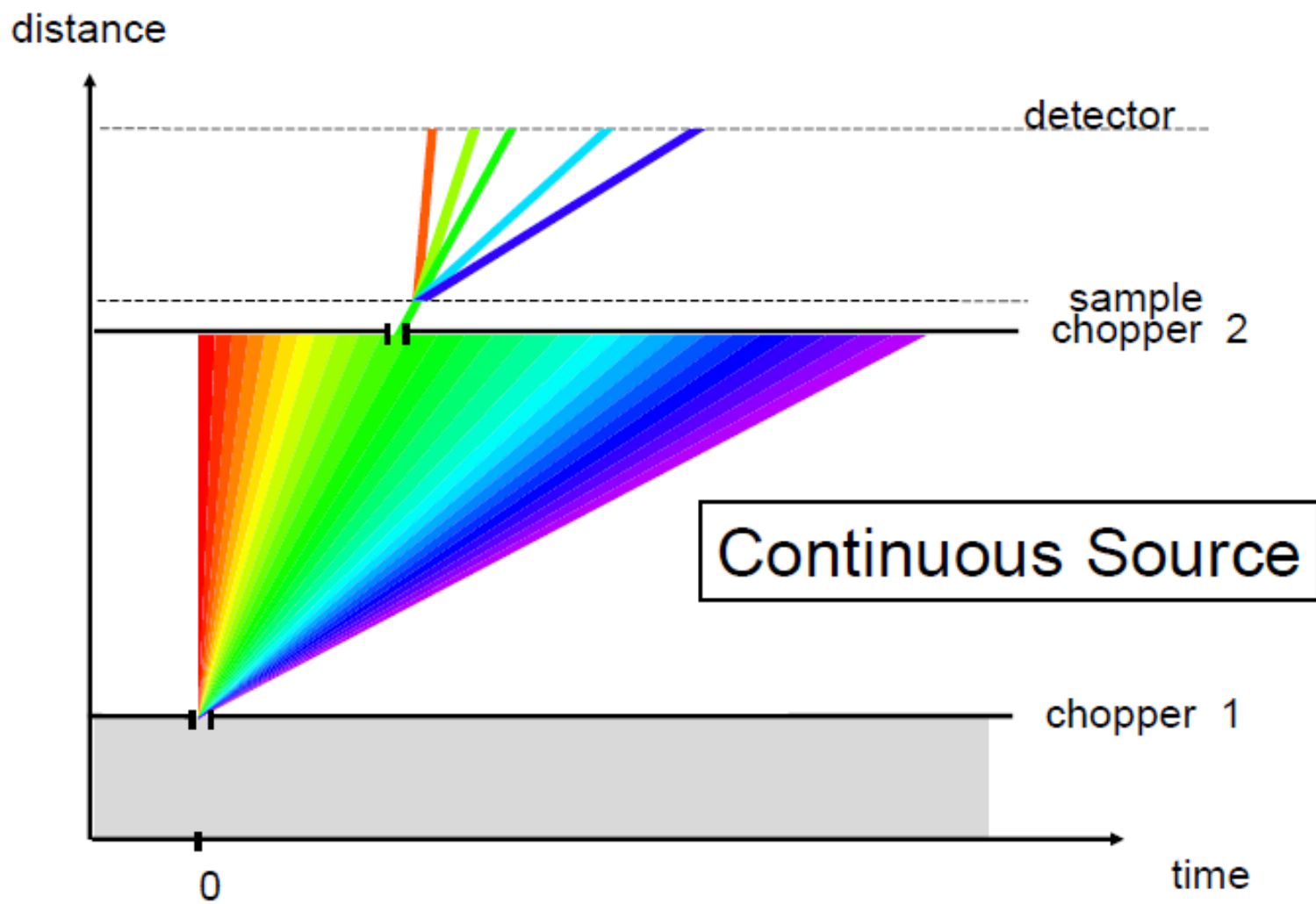
Промежуточные выводы

- нейтронная спектроскопия очень востребована в мире и не испытывает столь же сильное давление со стороны прочих методик, как нейтронная дифракция
- в ведущих мировых нейтронных центрах (действующих и проектируемых) наблюдается паритет по числу установок для спектроскопии и дифракции

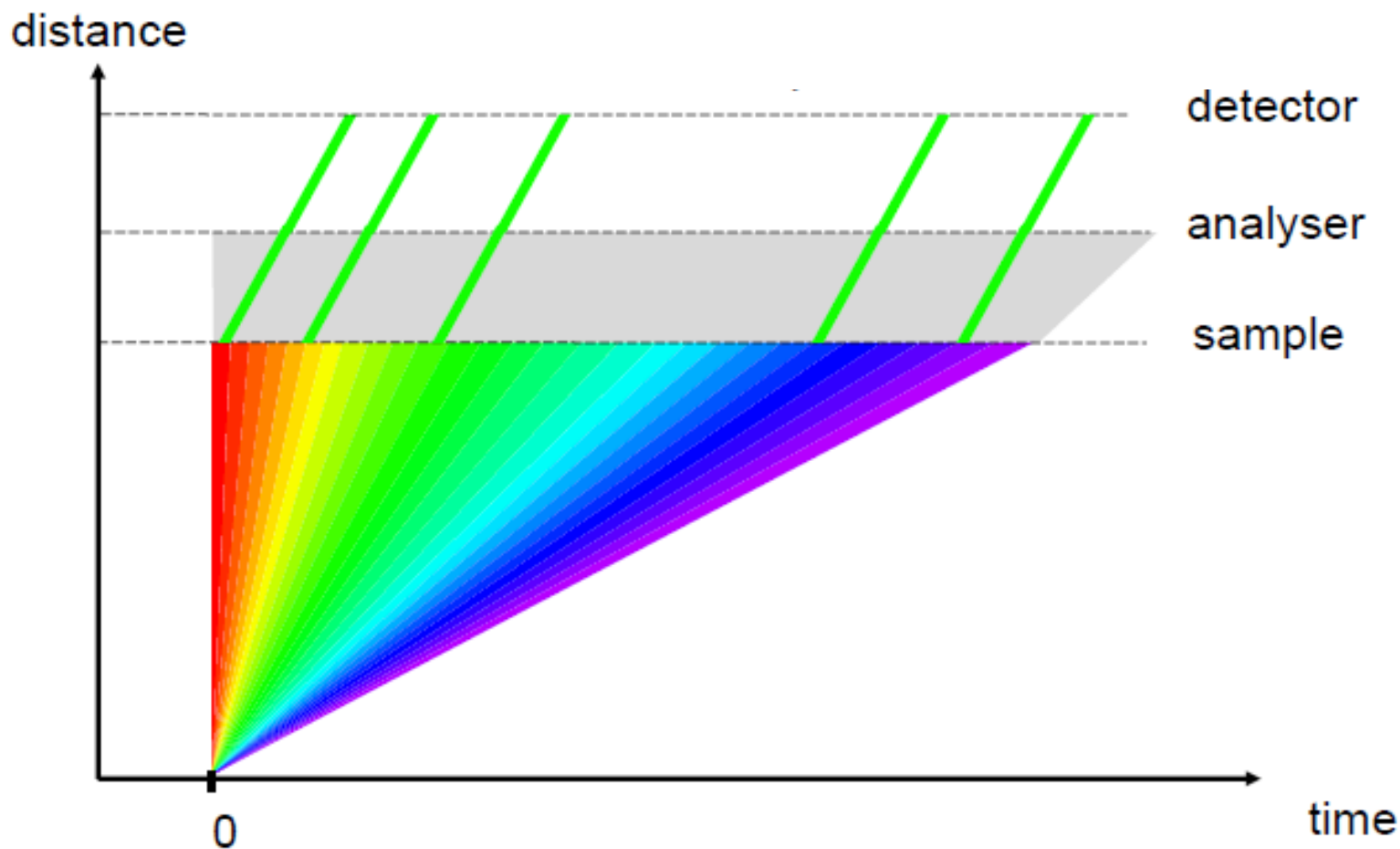
TOF прямой геометрии для импульсного источника



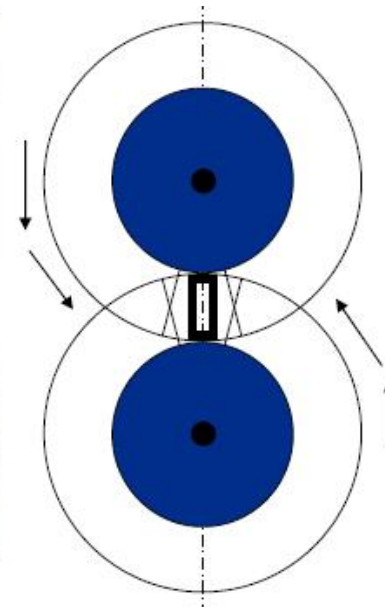
TOF прямой геометрии для стационарного источника



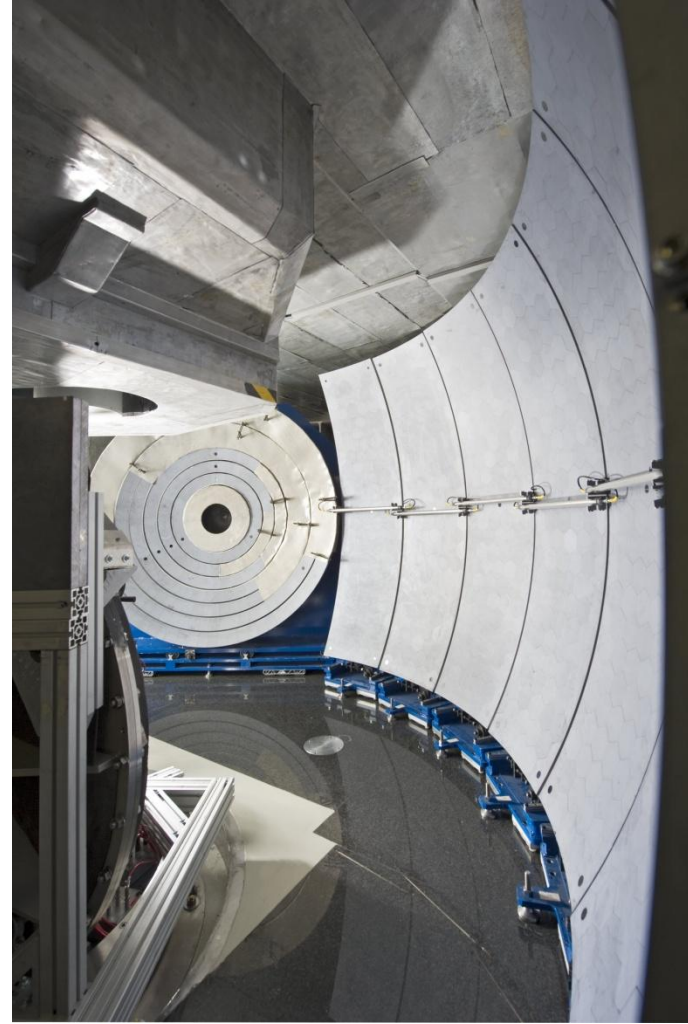
TOF обратной геометрии для импульсного источника



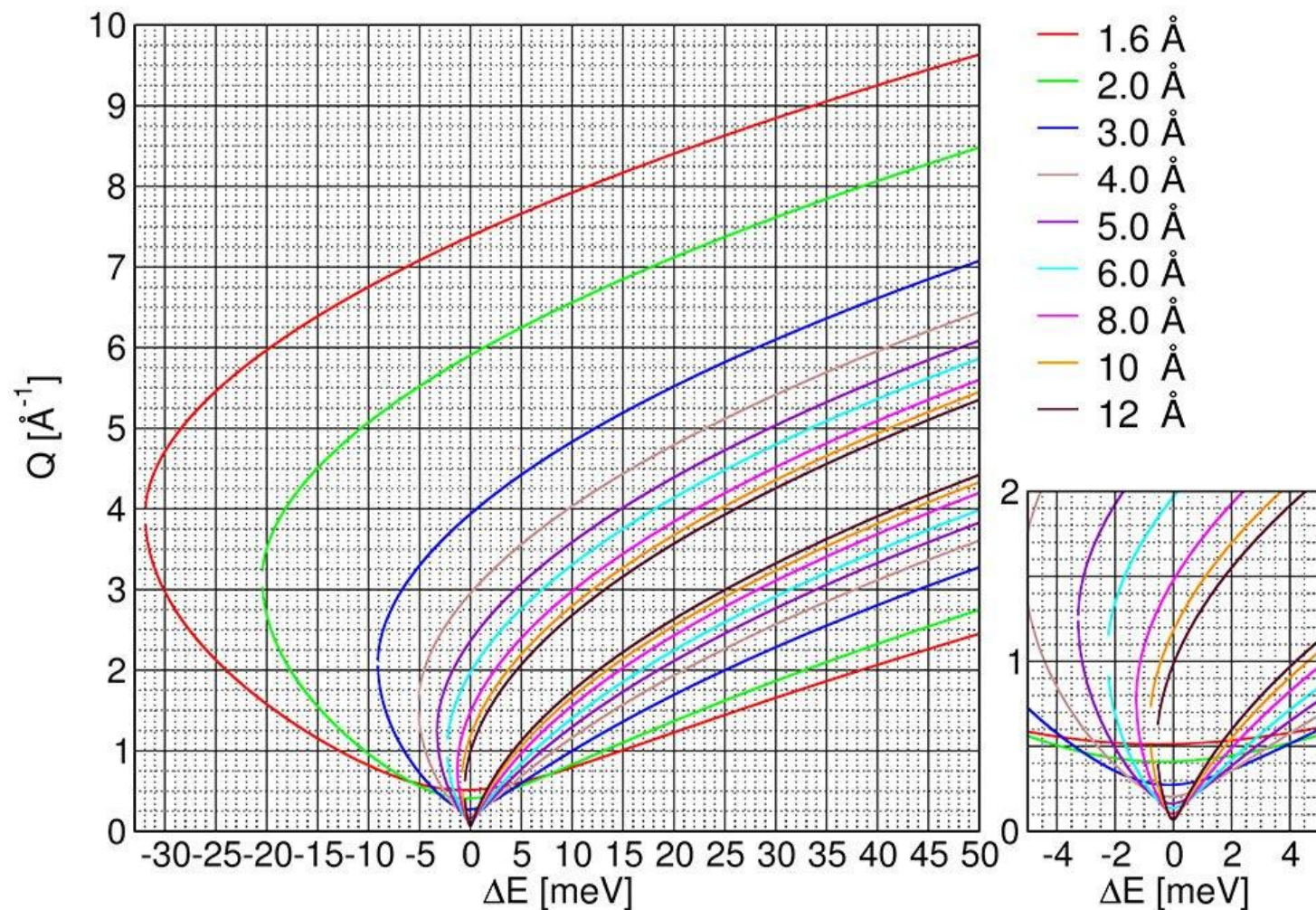
Основа TOF технологий HRH - детекторы и прерыватели



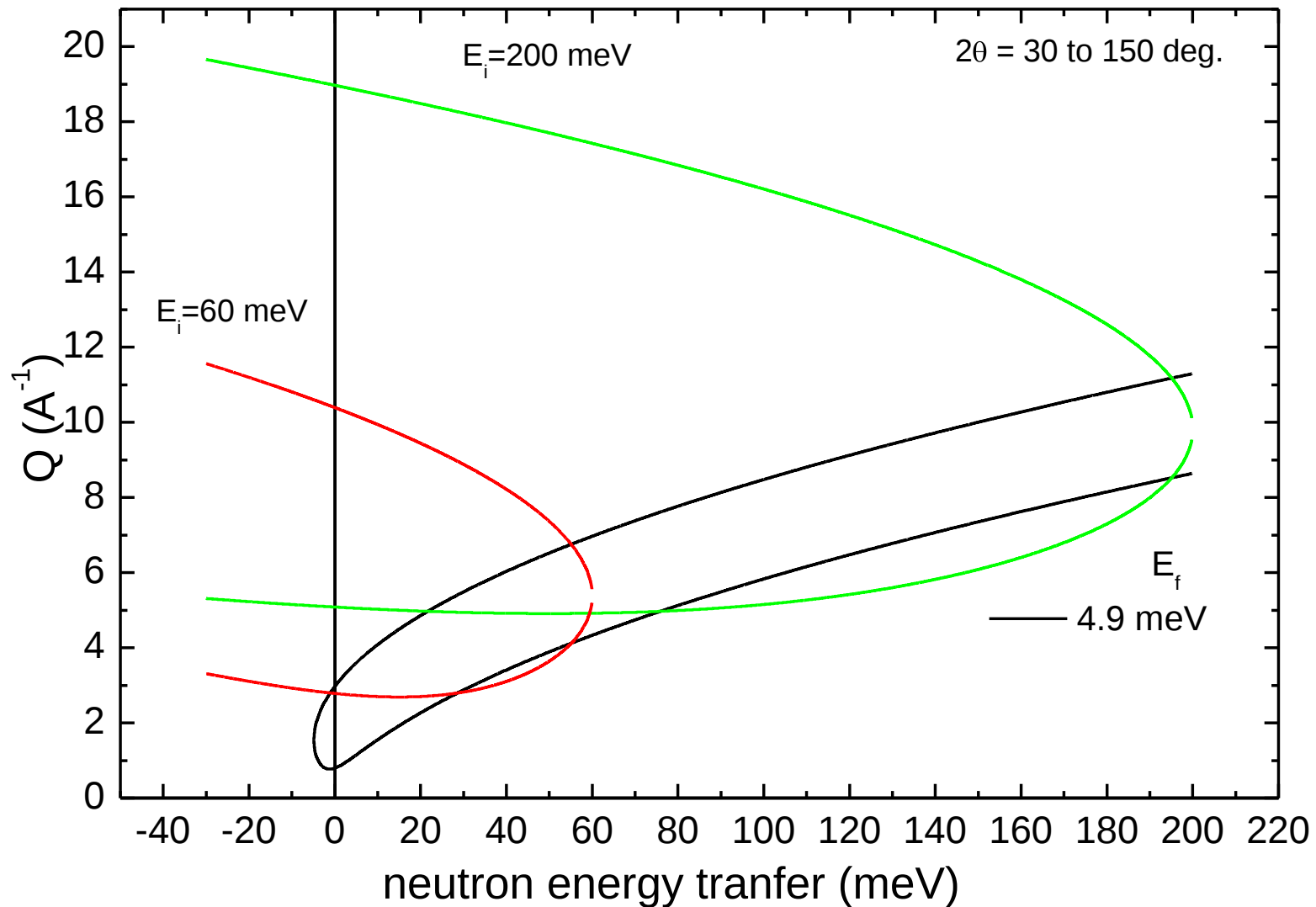
Детекторы TOF спектрометров – похоже на физику высоких энергий?



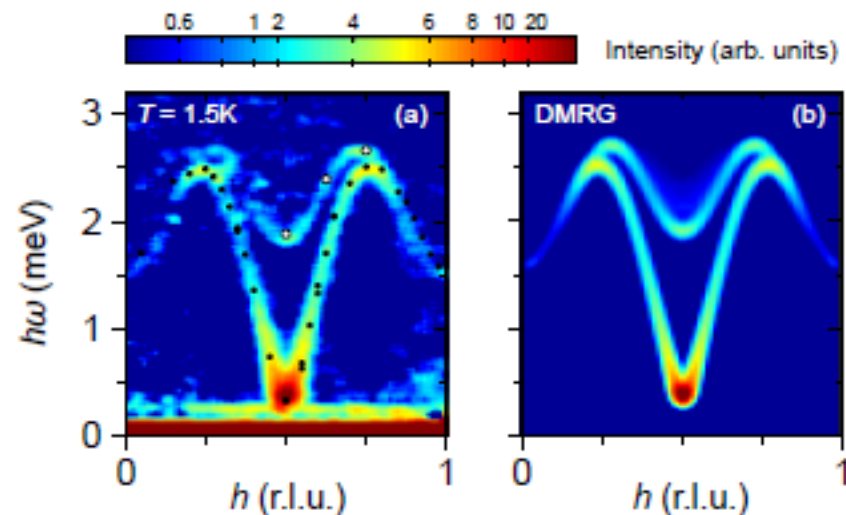
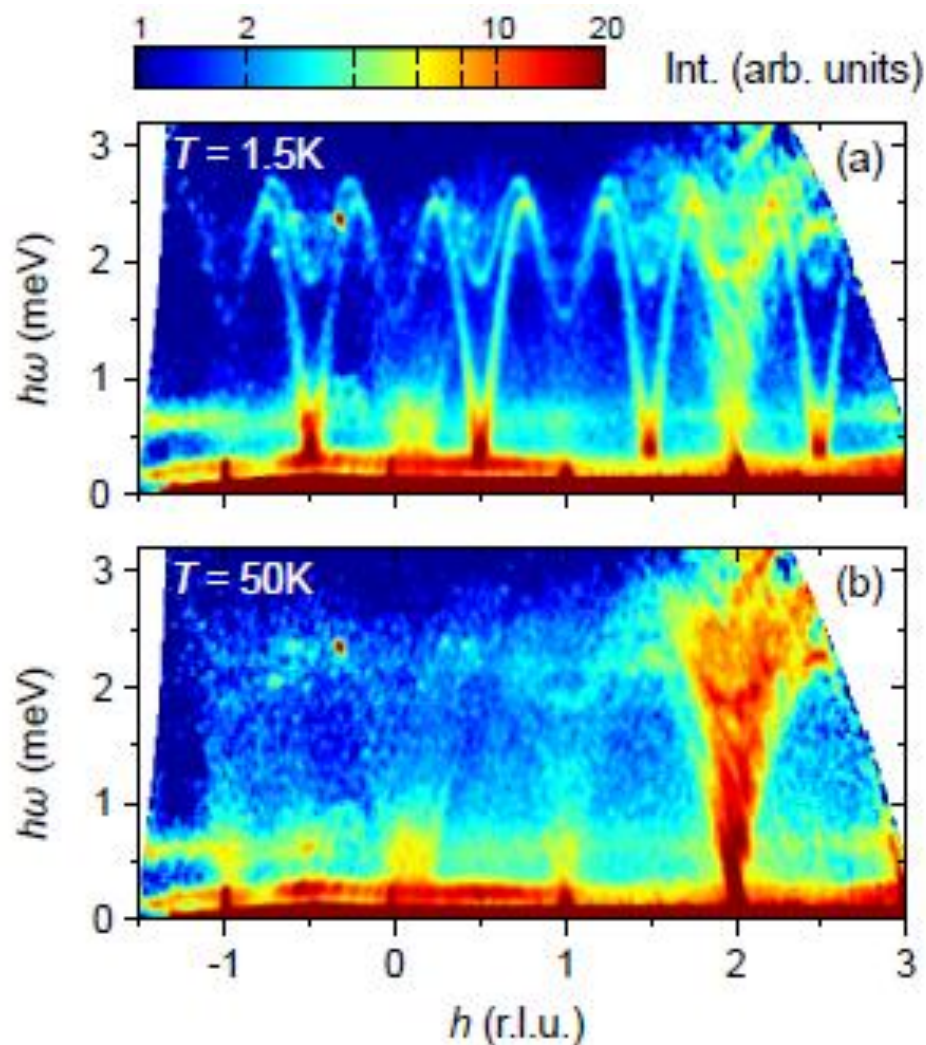
Доступный диапазон в Q-E пространстве



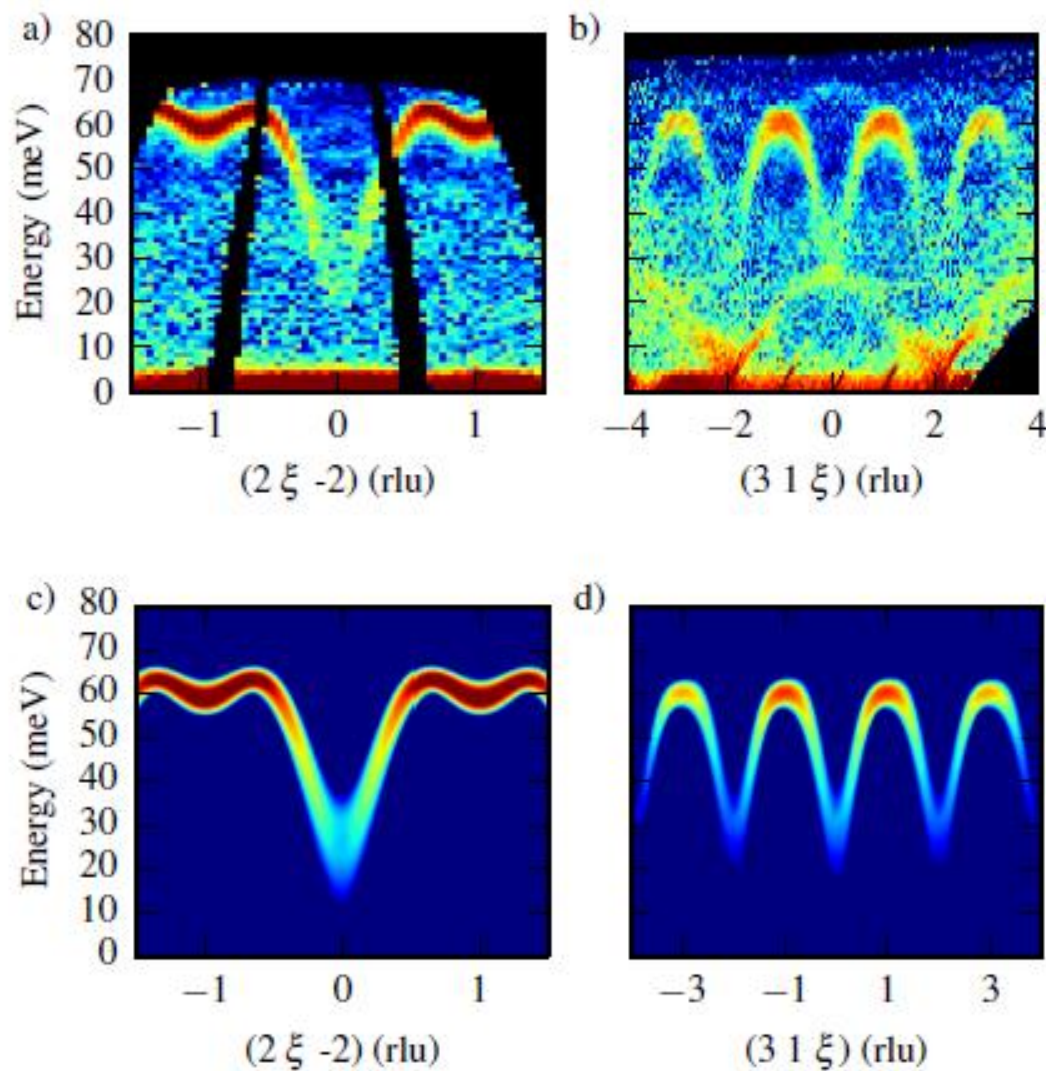
Прямая геометрия против обратной для TOF спектроскопии



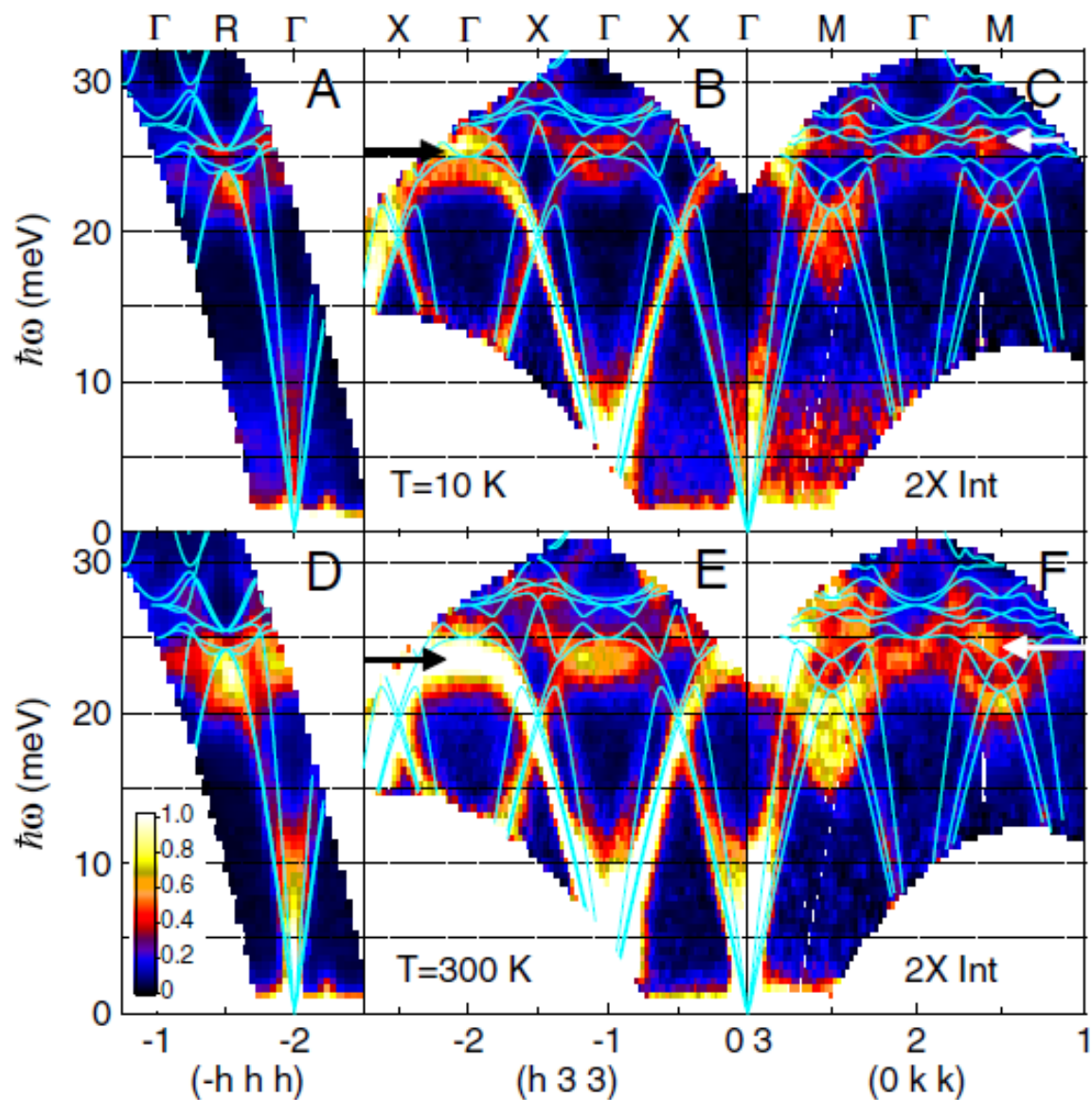
Сканеры возбуждений. Примеры результатов измерений.



Сканеры возбуждений. Примеры результатов измерений.



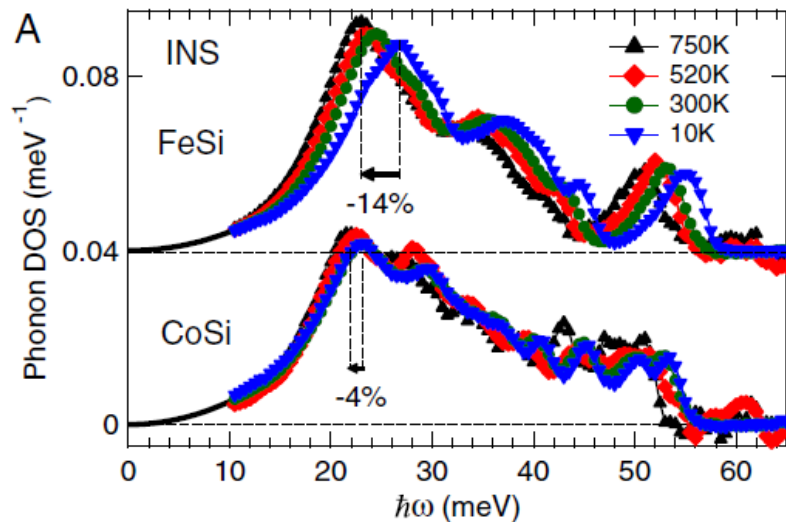
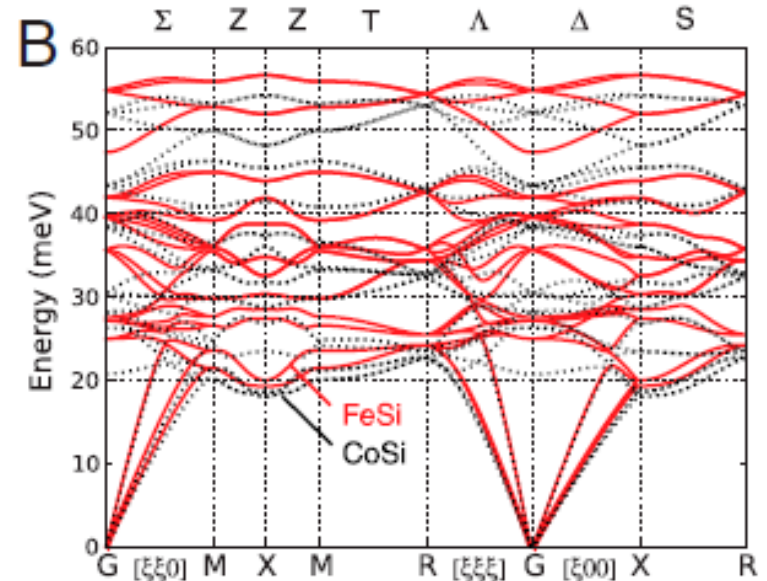
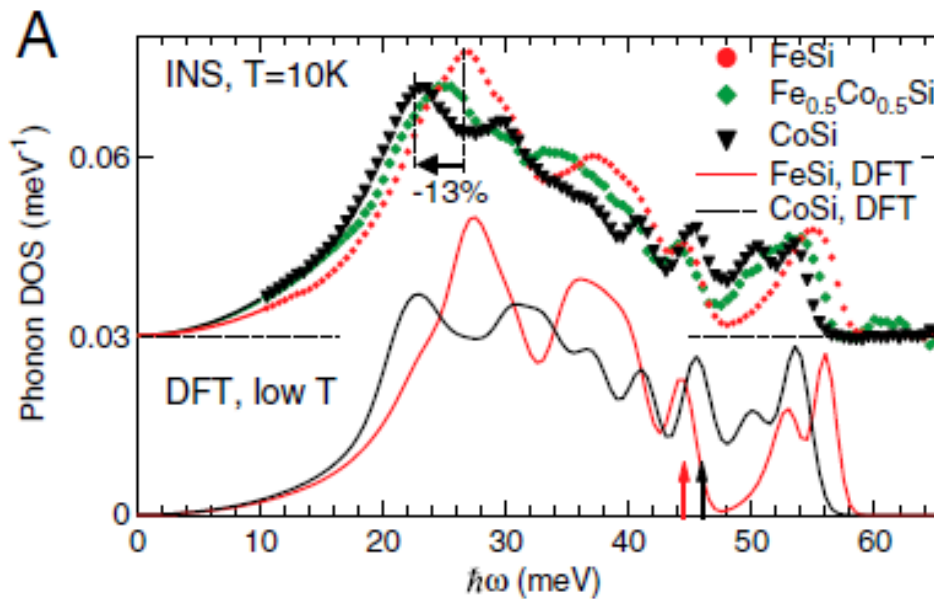
Динамика решетки FeSi и CoSi



O. Delaire et al.,
PNAS **108** 4725 (2011)

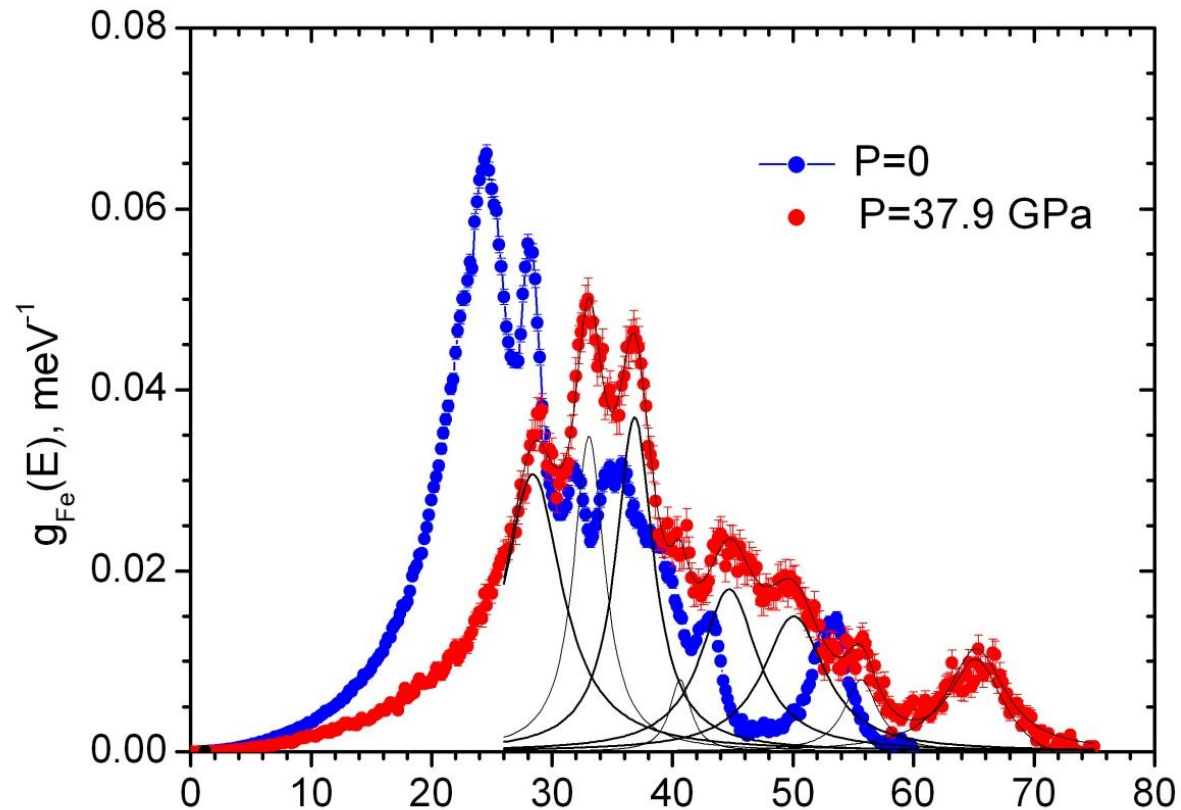
измерения проведены на
TOF спектрометре
ARCS (SNS, ORNL)

Динамика решетки FeSi и CoSi



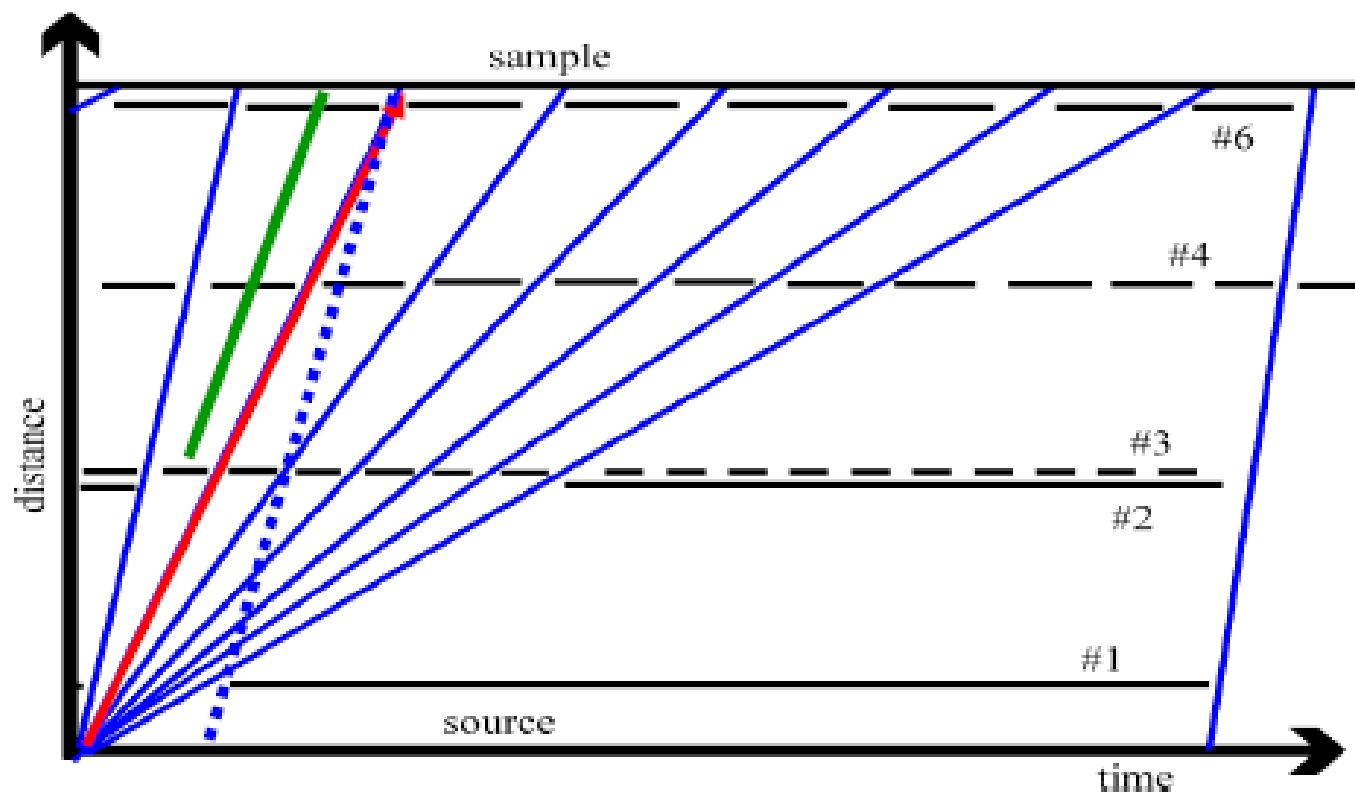
O. Delaire et al.,
PNAS 108 4725 (2011)

FeSi. Синхротронные измерения 2013 г.



Эксперимент проведен методом ядерного неупругого рассеяния на линии ID28 ESRF

Перспективное направление – TOF мультиплицирование



Возможный выигрыш для TOF спектрометров

K. Lieutenant et al., ICANS XX poster

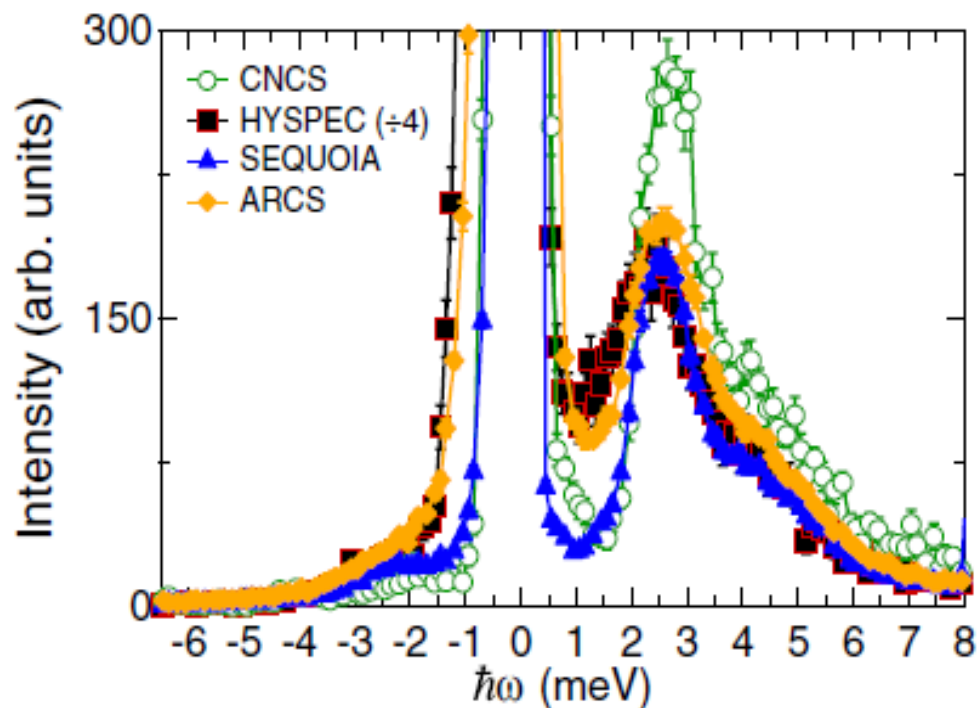
2.86 ms @ 14 Hz	Diffraction	SANS	Spectroscopy (direct)	Spectroscopy (indirect)	Hybrid
Length, m			140 ^{cold} ; 300 ^{therm}	220-300	150
Resolution $\delta\lambda/\lambda$, %			2 – 5	1 - 3	0.1 – 10
Pulse shaping			No ^{cold} / Yes ^{therm}	Yes(high res) / No(low res)	Yes
Wavelength band, Å			2, 0.9	1.3 – 0.9	1.9
Multiplication			RRM	No	RRM
Gain			$\leq 25^{\text{cold}}$, $\leq 12^{\text{therm}}$	$\leq 25^{\text{cold}}$, $\leq 13^{\text{therm}}$	5-10, 1-3, 12-25

Сравнение TOF спектрометров

A comparison of four direct geometry time-of-flight spectrometers at the Spallation Neutron Source

M. B. Stone, J. L. Niedziela, D. L. Abernathy, L. DeBeer-Schmitt, G. Ehlers, O. Garlea, G. E. Granroth, M. Graves-Brook, A. I. Kolesnikov, A. Podlesnyak, and B. Winn

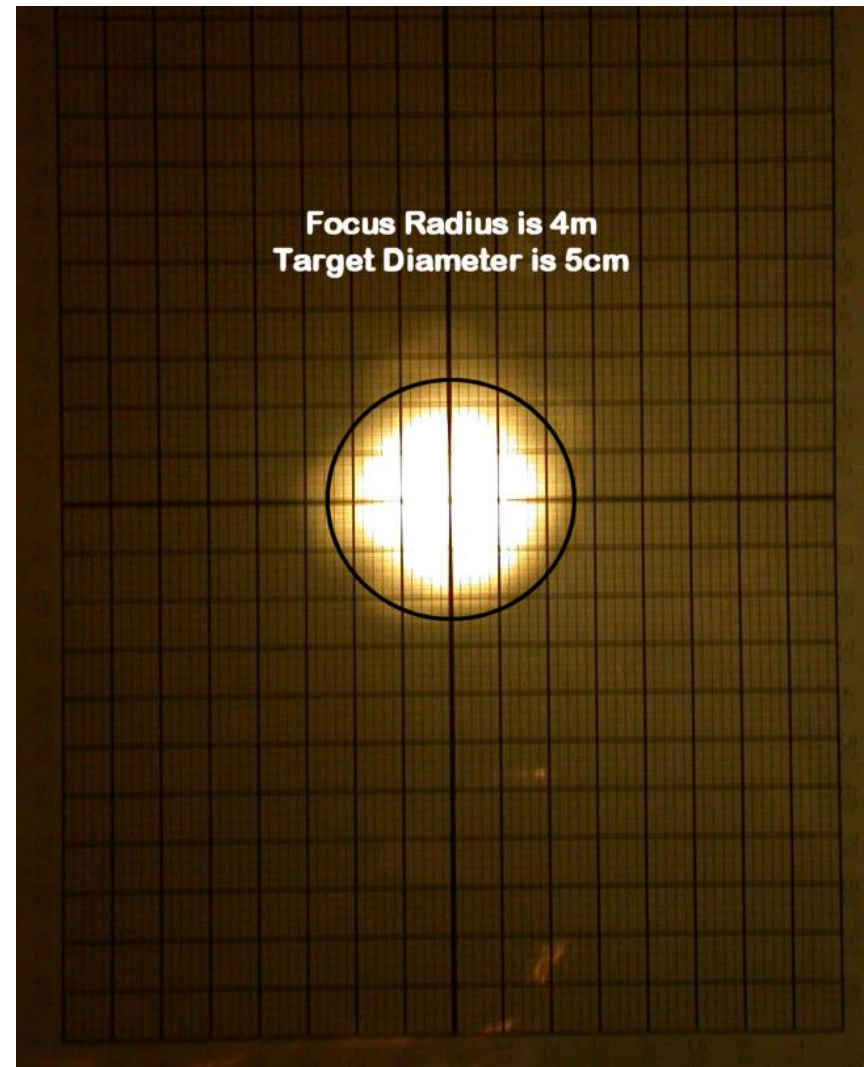
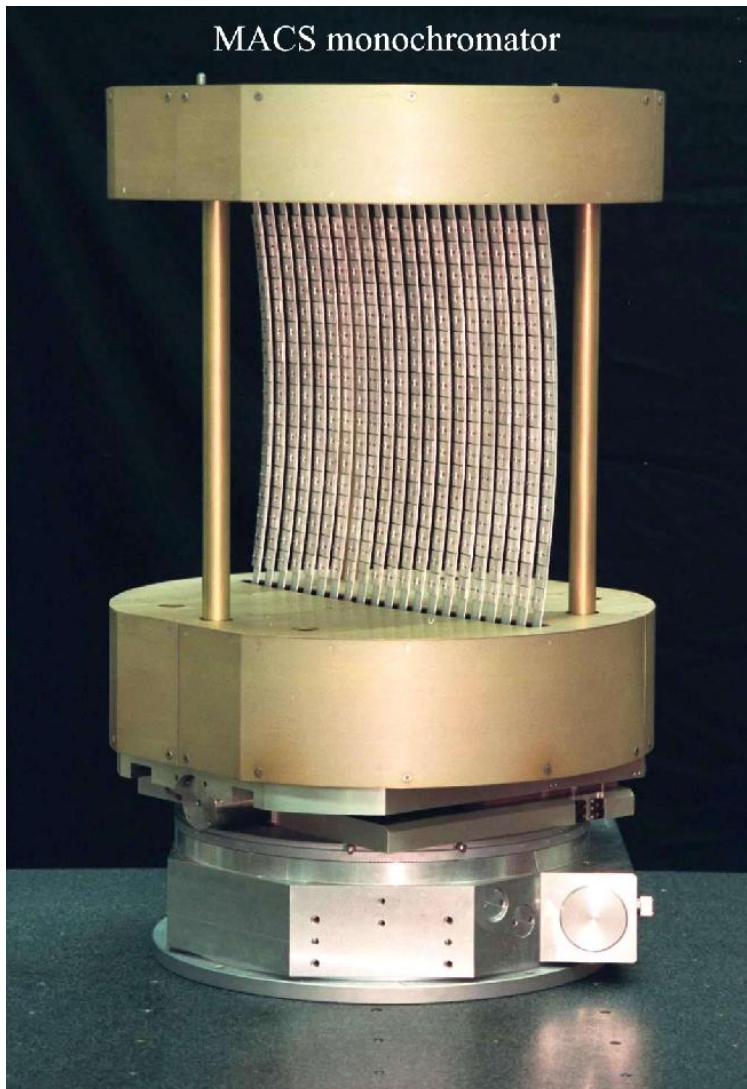
Review of Scientific Instruments **85**, 045113 (2014)



Промежуточные выводы

- современные нейтронные TOF спекрометры — прекрасные сканеры возбуждений (при этом они весьма дороги)
- TOF приборы - естественный выбор для импульсных источников нейтронов, но и на стационарных источниках они имеют свои плюсы
- возможен многократный выигрыш по производительности при реализации новых принципов на мощных источниках нейтронов с длинным импульсом (от 7 до 25 раз)

Альтернативный подход – использование кристаллов для монохроматизации и анализа по энергии

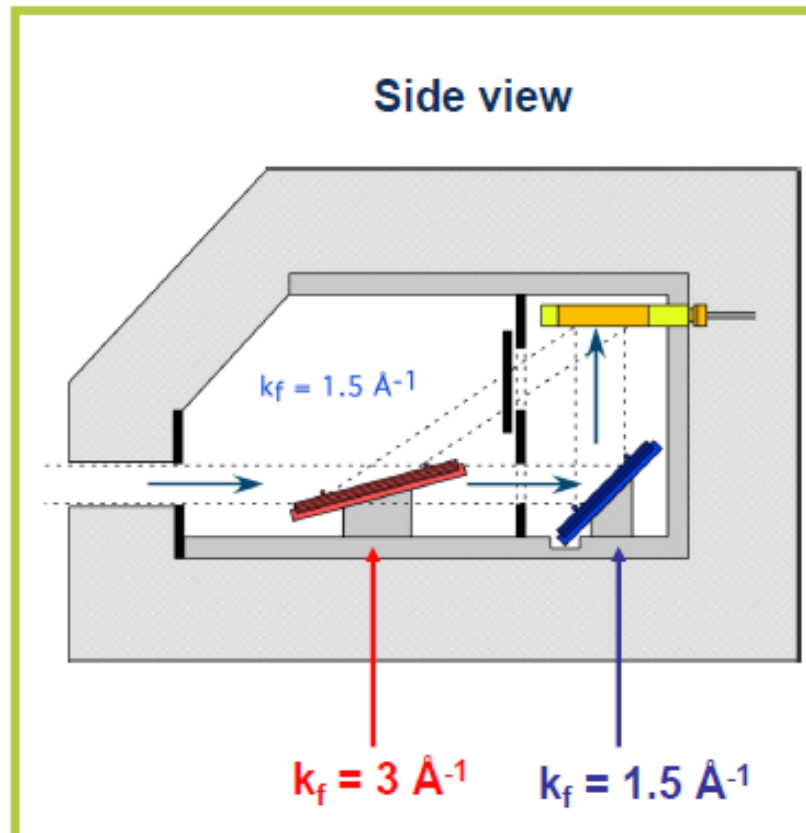
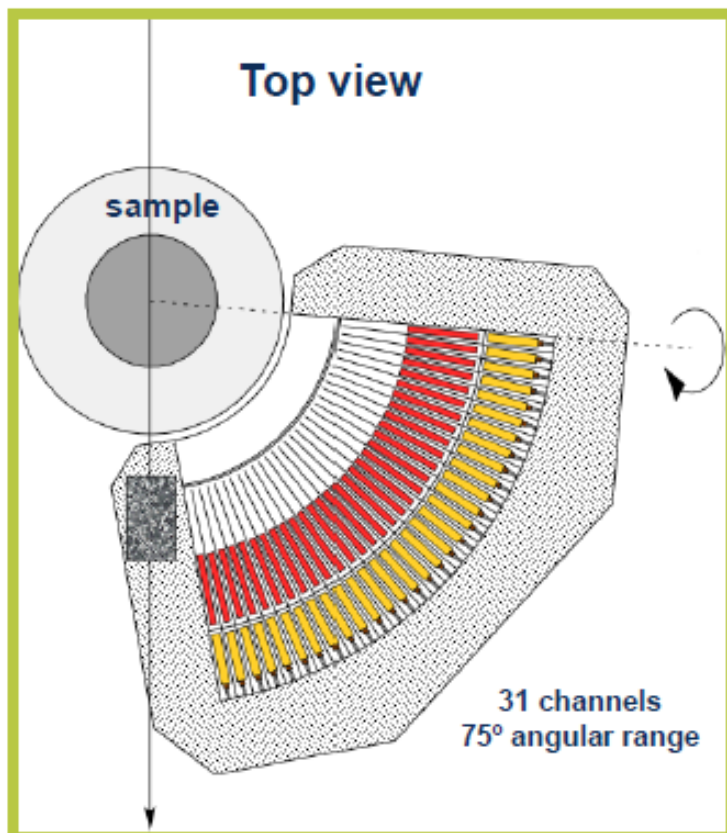


Классический TAS

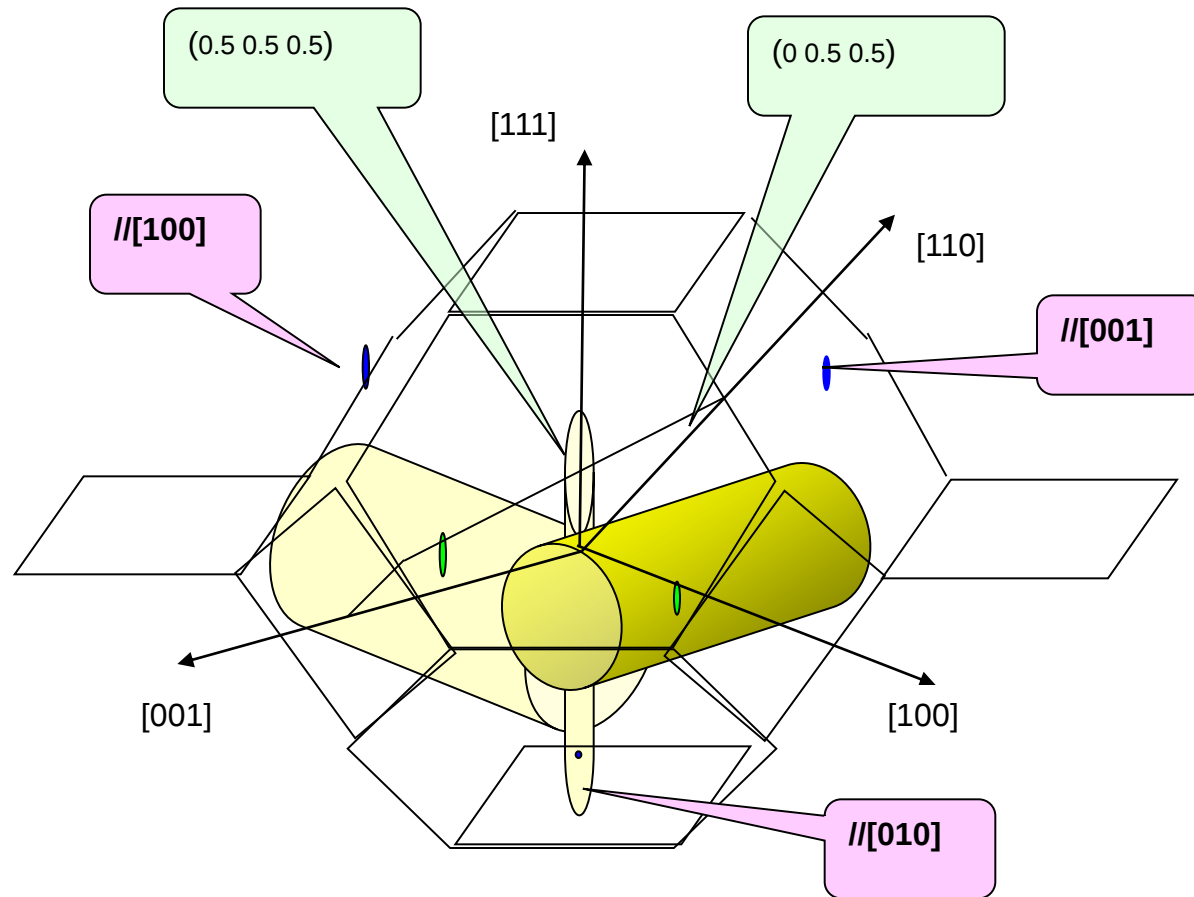


Мультиплицирование трехосных спектрометров

IN20 flat-cone multi-analyser



Измерения на ТАС – профессионал выбирает перспективные области в обратном пространстве

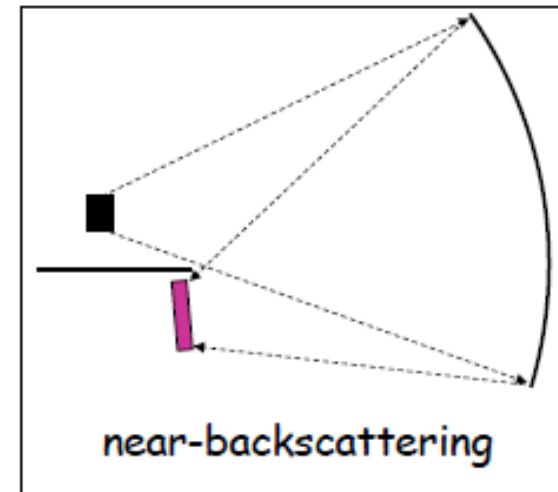
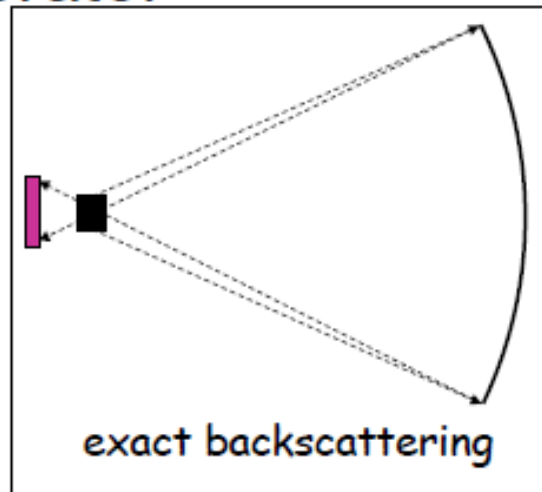
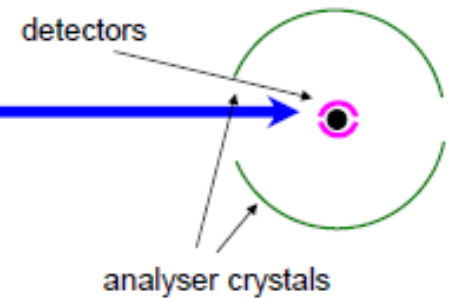


Промежуточные выводы

- современный TAS = трехосный спектрометр — прекрасный инструмент в руках профессионалов
- TAS отлично подходит именно для стационарных источников нейтронов

Приборы обратного рассеяния (Backscattering)

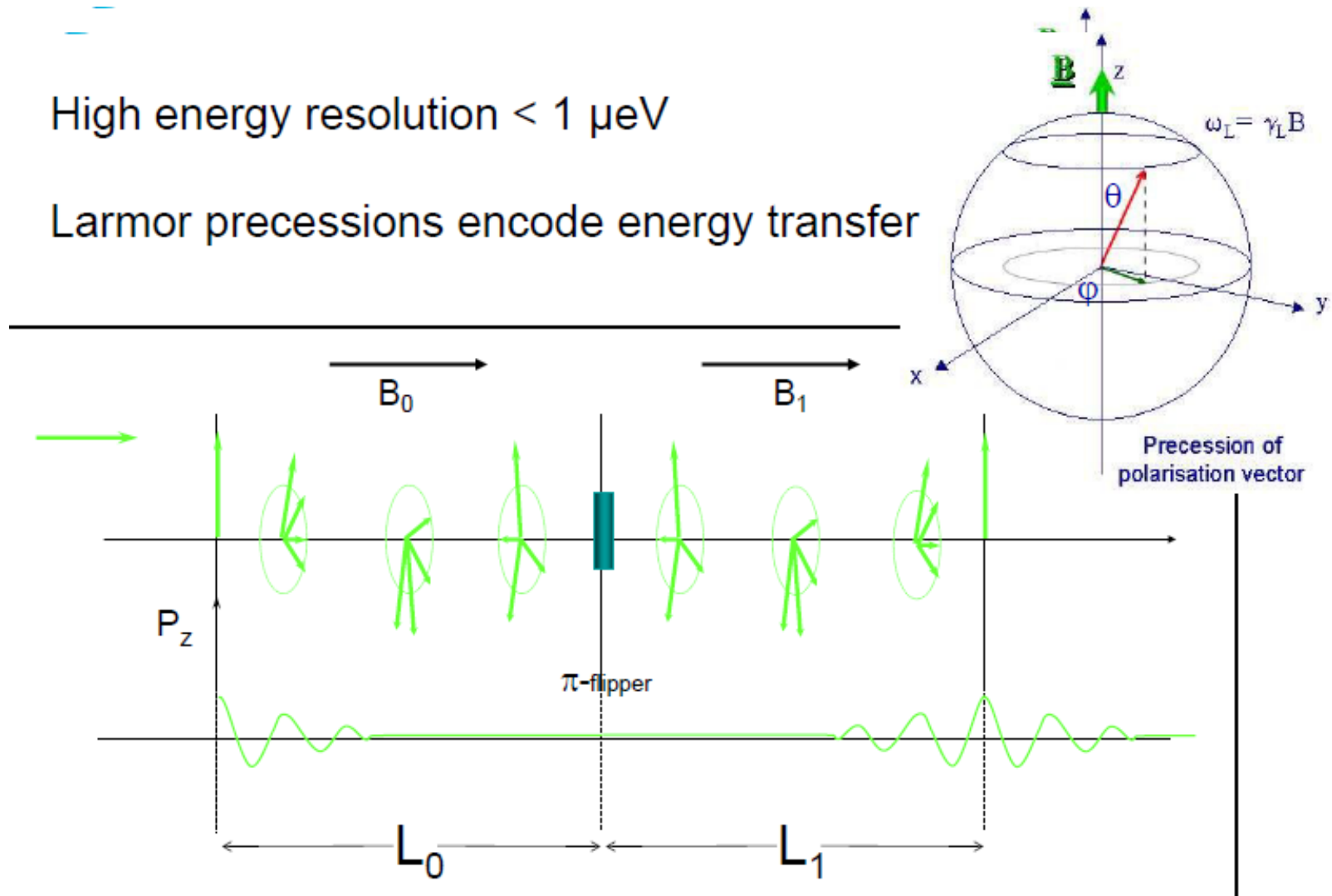
High k_i resolution:
long instrument on sharp
moderator



Спин-эхо приборы (SE)

High energy resolution $< 1 \mu\text{eV}$

Larmor precessions encode energy transfer



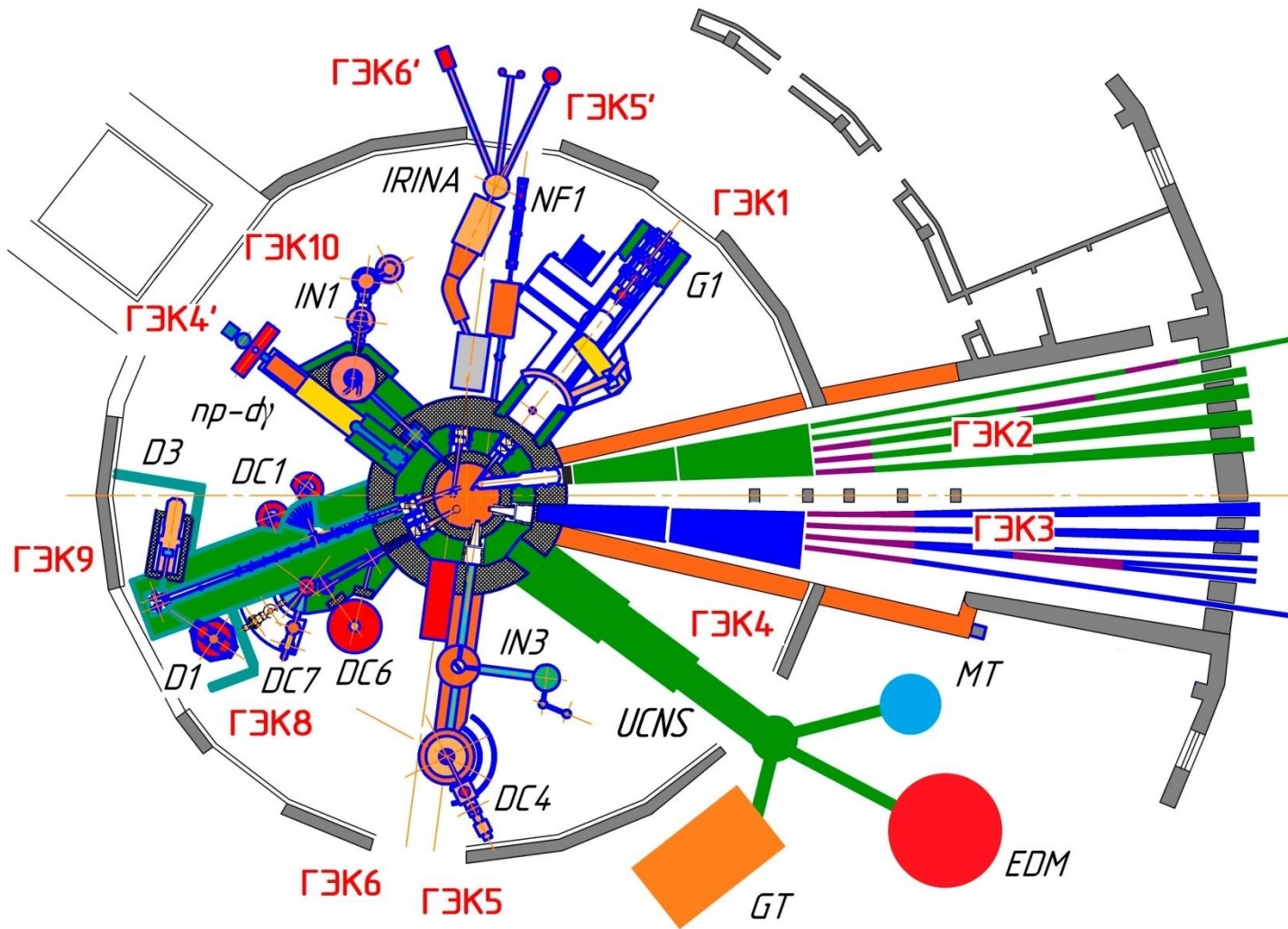
Пример гибридного ТАС



Промежуточные выводы

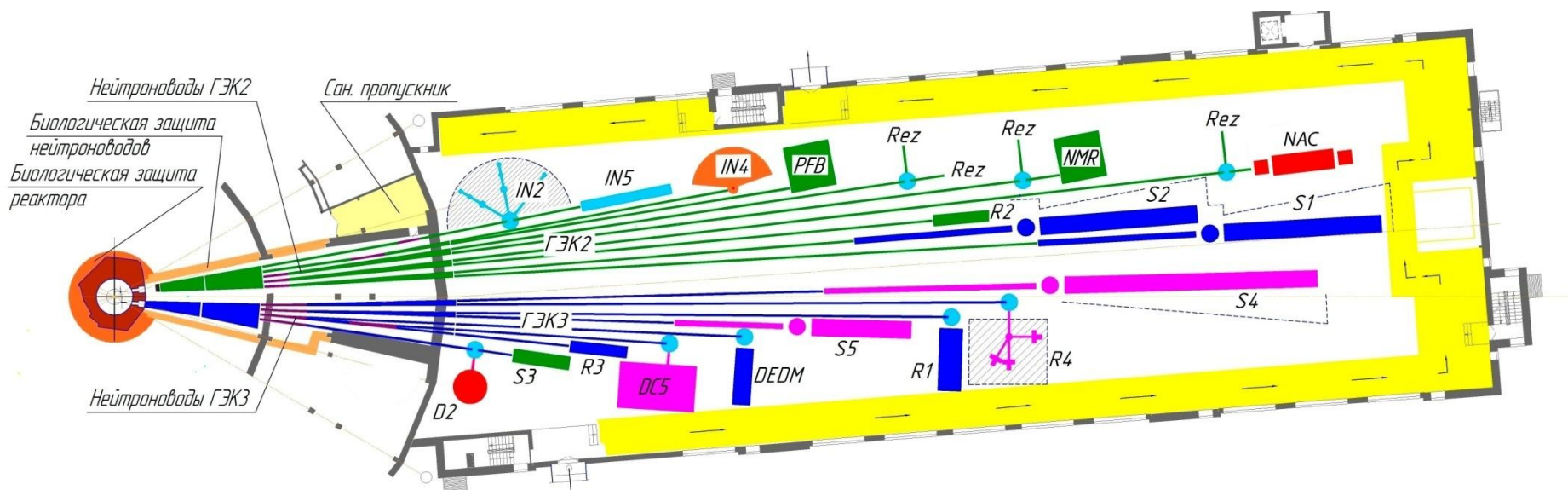
- Прибор(ы) обратного рассеяния (backscattering) просто обязан появиться в РФ после запуска ТИКа
- Спин-эхо приборы для нейтронной спектроскопии тоже безусловно нужны на ТИКе

Приборы на реакторе ПИК. Реакторный зал



М.В. Ковальчук, В.Л. Аксенов, В.М. Самсонов и др., Тренинг ФГБУ ПИЯФ 2013

Приборы на реакторе ПИК. Нейтроноводный зал



М.В. Ковальчук, В.Л. Аксенов, В.М. Самсонов и др., Трeпpинт ФГБУ ПИЯФ 2013

Нейтронная спектроскопия на реакторе ПИК

хорошие новости для ПИКа:

- в мире накоплен большой опыт по созданию и эксплуатации спектрометров НРН
- реактор HFR (ILL) близок по параметрам к реактору ПИК, выявлены плюсы и минусы многих конструктивных схем спектрометров

настораживающие новости:

- источники нейтронов испарительно-скалывающего (spallation) типа быстро прогрессируют в мире

Нейтронная спектроскопия на реакторе ТИК

Базовые принципы:

- необходимо возрождать методику НРН в стране
- нужно иметь все основные типы приборов НРН хотя бы с целью обучения и поддержания технологий
- нет смысла слепо копировать распределение приборов НРН по типам, сложившееся в настоящий момент в ILL, нужна собственная ниша и лидерство хотя бы в одном направлении НРН

Возможные решения и приоритеты:

- отказ от большого числа TOF "сканеров возбуждений" (?)
- акцент на кристалльные спектрометры - TAS разных типов - инструменты для профессионалов



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!