

ヨーロッパにおける1241日

山元 一広

Institute for Cosmic Ray Research, the University of Tokyo

8 June 2011@重力波研究交流会

Contents

- 1. (Self) introduction***
- 2. Deutschland***
- 3. Italia***
- 4. 副業的なこと***
- 5. 外国での研究職を得るには***
- 6. Summary***

1. *(Self) introduction*

Personal history : 博士号取得まで

学部4年 : 坪野研究室 配属

大学院 : 坪野研に進学

坪野研助手 : 三尾、河邊、安東

坪野研の大学院生

一学年上 : 安東

同期 : 新井、大石

一学年下 : 高森

他の研究室の同期 : 内山、長野

1. *(Self) introduction*

Personal history : 博士号取得から渡欧まで

東京大学 宇宙線研究所 重力波グループ 研究員 (6年1月)

国立天文台 重力波プロジェクト推進室 研究員 (半年)

1. (Self) introduction

Personal history : 渡欧から帰国まで

2007年11月5日 : Hannover (ドイツ) へ

Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik

(Albert-Einstein-Institut)

Institut für Gravitationsphysik

der Leibniz Universität Hannover

2010年6月16日 : Trento (イタリア) へ

Dipartimento di Fisica, Universit`a degli Studi di Trento

2010年10月15日 : Padova (イタリア) へ

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Padova

2011年3月30日 : 帰国



2. Deutschland

111
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover

2007年11月5日 : Hannover (ドイツ) へ

Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik

(Albert-Einstein-Institut)

One of the institutes of “Max-Planck-Gesellschaft”
Golm(Potsdam) und Hannover



Institut für Gravitationsphysik

der Leibniz Universität Hannover

One of the institutes of Hannover University

Wo ist Hannover ?

(Where is Hanover ?)



Was gibt es in Hannover ?

(What is there in Hanover ?)



Hannover Hauptbahnhof (Hanover central station)



Kroepcke (Weihnachtsmarkt)
Kroepcke (Christmas market)



Neu Rathaus (New city hall)



Altstadt (Old town)



Maschsee (Masch lake)



Maschsee (Masch lake)



Maschsee (Masch lake)



***Welfenschloss : Hauptgabaende
(Welfen castle : Main building)***



Unser Institut (Our institute)



Research in Hannover

Interferometer (Karsten Danzmann)

GEO600 (Input squeezing),

LISA, Laser, 10m prototype,

Quantum optics and so on ...

Data analysis (Bruce Allen)

GEO 600 (28 Jan. 2008)

***(15 km south
from Hannover)***



Quantum optics

Head : Roman Schnabel

**Squeezing, Quantum entanglement,
Grating optics, Investigation about silicon**

Squeezing

Henning Vahlbruch (Squeezing)

GWIC thesis prize

Squeezing in GEO600 (DFG Science TV,

<http://www.dfg-science-tv.de/en/projects/the-wave-hunters>)

My work : Measurement of radiation pressure noise

My slides in GWADW2010 and H. Kaufer's slides



111
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover

Radiation Pressure Noise Experiment in Hannover

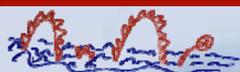
Kazuhiro Yamamoto

**Henning Kaufer, Tobias Westphal, Daniel Friedrich, Helge Mueller-Ebhardt,
Stefan Gossler, Karsten Danzmann and Roman Schnabel
Max-Planck-Institut fuer Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut)
Institut fuer Gravitationsphysik, Leibniz Universitaet Hannover**

**Kentaro Somiya
Waseda University**

**Farid Y. Khalili, Stefan L. Danilishin
Moscow State University**

**19 May 2010 Gravitational-Wave Advanced Detector Workshop
@Hearton Hotel Kyoto, Kyoto, Japan**





Optomechanics at the AEI

111
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover



Stefan Gossler
Former Postdoc



Daniel Friedrich
Ph.D. Student



Tobias Westphal
Former Dipl. Student



Kazuhiro Yamamoto
Former Postdoc



Henning Kaufer
Ph.D. Student



Andreas Sawadsky
Master Student



0. Abstract

11
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover

Radiation pressure noise measurement

with extremely **light**

but **translucent** mechanical oscillator

New topology : Michelson-Sagnac interferometer

Theoretical outlines

Current status of experiment

Future work

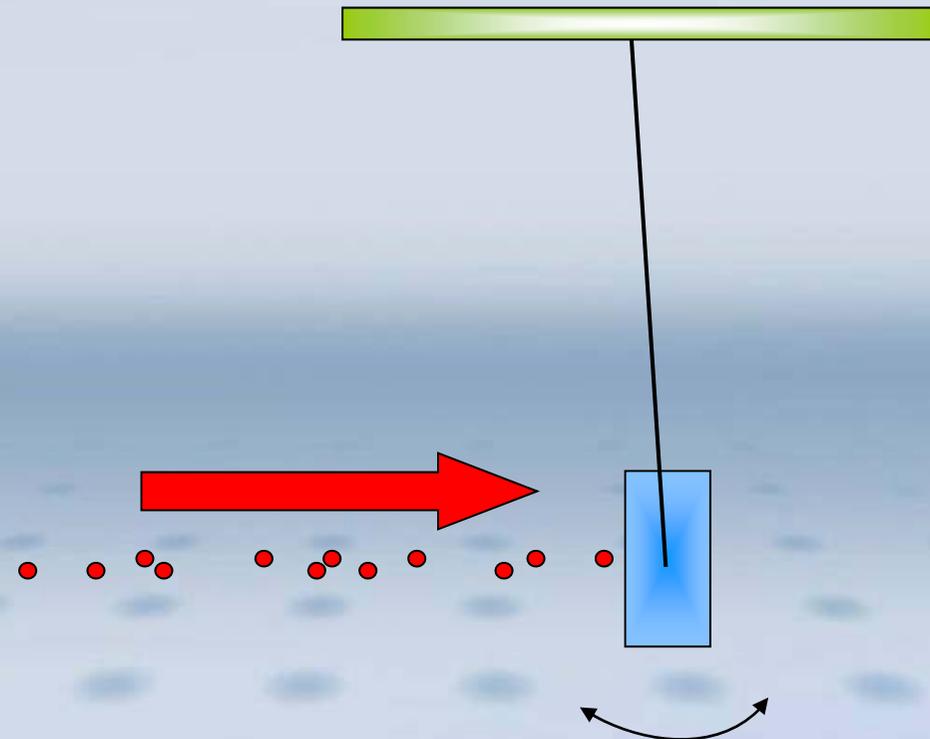
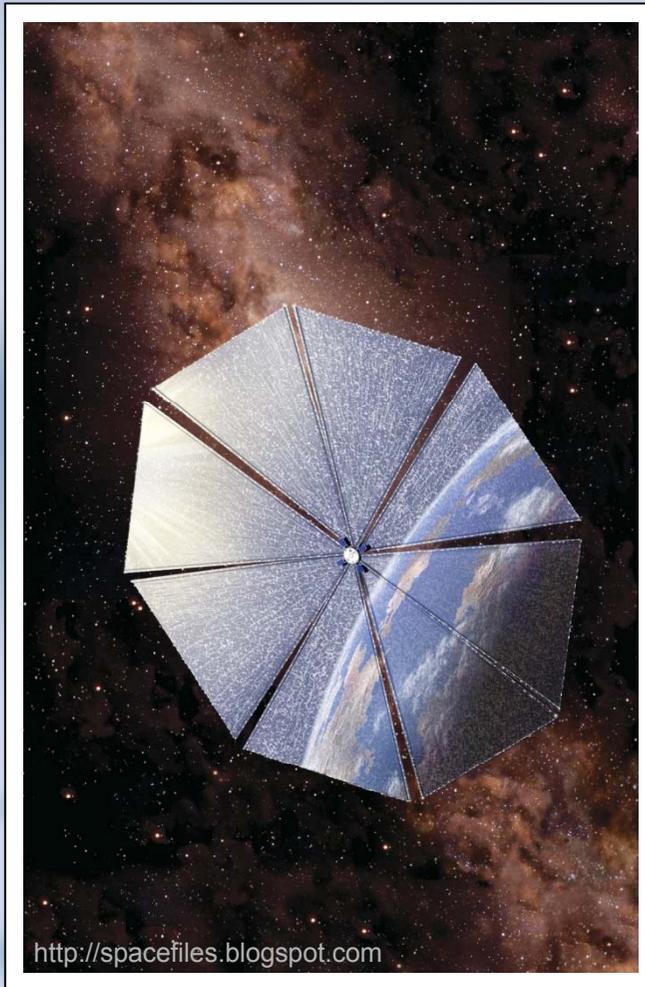


1. Introduction

Radiation pressure noise (1)

111
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover



Photons come at random
(amplitude fluctuation).

Back action of photon is also at random.

→ Radiation pressure noise



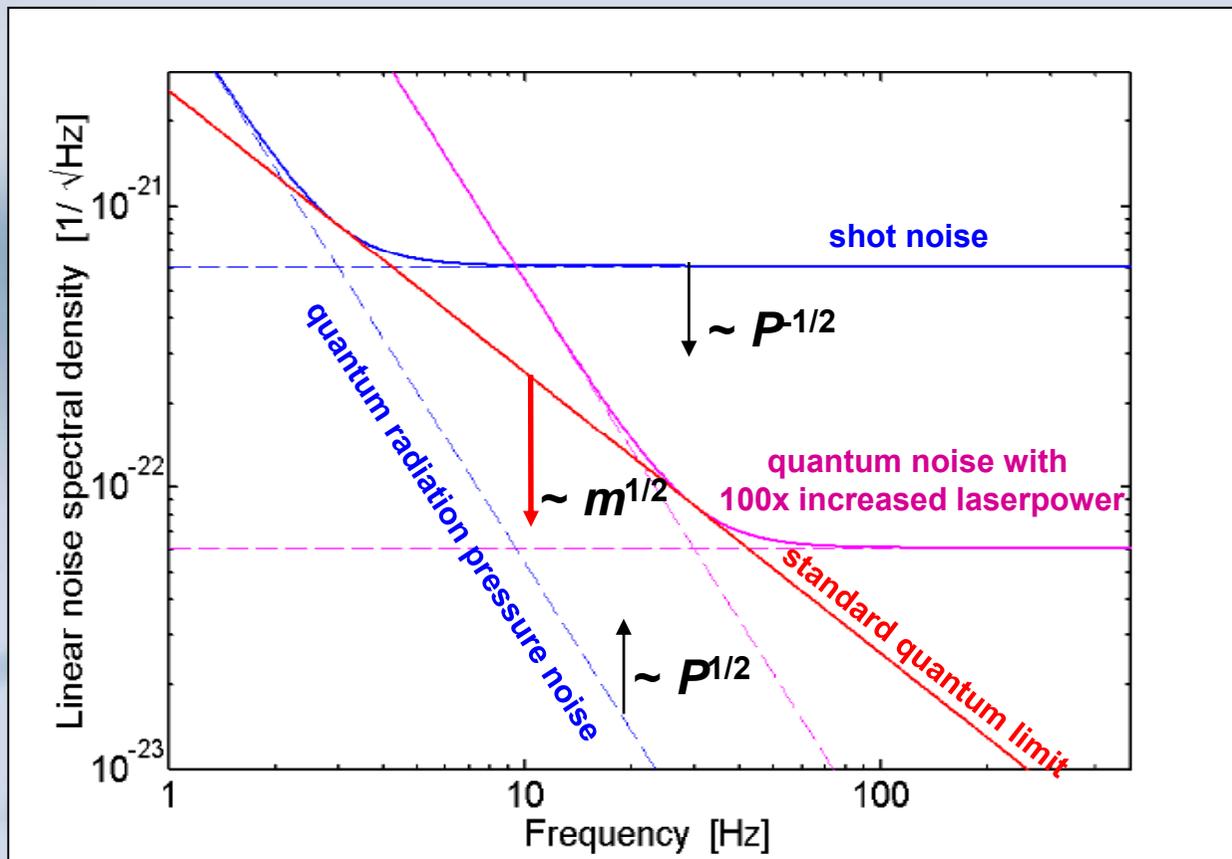
1. Introduction

Standard Quantum Limit

11
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover

Standard Quantum Limit (SQL) is a **fundamental limit** for naively optimized **conventional** interferometers. **Nobody** observed radiation pressure noise !



Large radiation pressure noise



High laser power
Light mass

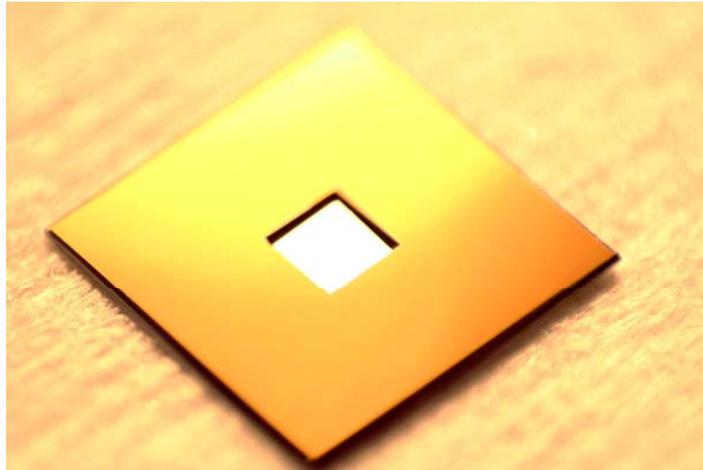


1. Introduction

Membrane (Si_3N_4 in frame)

111
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover



Mechanical properties

frame: $7,5^2 \text{ mm}^2 \times 200 \text{ }\mu\text{m}$
Area: $1,5 \text{ mm} \times 1,5 \text{ mm}$
Thickness: 75 nm
Effective mass: $\sim 100 \text{ ng}$
Resonant frequency: $\sim 73 \text{ kHz}$

Optical properties

Power Reflectance: $\sim 33\%$
Absorption: $\leq 150 \text{ ppm}$
Flatness: 1 nm?
Micro roughness: $0,2 \text{ nm?}$
Scattering: $\rightarrow 0$

J.D. Thompson *et al.*,
Nature 452 (2008) 72-76.

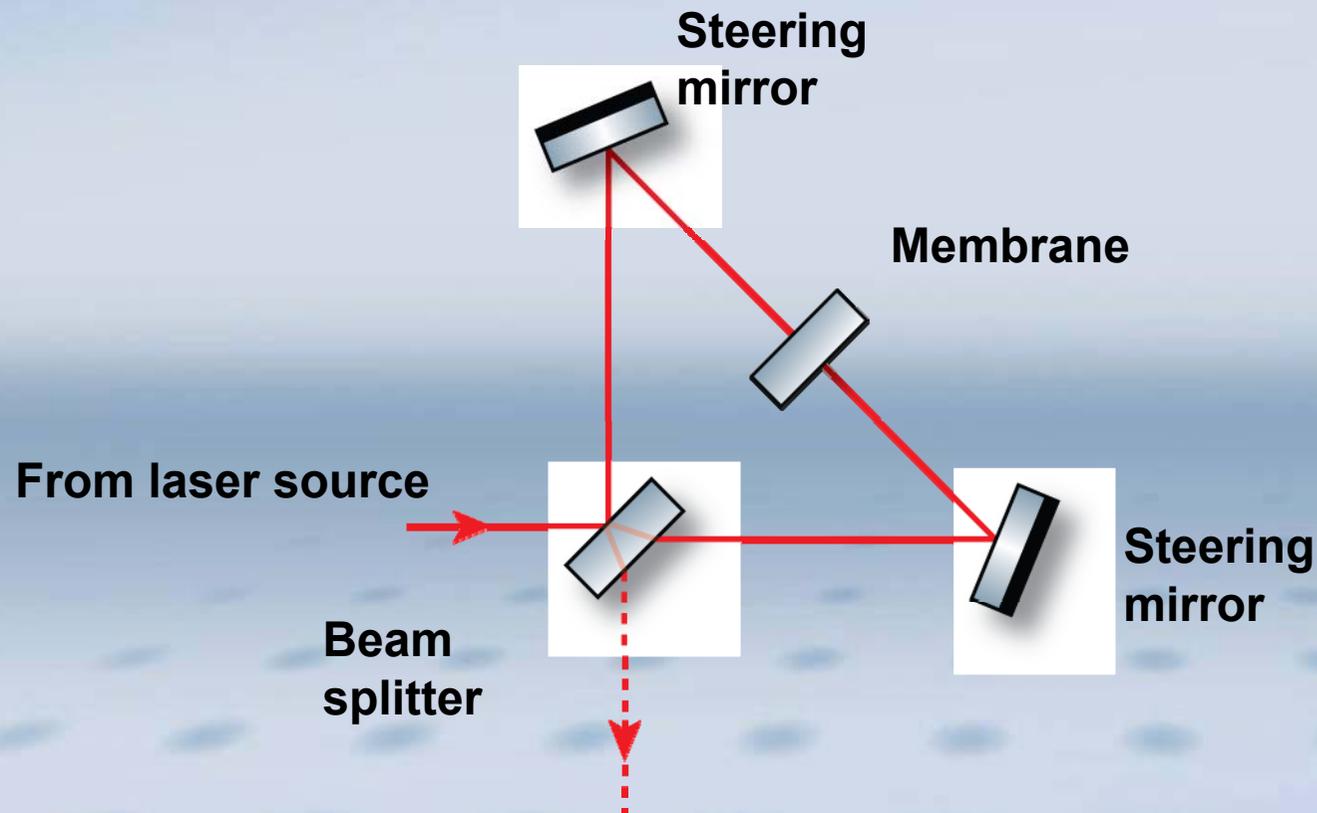


1. Introduction

Michelson-Sagnac interferometer(1)

11
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover





1. Introduction

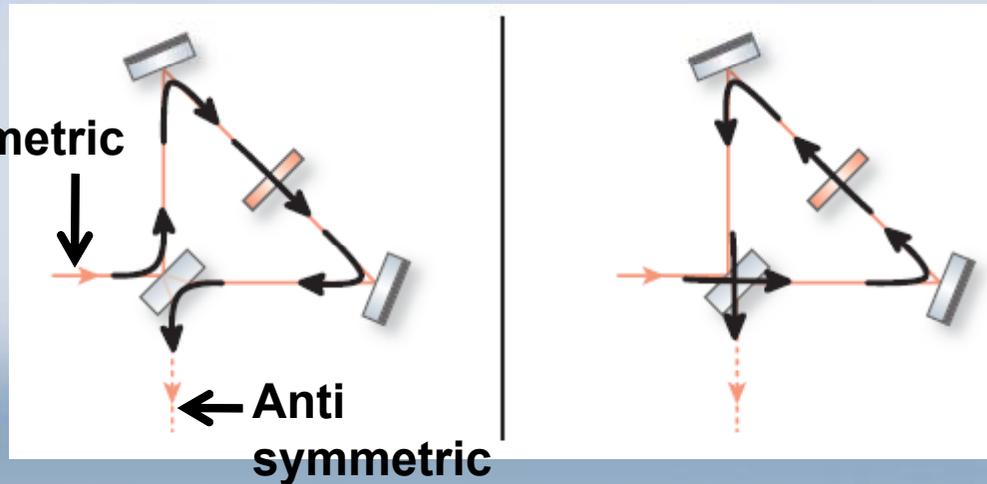
Michelson-Sagnac interferometer(2)

11
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover

Sagnac mode

Symmetric
port



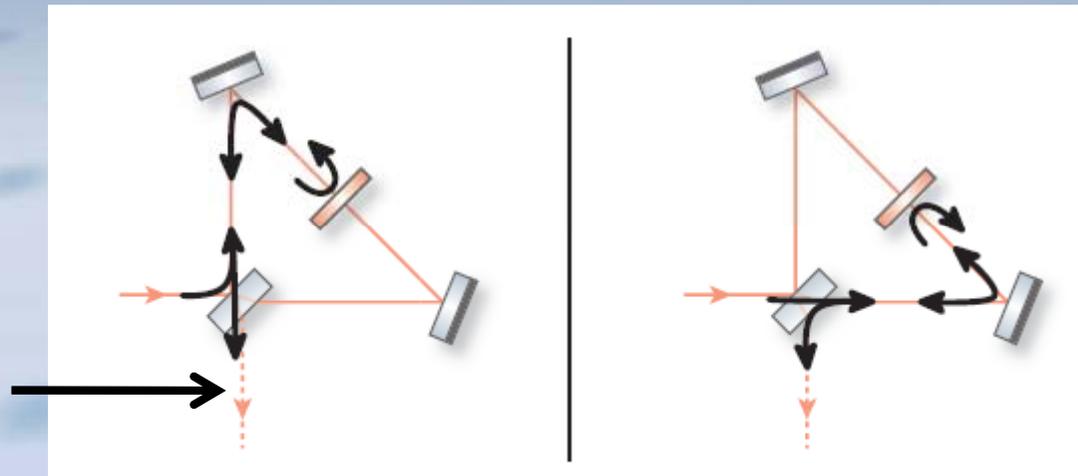
Anti

symmetric

port (**no light** of Sagnac mode)

Michelson mode

Membrane position
is **adjusted** to keep
this port dark.



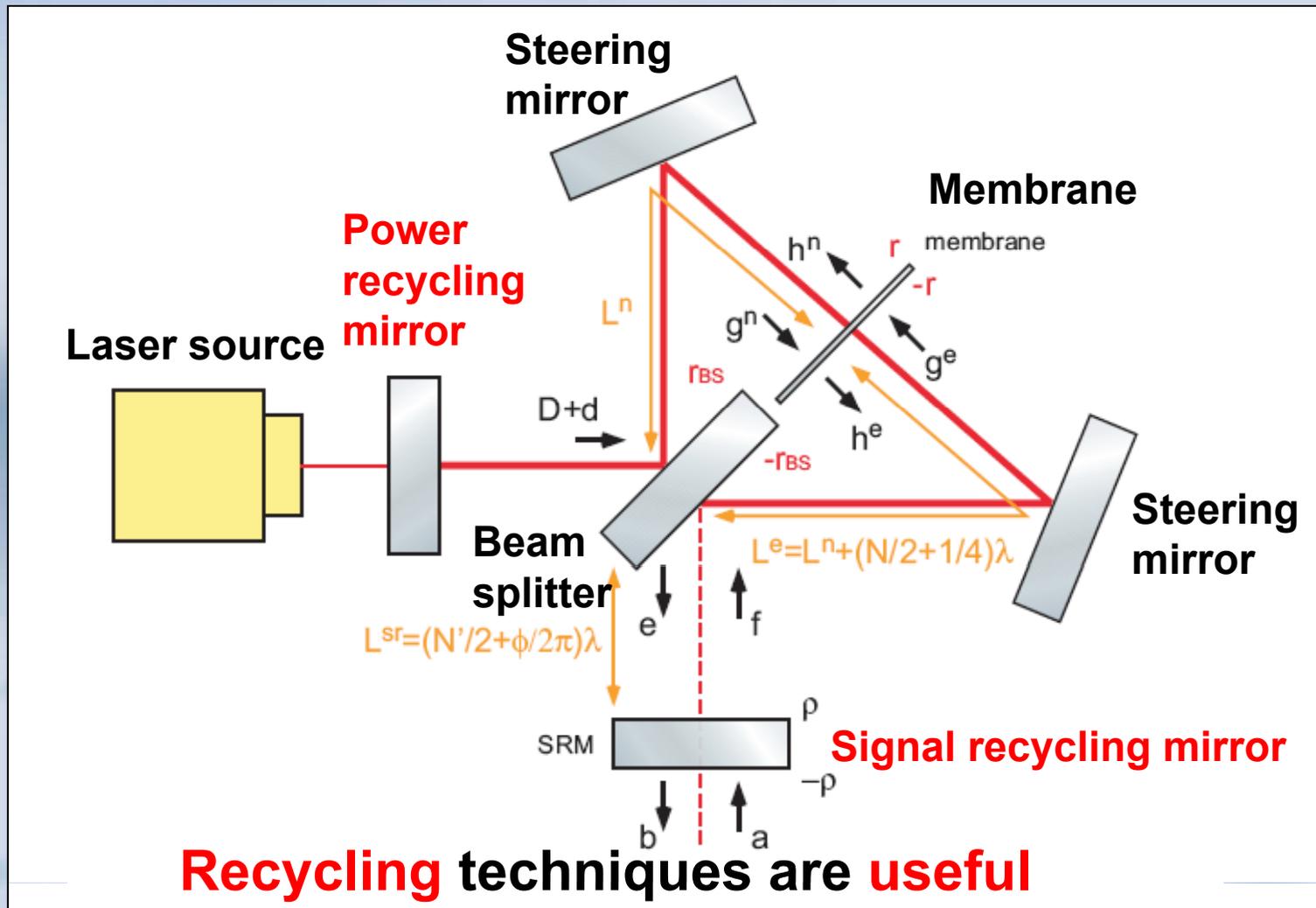


1. Introduction

Michelson-Sagnac interferometer(3)

11
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover



Recycling techniques are useful even if the membrane reflectance is low.

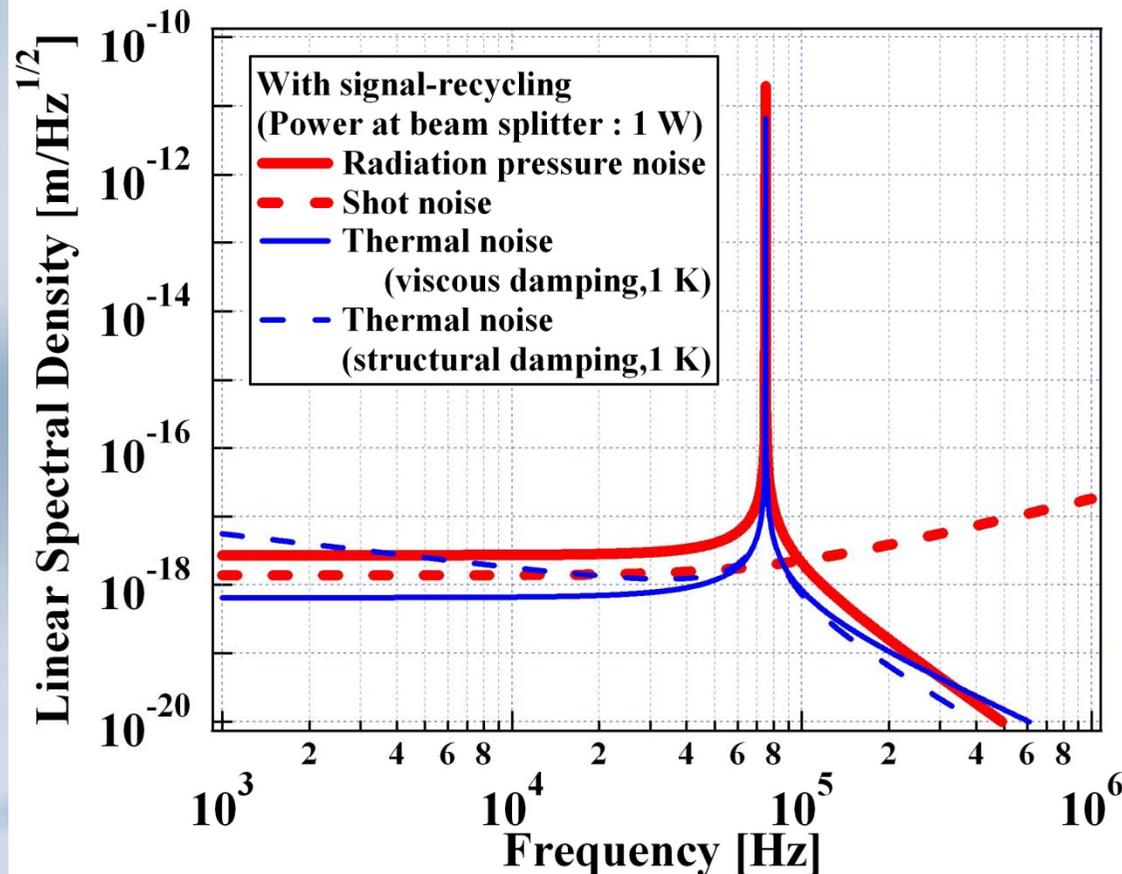


1. Introduction

Goal sensitivity

111
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover



Temperature: **1 K**
Q: 10^7
Effective Mass: 125 ng
Resonance: 75 kHz
Power at BS: **1 W**
Signal recycling mirror
99.8 % amplitude
reflectance

Radiation pressure noise is
2 and 3 times larger than
shot noise and **thermal**
noise.



1. Introduction

Node of Sagnac mode

111
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover

Sagnac mode : Clockwise and counterclockwise beams

There is **interference** between them.



Standing wave



Nodes and anti nodes

Anti symmetric port is **dark**.



Membrane must be on **node or anti-node**.

We prefer membrane on **node** because of **absorption**.



2. Current status

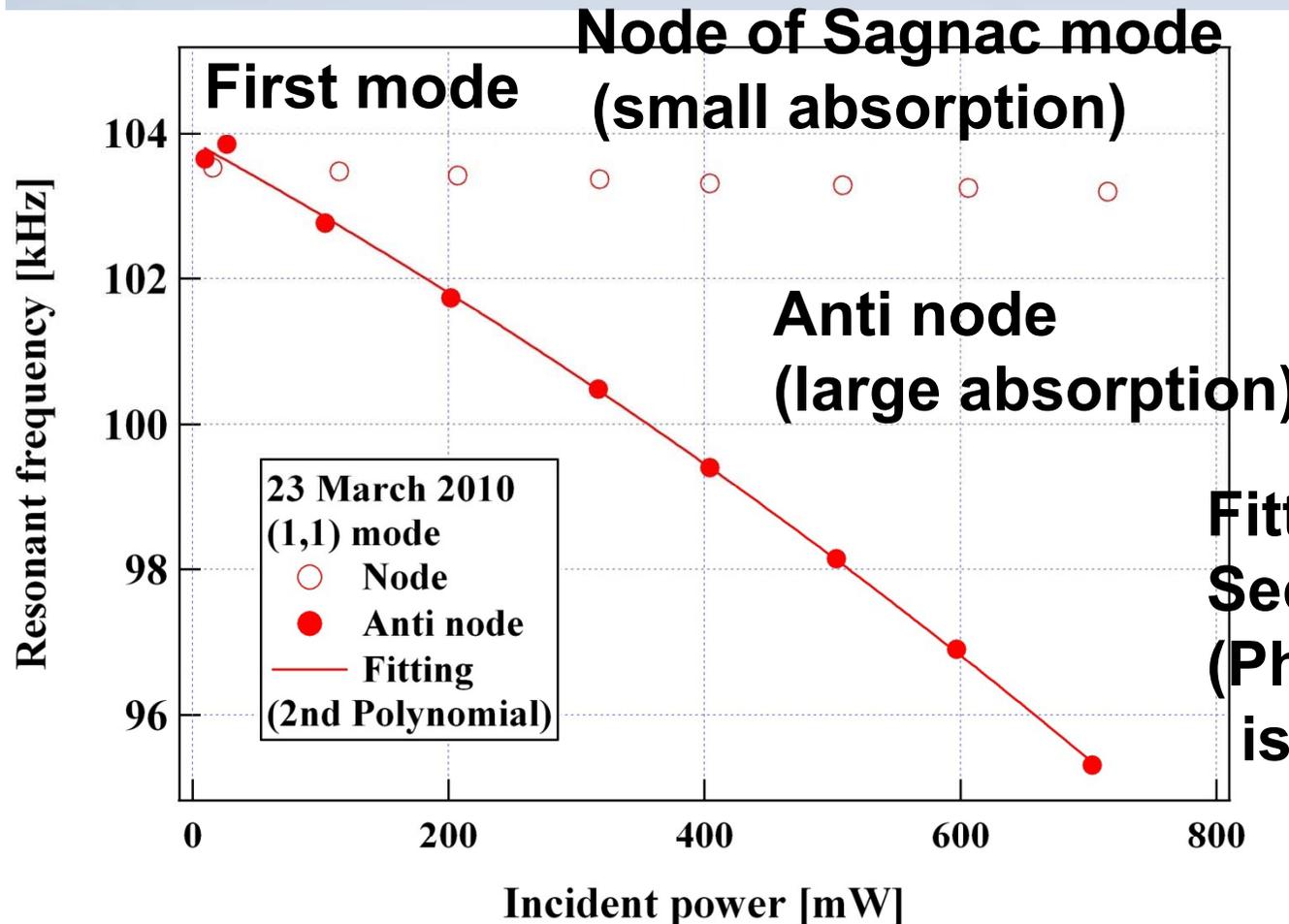
Membrane (Si_3N_4 in frame)

111
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover

Heat absorption in membrane

(in Michelson-Sagnac interferometer)



Fitting :
Second polynomial
(Physical mechanism
is not clear yet)



2. Current status

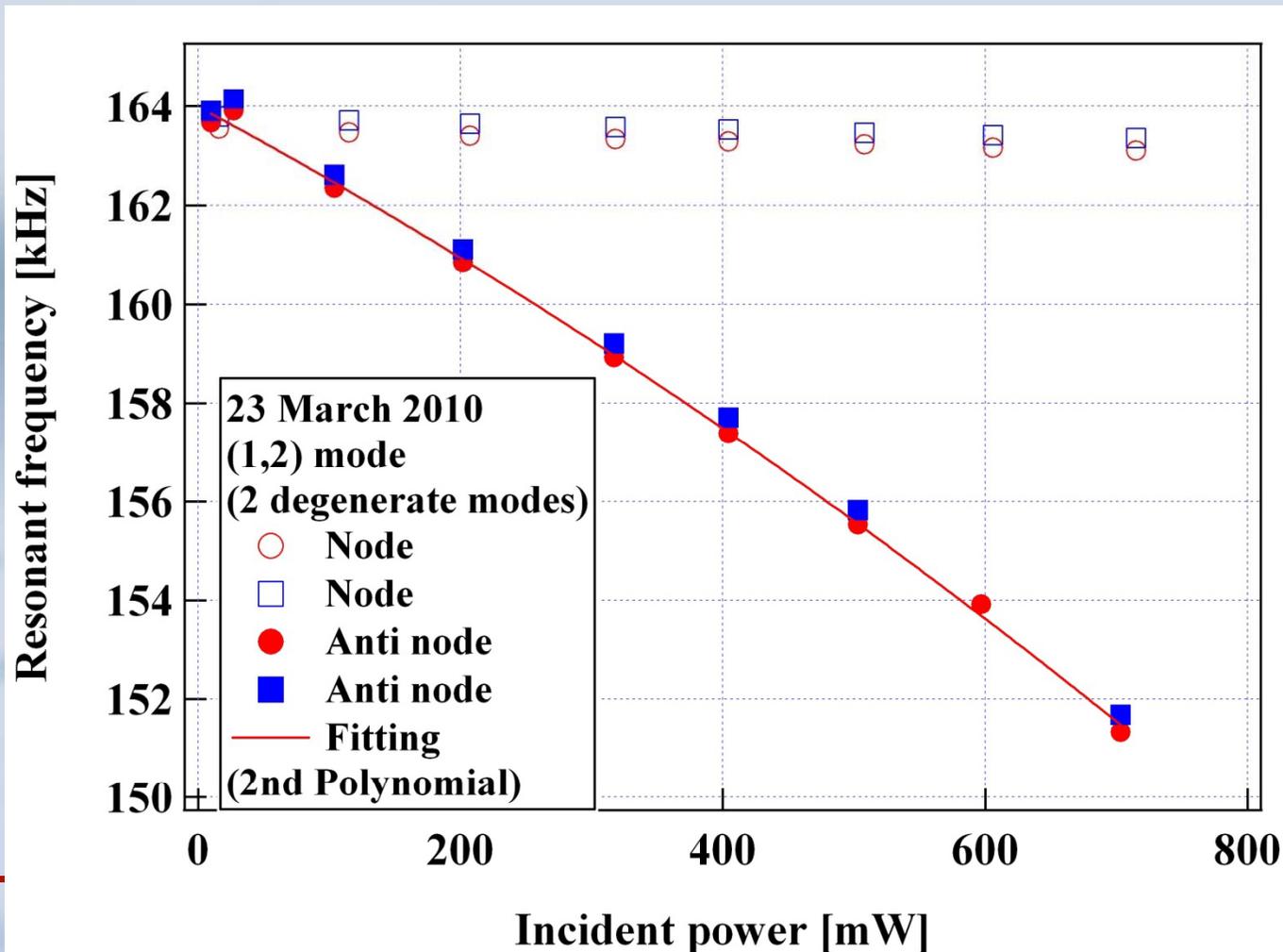
Membrane (Si_3N_4 in frame)

11
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover

Heat absorption in membrane

Second mode





2. Current status

Membrane (Si_3N_4 in frame)

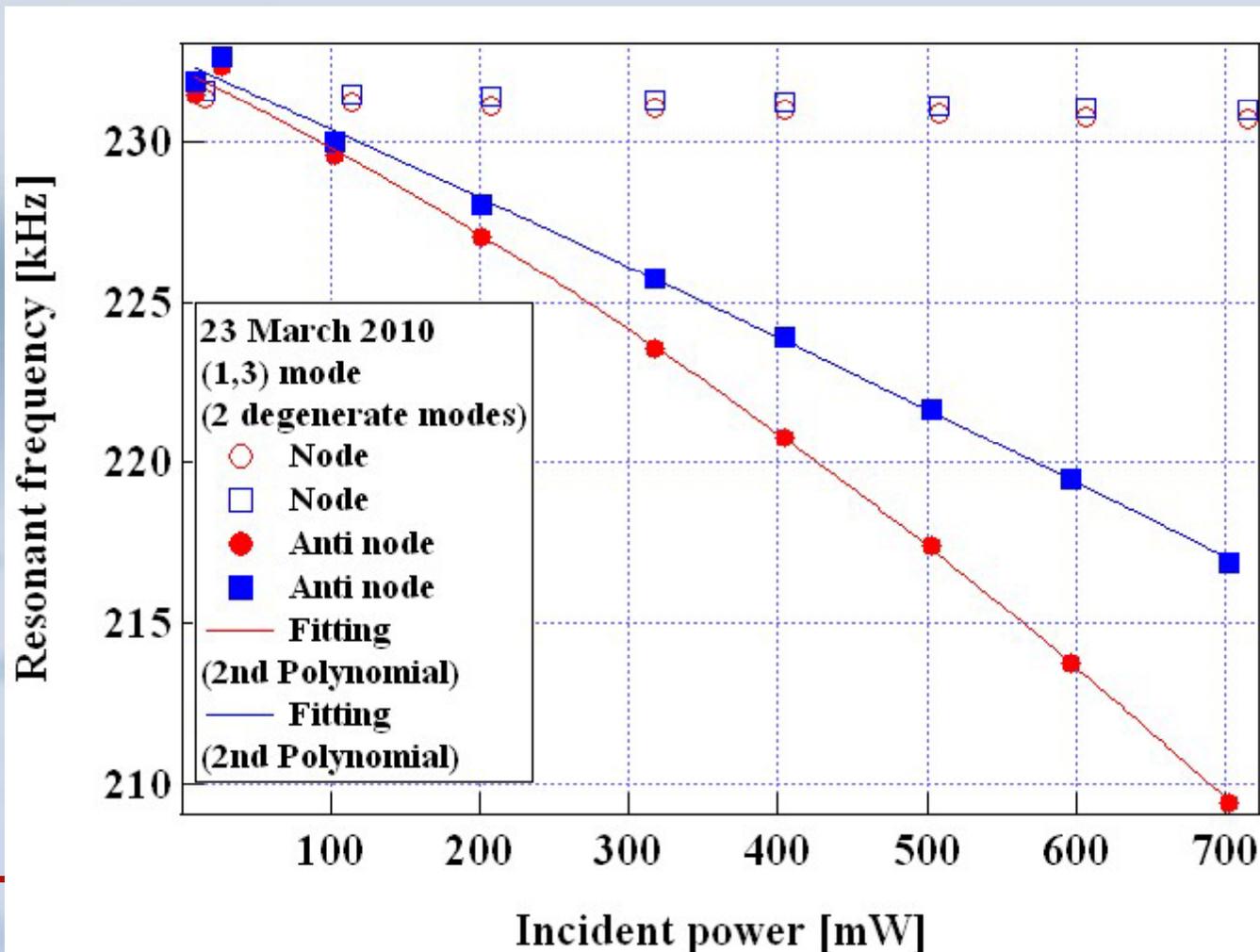
11
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover

Heat absorption in membrane

Fourth mode

Temperature gradient



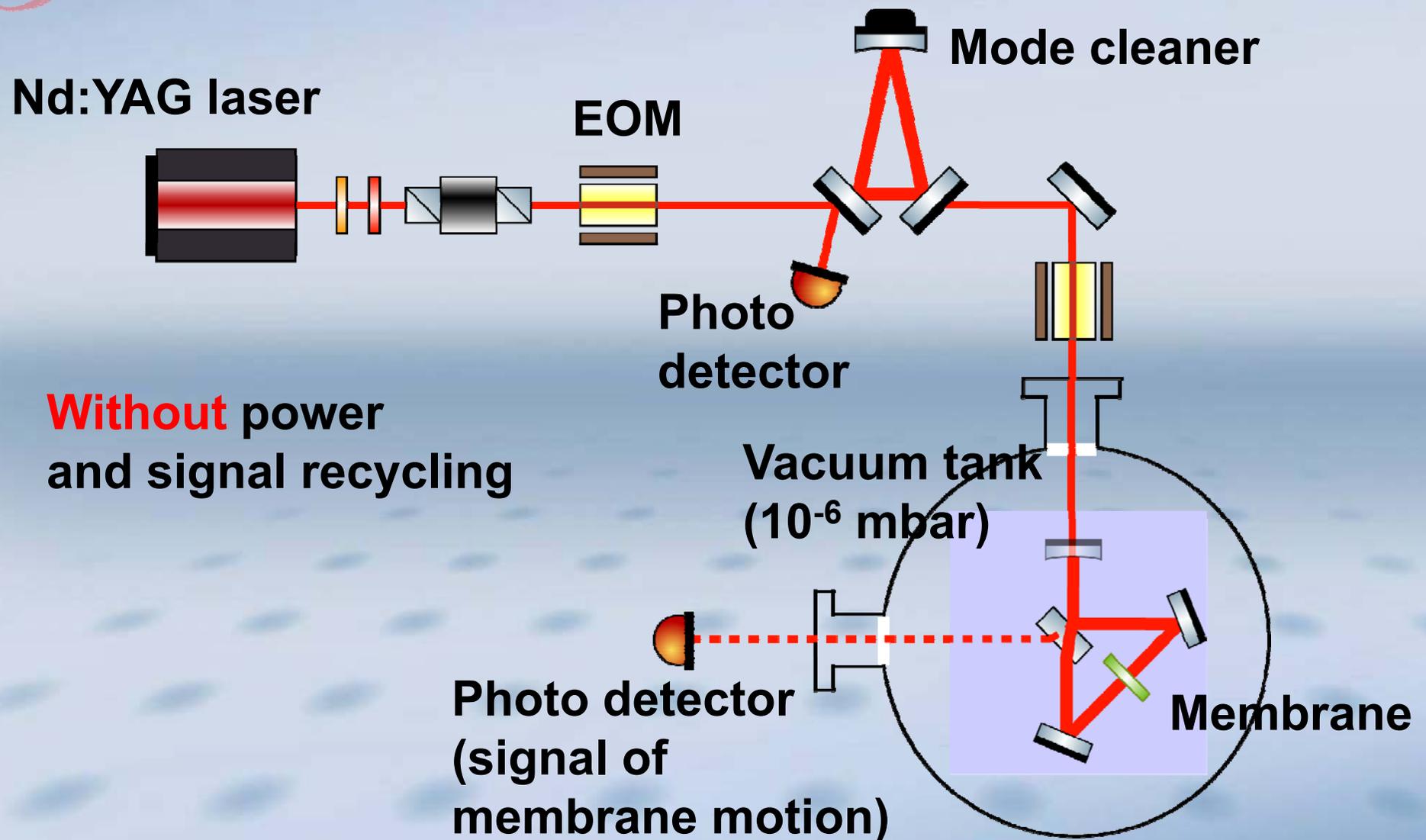


2. Current status

Michelson-Sagnac interferometer

11
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover

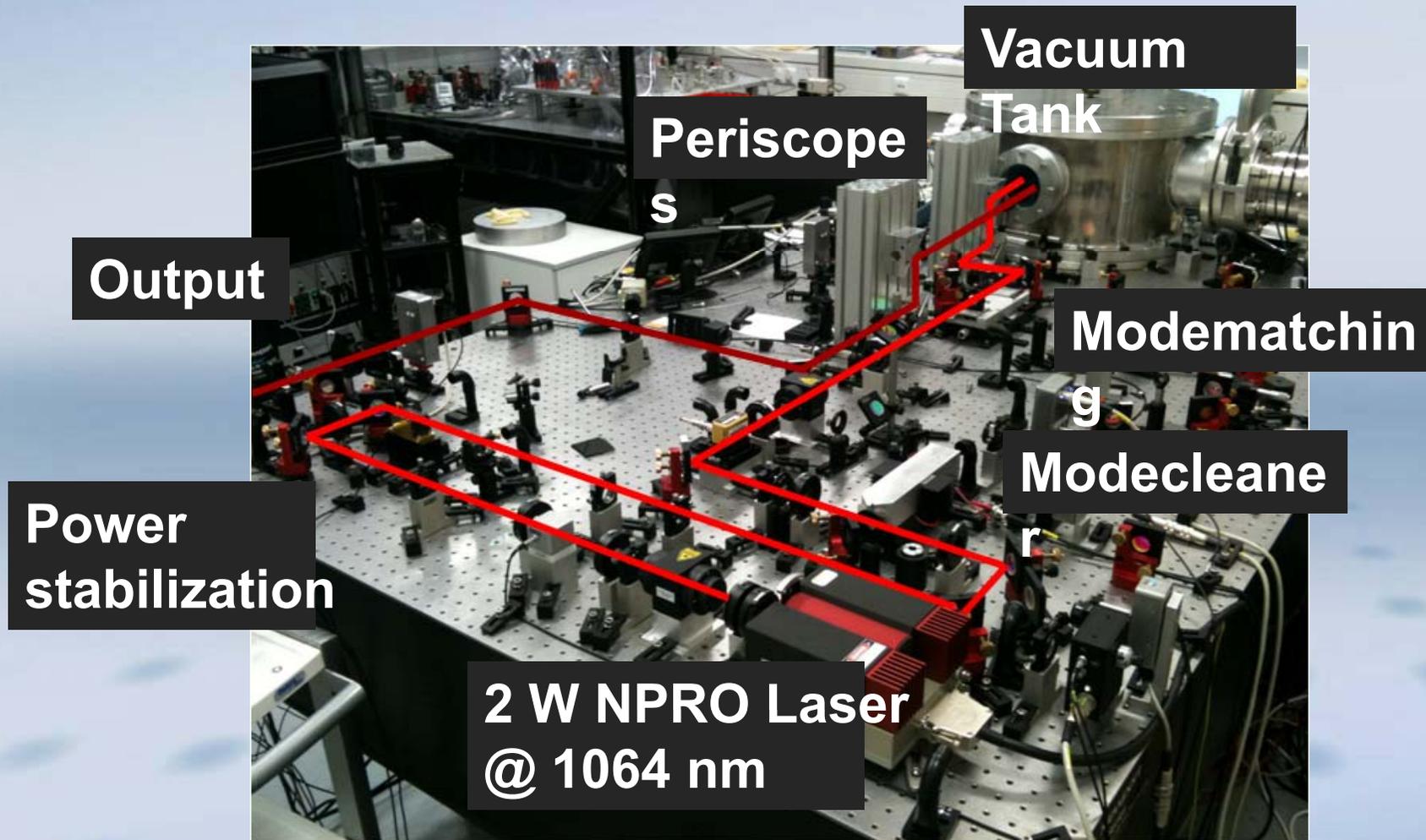




Experimental setup...

111
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover



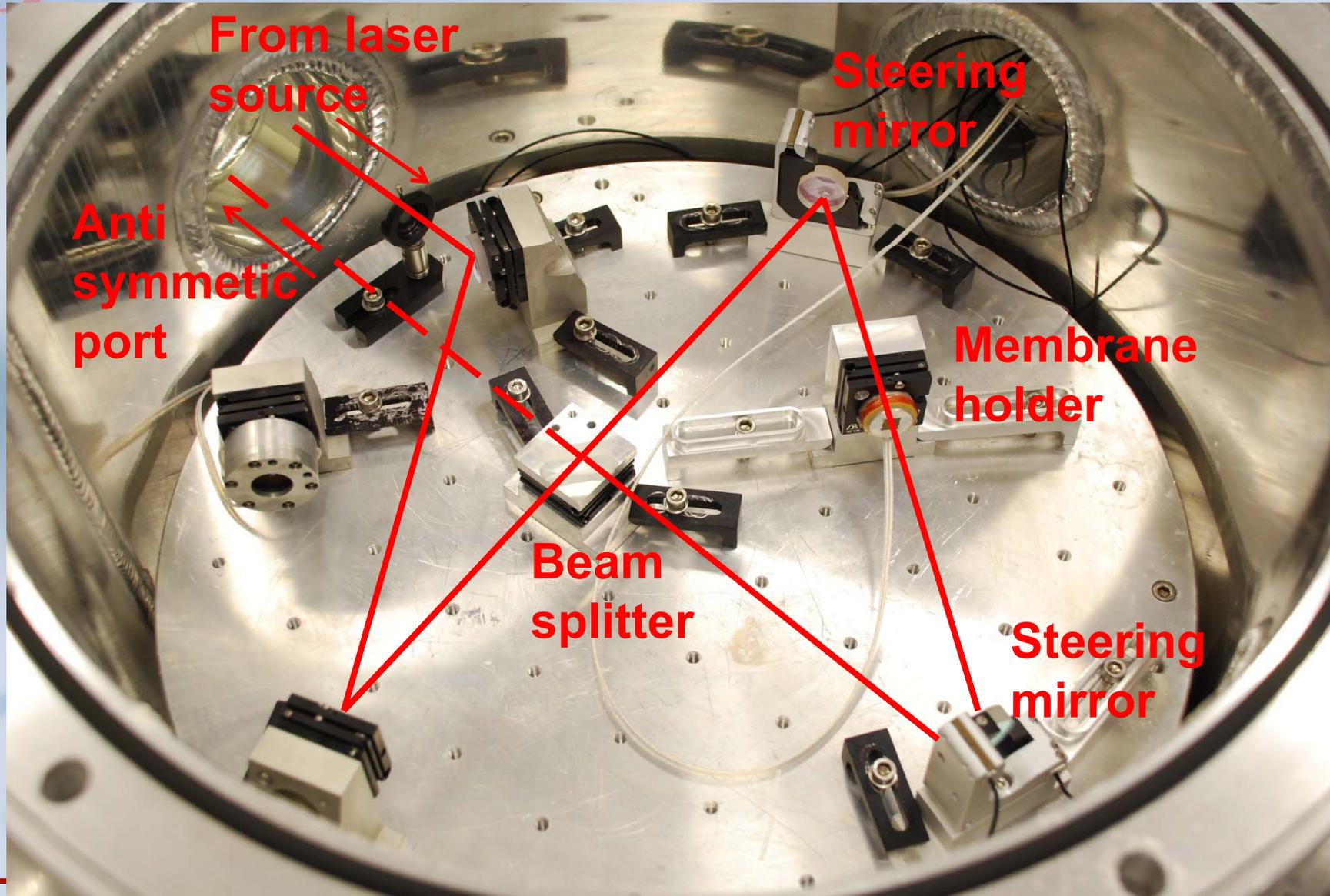


2. Current status

Inside vacuum tank

111
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover





2. Current status

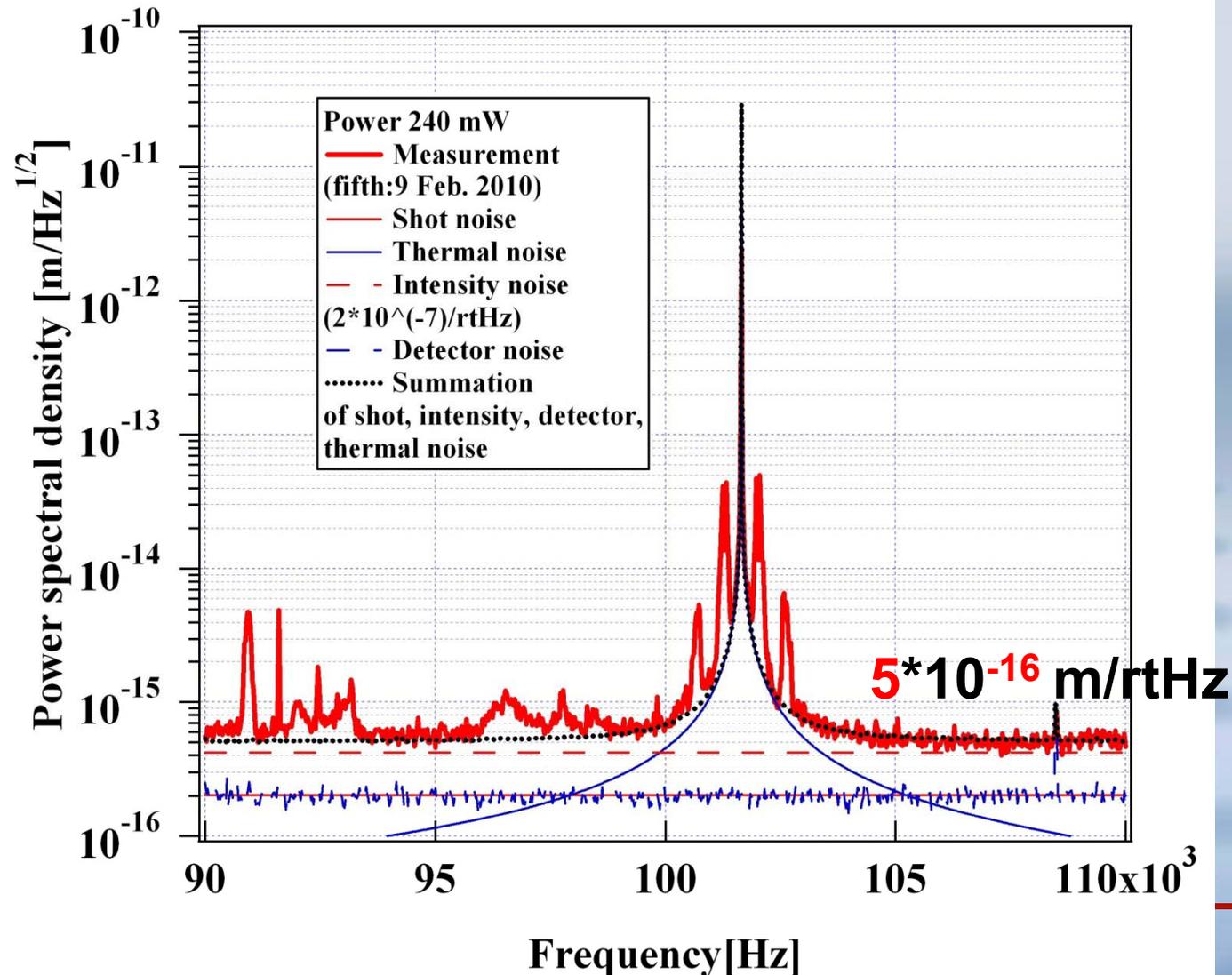
Measured power spectrum

11
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover

Off resonance :
Intensity noise

On resonance :
Thermal noise





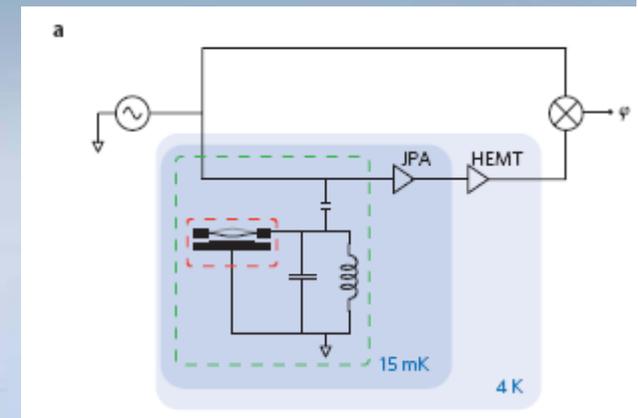
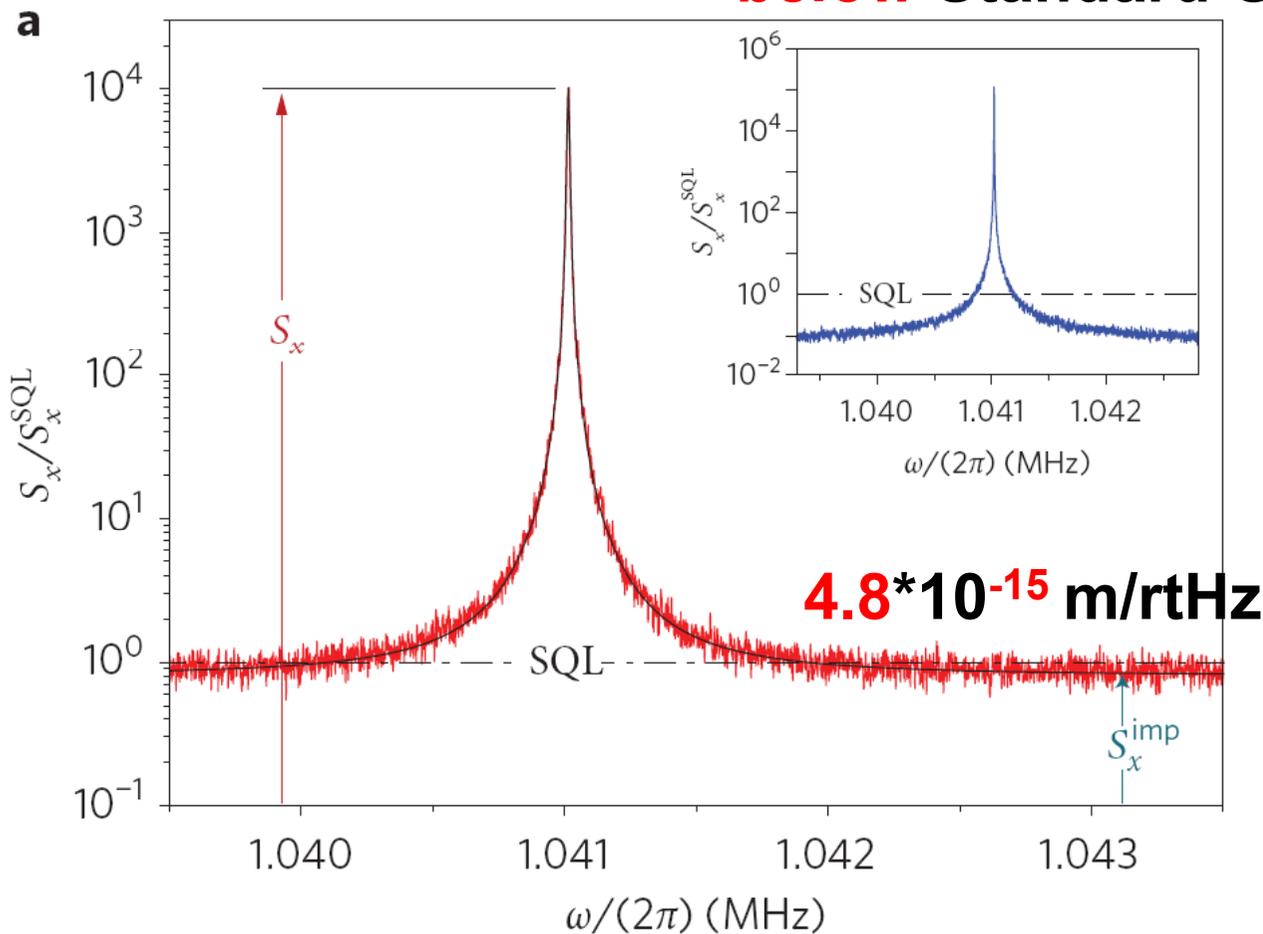
2. Current status

Standard Quantum Limit on resonance

111
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover

JILA/NIST group claims that their sensitivity is **below** Standard Quantum Limit (SQL).





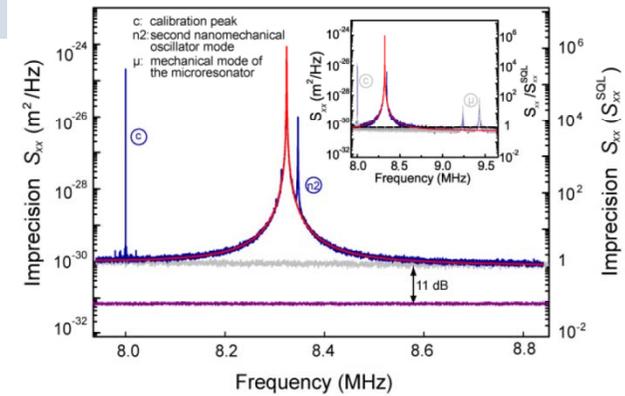
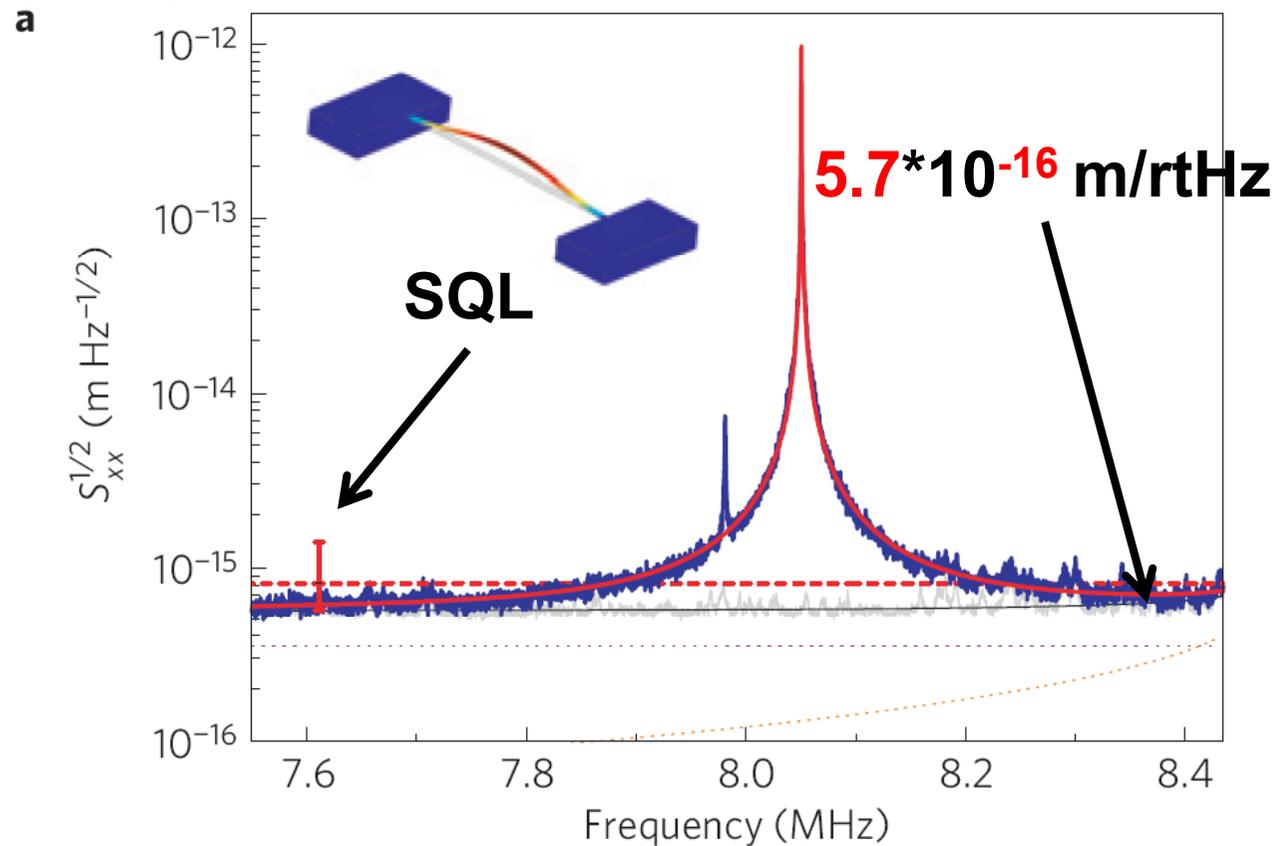
2. Current status

Standard Quantum Limit on resonance

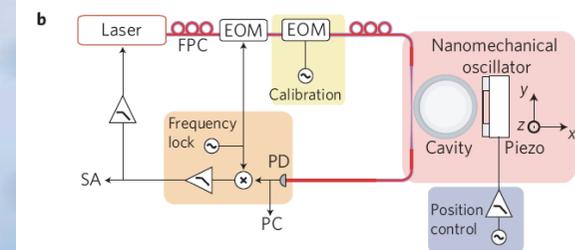
111
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover

Max-Planck-Institut (MPI) fuer Quantenoptik group also claims that their sensitivity is **below** Standard Quantum Limit (**SQL**).



Recent result from same group (arXiv:1003.3752)





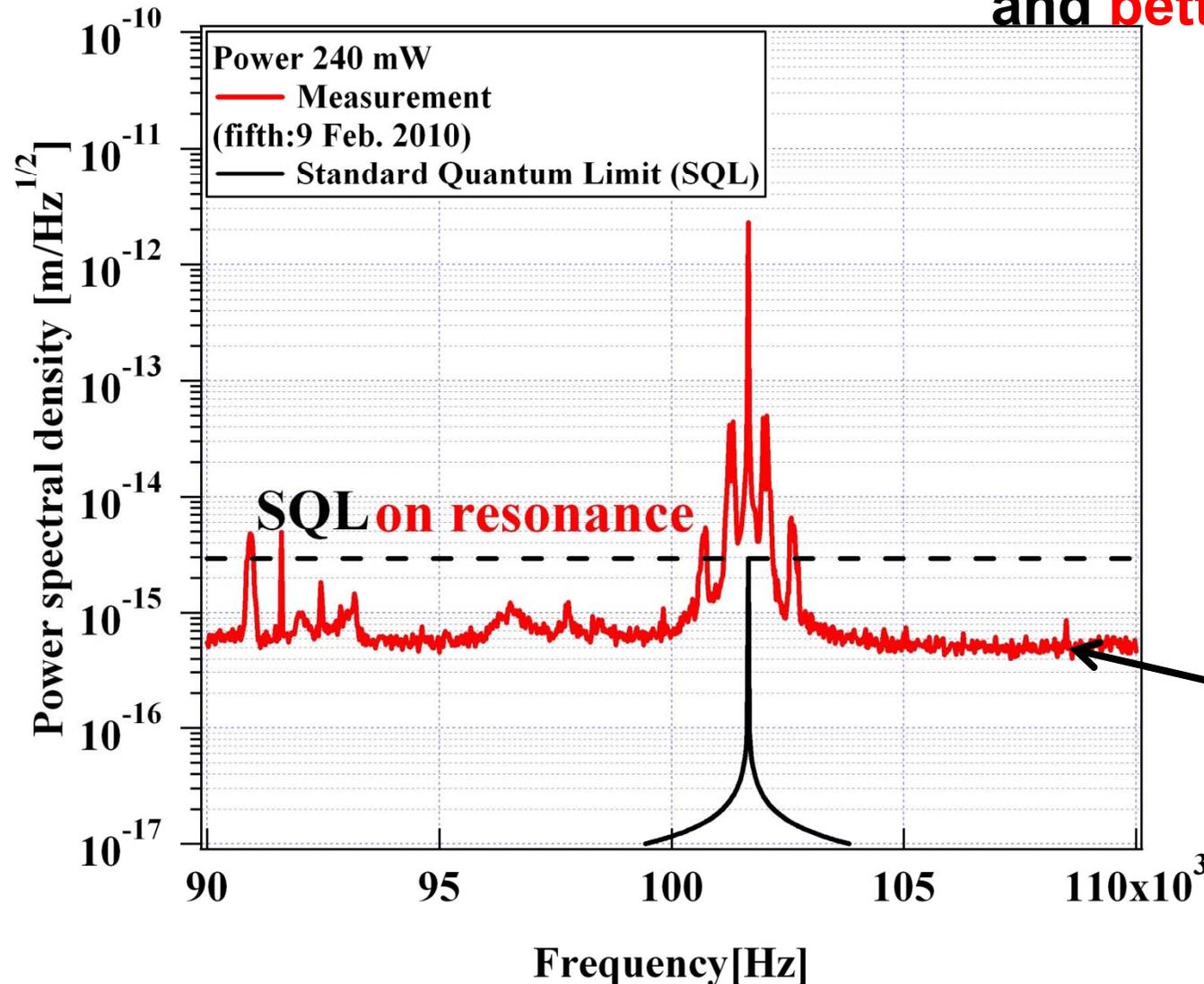
2. Current status

Standard Quantum Limit on resonance

111
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover

Our sensitivity is also **below** Standard Quantum Limit (SQL)
and **better or comparable!**





After I left Hannover

111
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover

Intensity stabilization

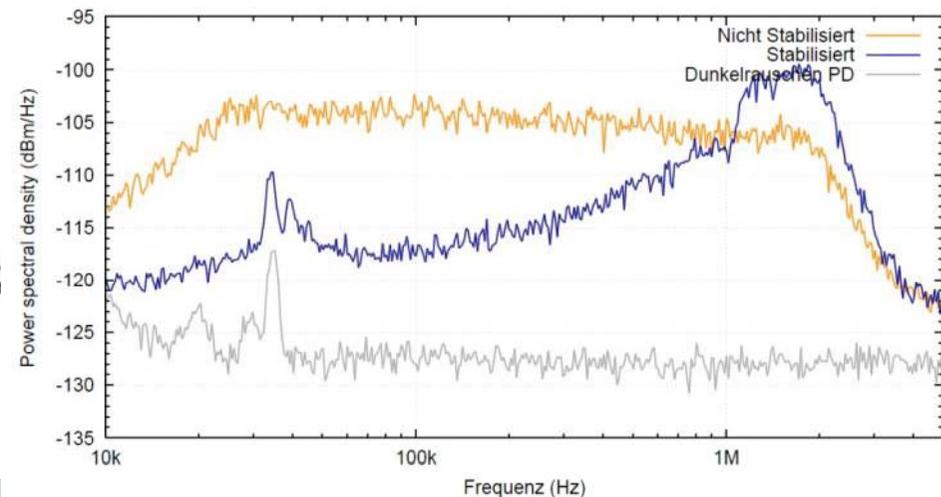
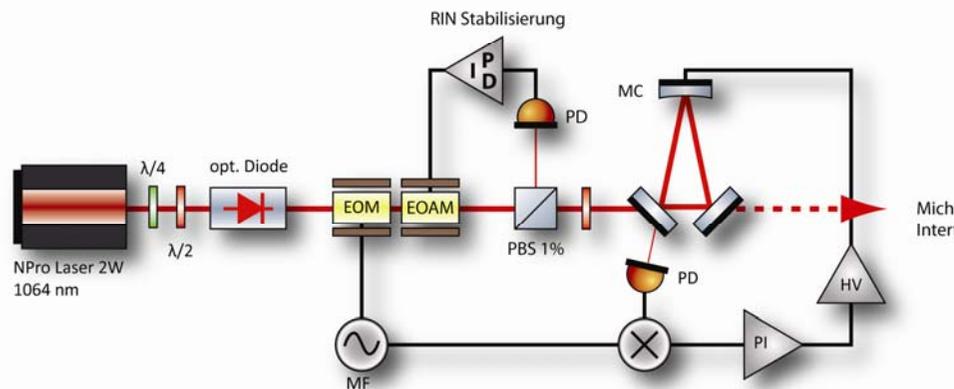
Laser intensity noise

Signal / Lasernoise independant of power

Reduced if interferometer contrast is higher

Use stabilization

$$K = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}} = 99.8\%$$

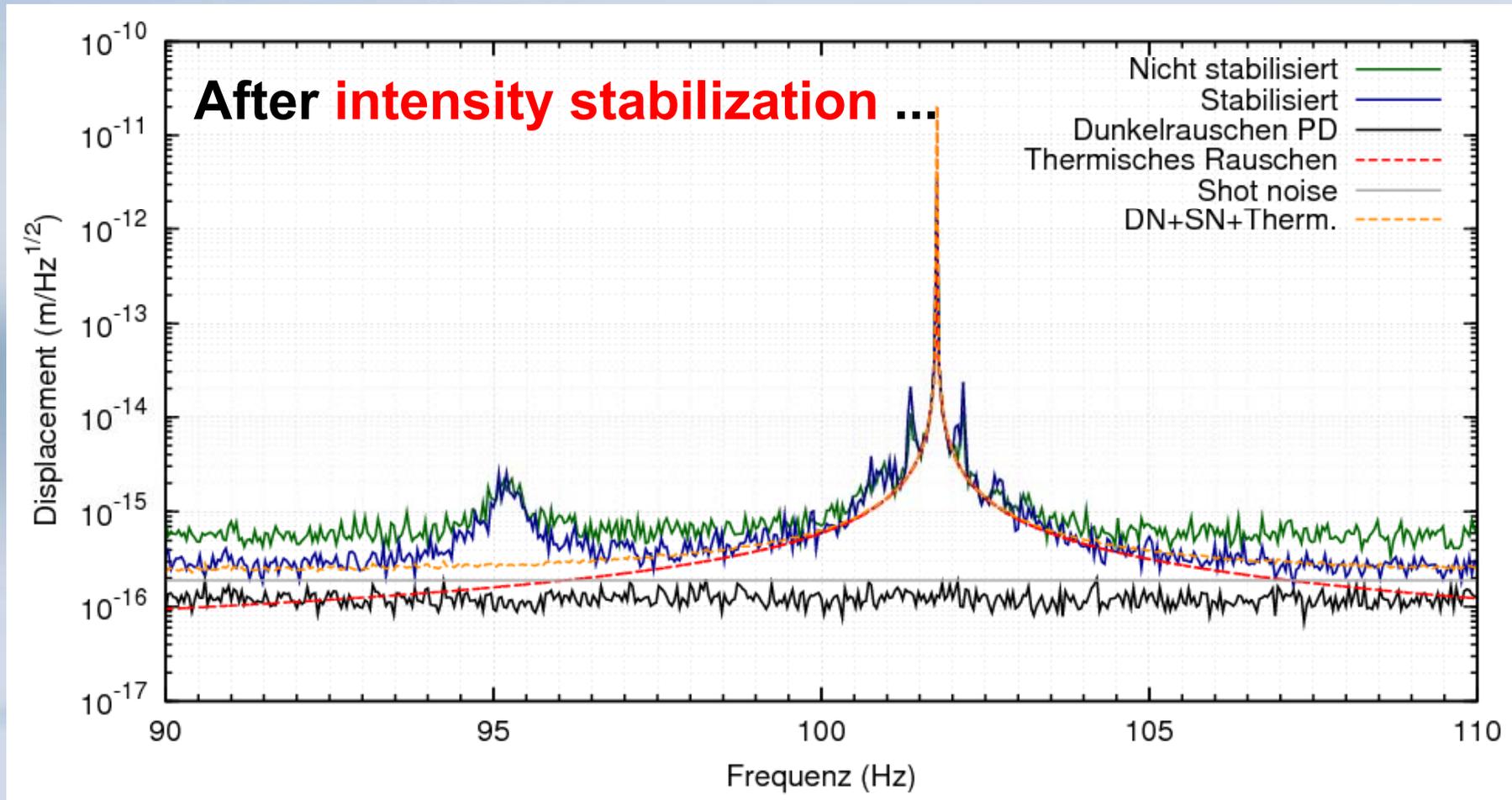




After I left Hannover

111
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover



Off resonance : **Shot noise** and **Dark noise** of photo detector

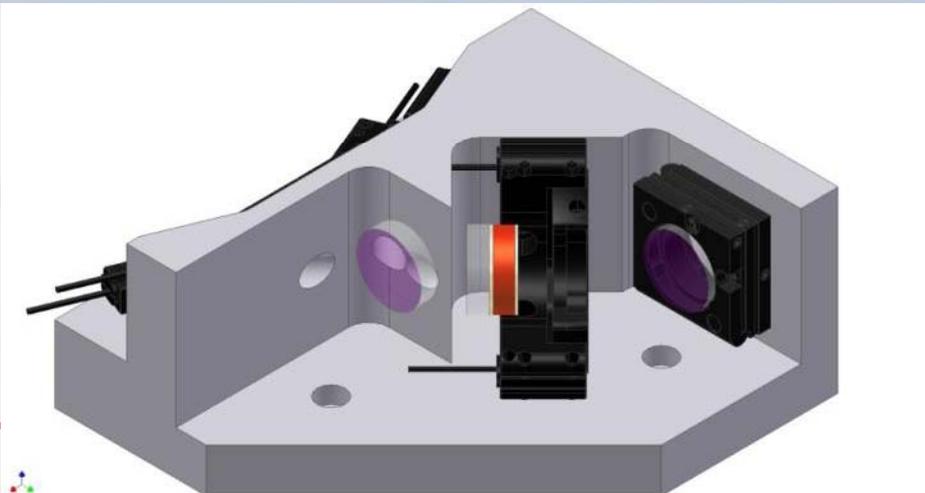
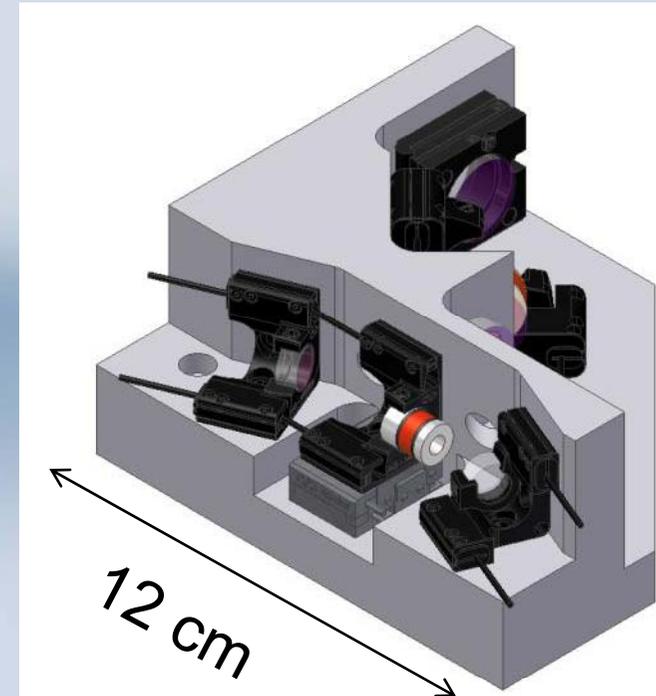


After I left Hannover New interferometer

111
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover

Smaller and stable
Better decoupling
from surrounding
Higher displacement
sensitivity





After I left Hannover

111
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover

New compact interferometer (with **signal recycling** and without membrane) was **installed** in **vacuum chamber**.
Alignment adjustment was **finished**.

Cryostat will come around **August 2012**.

New paper (membrane resonant frequency vs. laser power) has already been **submitted** (New Journal of Physics).
D. Friedrich *et al.*, arXiv 1104.3251.

3. *Italia*

2010年6月16日 : Trento (イタリア) へ
Dipartimento di Fisica, Universit`a degli Studi di Trento

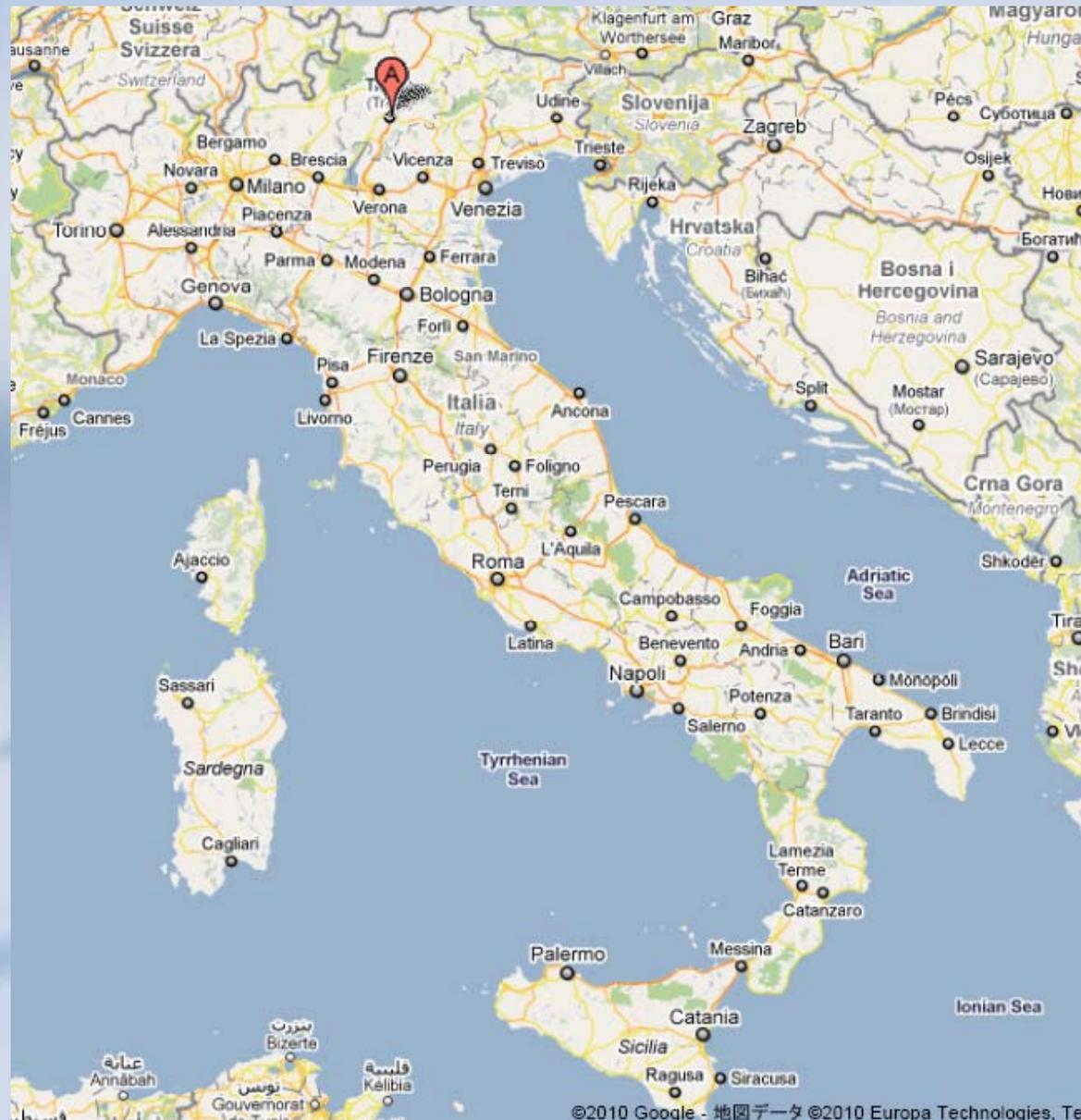
Temporaly stay

2010年10月15日 : Padova (イタリア) へ
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Padova

Goal

One of the sections of Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Dov'è Trento ?



Duomo



Castello del Buonconsiglio ***(Castle of Buonconsiglio)***



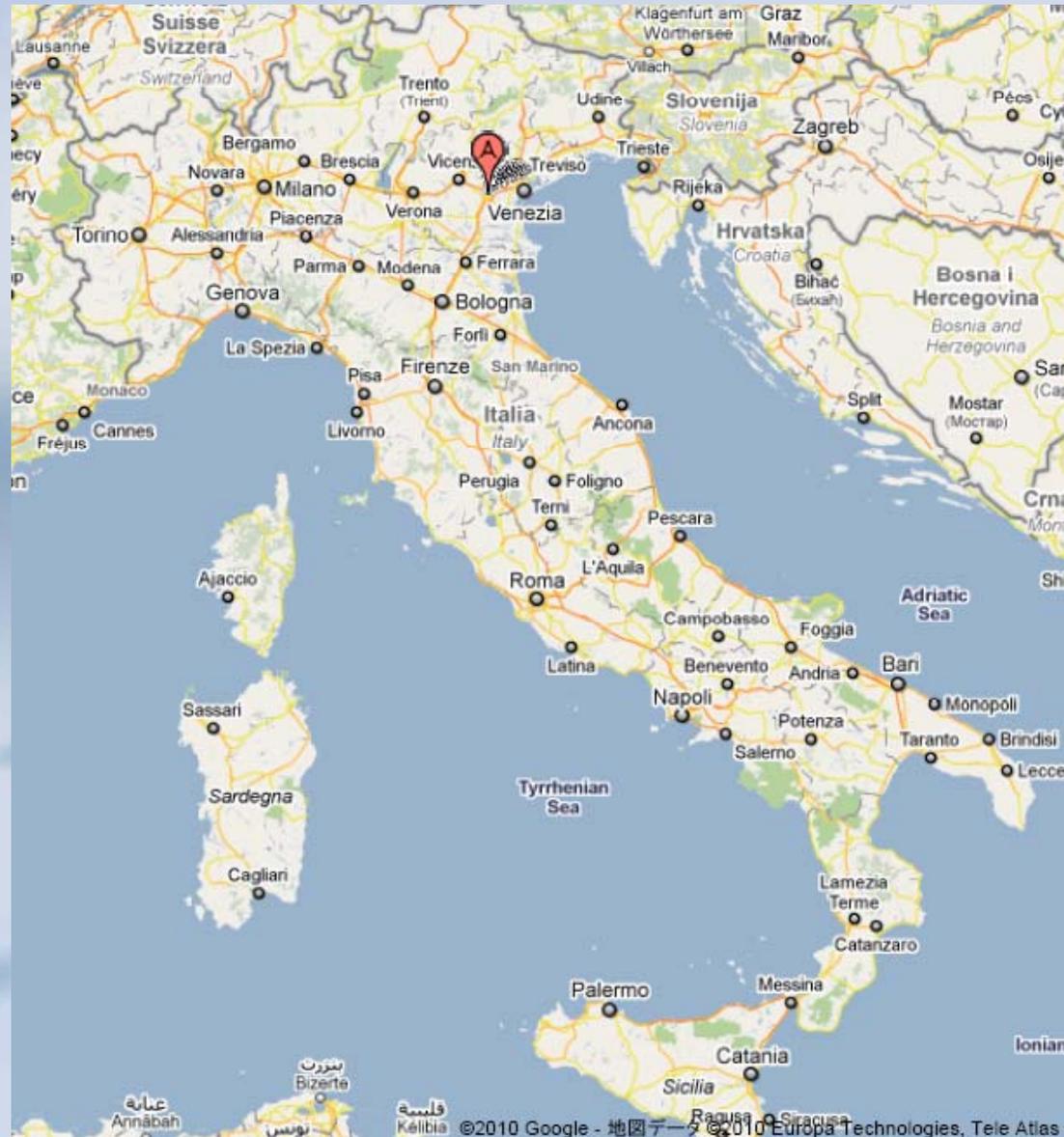
Citta` vecchia *(old town)*



Near University



Dov'è Padova ?



**AURIGA
(Resonator)**

Palazzo della Ragione *(Palace of Ragione)*



Citta` vecchia ***(old town)***



Bo (University)



Galileo Galilei

***Legnaro (10 km southeast from Padova)
(22 Nov. 2001)***



AURIGA (22 Mar. 2011)



Research

Supervisors

Trento : Giovanni Andrea Prodi (Data analysis)

Padova : Jean-Pierre Zendri (AURIGA, resonator)

What is the motivation ?

Resonator \longrightarrow Interferometer

Cryogenic apparatus for resonator

Cryogenic experiment for **interferometer** ?

For example, optical loss at cryogenic temperature ?

Research

SiN membraneの**光学損失**の測定の準備(**低温**)
(Legnaro, Padova):
Measurement of finesse of cavity
with and without membrane

市販品(Norcada)だけでなくTrento大学でも作ってもらう。

Enrico Serra

Interdisciplinary Laboratory for Computational Science (Joint project of
Fondazione Bruno Kessler and Universita degli Studi di Trento)

Hannover radiation pressure noise experimentに
有利なmembraneの開発のアイデア

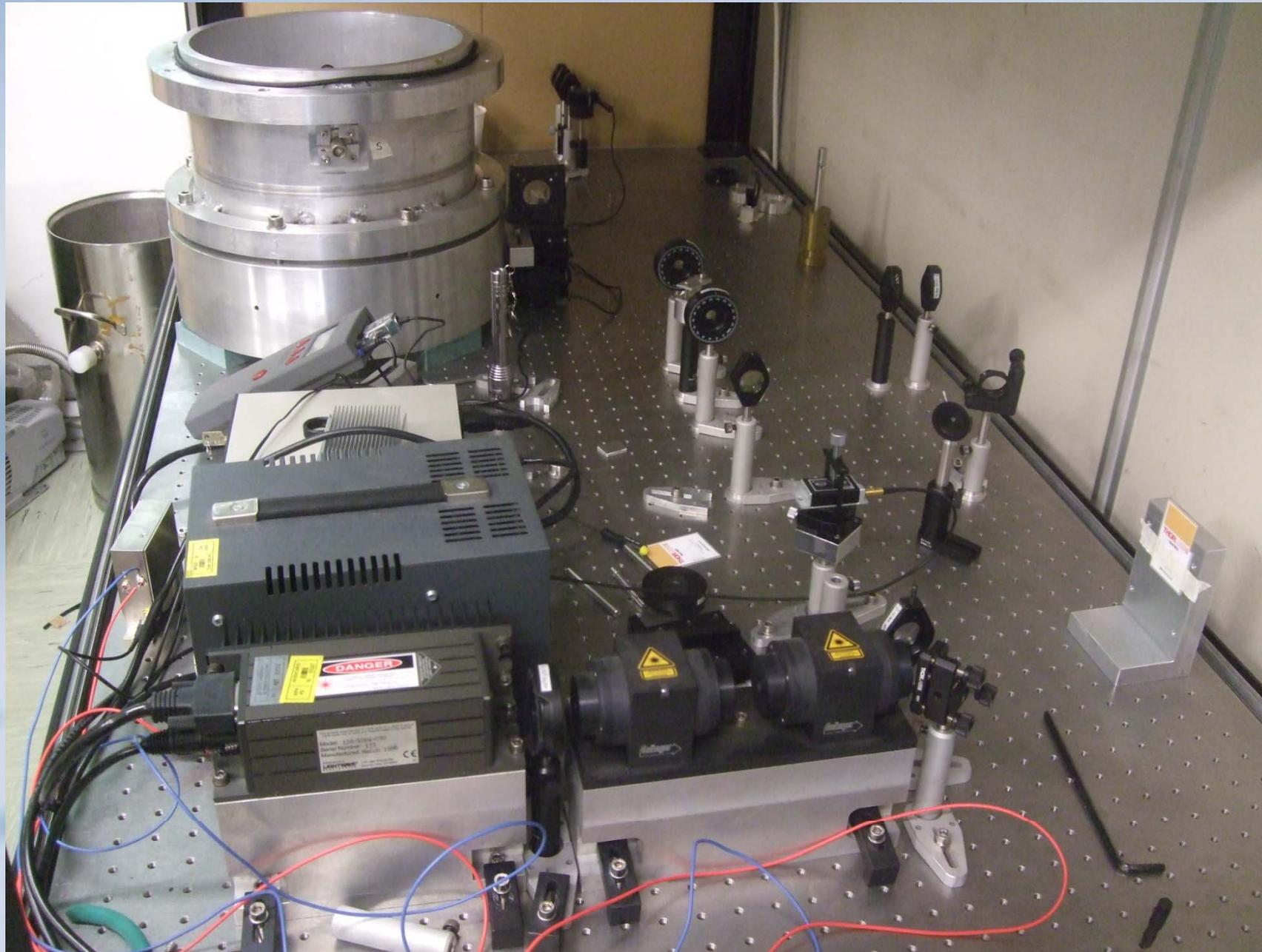
Research

3月までにやったこと: 常温実験の準備 (もっぱら図面書きと物の発注...)

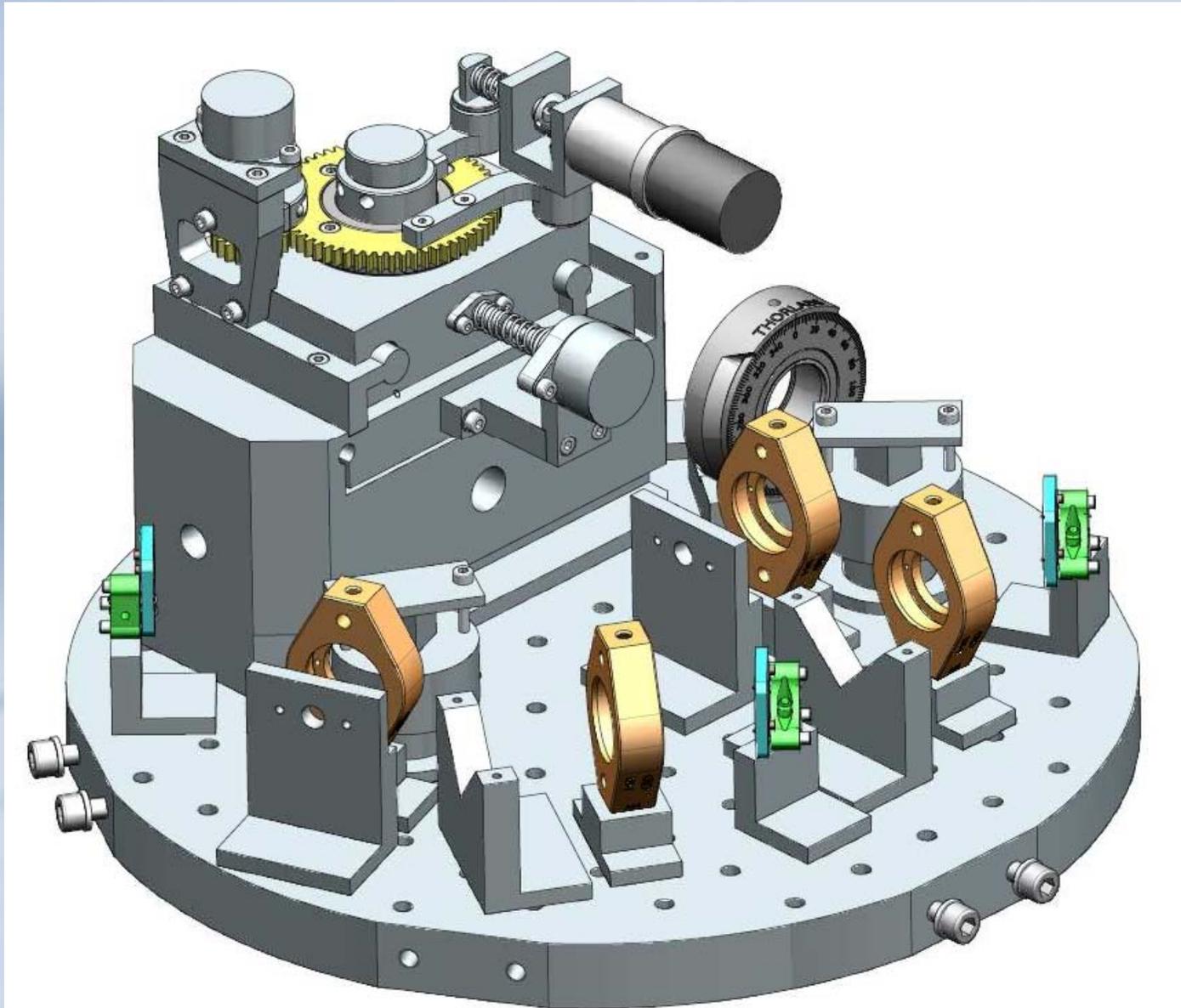
学生来る(7月から半年、さらにもう一人が10月から半年)

Membrane: Norcadaから購入済み。Trentoで制作中 (厚さ500 nm, 1000 nm)。

Experimental setup ...



In vacuum (under construction) ...



4. 副業的なこと

1. 本を書く
2. Einstein Telescope関連
3. その他熱雑音関連

1. 本を書く

2007/12/30: Gregg Harry (MIT)からメール

“Coating research workshopをするので出席しないか。”

**2008/3/20-21: Workshop of Optical Coatings
in Precision Measurement(Caltech)**

**重力波だけでなく、レーザー周波数安定化、量子実験などの
他分野からも**

<http://www.ligo.mit.edu/~gharry/workshop/workshop.html>

重力波研究交流会(2008/4/4)で報告

http://tamago.mtk.nao.ac.jp/gw_talks/080404/talk2/Yamamoto080404.pdf

1. 本を書く

2010/2/5: Gregg Harry からメール

“2年前のworkshopをもとにしてcoatingについて重力波に分野を限定しない本(Cambridge University Press)を出すことになった。Kenji NumataとCryogenicの章を書いてくれないか。”

数え切れぬKenji and Greggとのメールのやりとり
2回のskype打ち合わせ (with Kenji)

低温での熱雑音、冷凍技術、
具体例（重力波検出器（CLIO,LCGT,ET）、
レーザー周波数安定化、量子実験）

1. 本を書く

2011/3/18: Final dead line

2011/5/28: Gregg at Roma Fiumicino Aeroporto

“**2012年1月出版予定**”

“*Optical Coatings and Thermal Noise
in Precision Measurements*”,
ed. by Gregory Harry, Riccardo Desalvo,
and Timothy Bodiya,
Cambridge University Press, in press.

1. 本を書く 目次から

14	Gravitational Wave Detection	<i>D. J. Ottaway and S. D. Penn</i>	256
15	High-Precision Laser Stabilization via Optical Cavities	<i>M. J. Martin and J. Ye</i>	281
16	Quantum Optomechanics	<i>G. D. Cole and M. Aspelmeyer</i>	308
17	Cavity Quantum Electrodynamics	<i>T. E. Northup</i>	335
			354

1. 本を書く 目次から

10	Absorption and Thermal Issues	<i>P. Willems, D. Ottaway, and P. Beyersdorf</i>	172
11	Optical Scatter	<i>J. R. Smith and M. E. Zucker</i>	194
12	Reflectivity and Thickness Optimization	<i>I. M. Pinto, M. Principe, R. DeSalvo</i>	206
13	Beam Shaping	<i>A. Freise</i>	233

1. 本を書く 目次から

1	Theory of Thermal Noise in Optical Mirrors	<i>Y. Levin</i>	1
2	Coating Technology	<i>S. Chao</i>	7
3	Compendium of Thermal Noises in Optical Mirrors	<i>V. B. Braginsky, M. L. Gorodetsky, S. P. Vyatchanin</i>	24
4	Coating Thermal Noise	<i>I. Martin and S. Reid</i>	37
5	Direct Measurements of Coating Thermal Noise	<i>K. Numata</i>	66
6	Methods of Improving Thermal Noise	<i>S. Ballmer and K. Somiya</i>	87
7	Substrate Thermal Noise	<i>S. Rowan and I. Martin</i>	111
8	Cryogenics	<i>K. Numata and K. Yamamoto</i>	129
9	Thermo-optic Noise	<i>M. Evans and G. Ogin</i>	154

1. 本を書く

面白くて勉強になる

(特に若手にとって)本です。

各自一冊

買ってください。

1. 本を書く

Cryogenicsという章が存在するのは
日本の重力波グループの努力のためのものである。

謝辞：新富、鈴木（敏）、内山
CLIOの図：内山

2. Einstein Telescope 関連

Einstein Telescope

Third generation project in **Europe**

10 times better sensitivity than that of LCGT

Underground

Triangle interferometers with **10 km baselines**

Xylophone(Low and High Frequency)

Cryogenic(Low frequency)

One of the most important seven future astroparticle physics projects in Europe (<http://www.aspera-eu.org/>)

2018 : Construction of facility starts ?

2026 : Observation ?

2. Einstein Telescope 関連

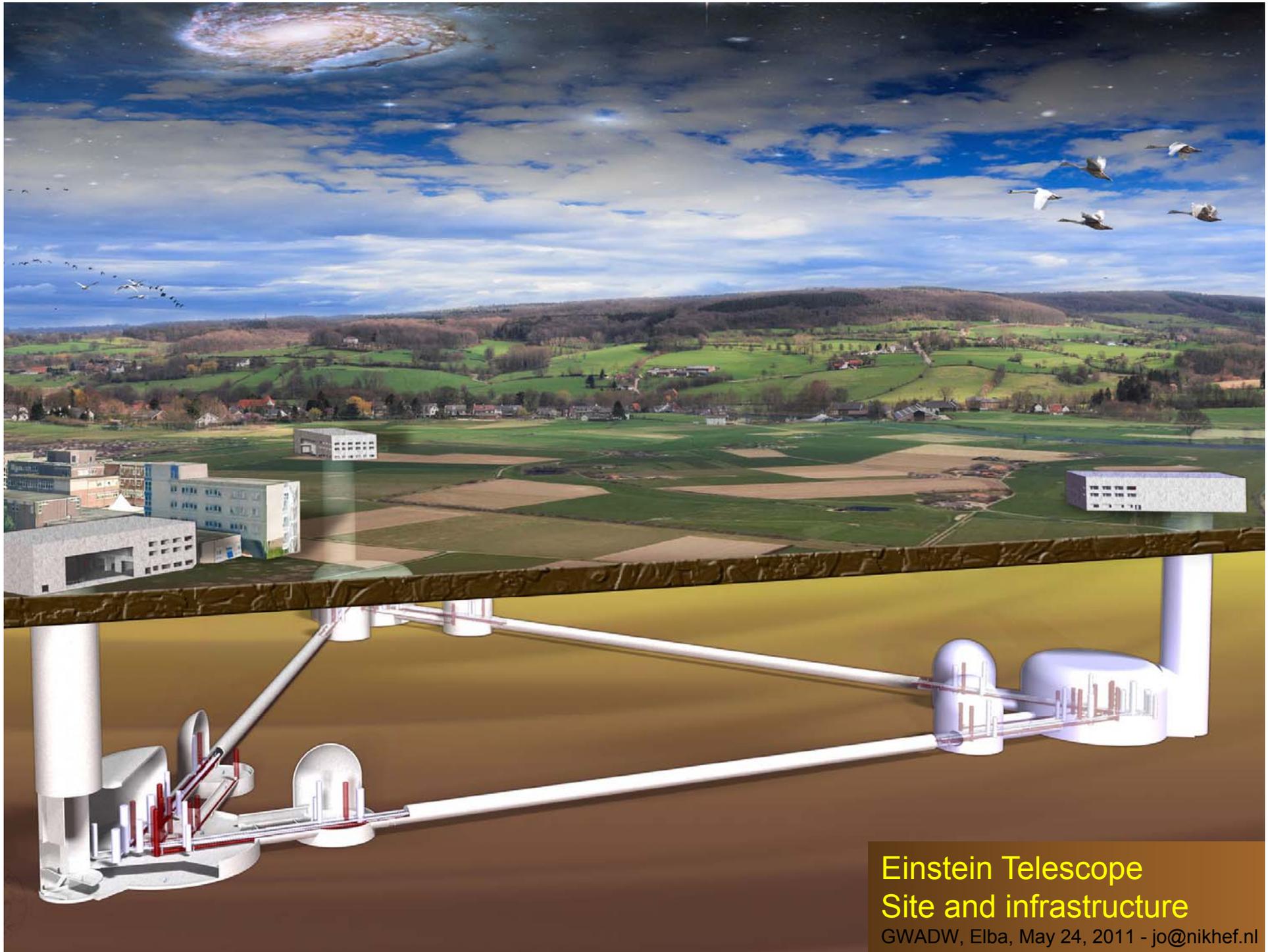
Design study (3 years from 2008 May)

Design study report has already been written !

ET session in GWADW (2011 May 24)

<http://agenda.infn.it/sessionDisplay.py?sessionId=8&slotId=0&confId=3351#2011-05-24>

<http://www.et-gw.eu/>

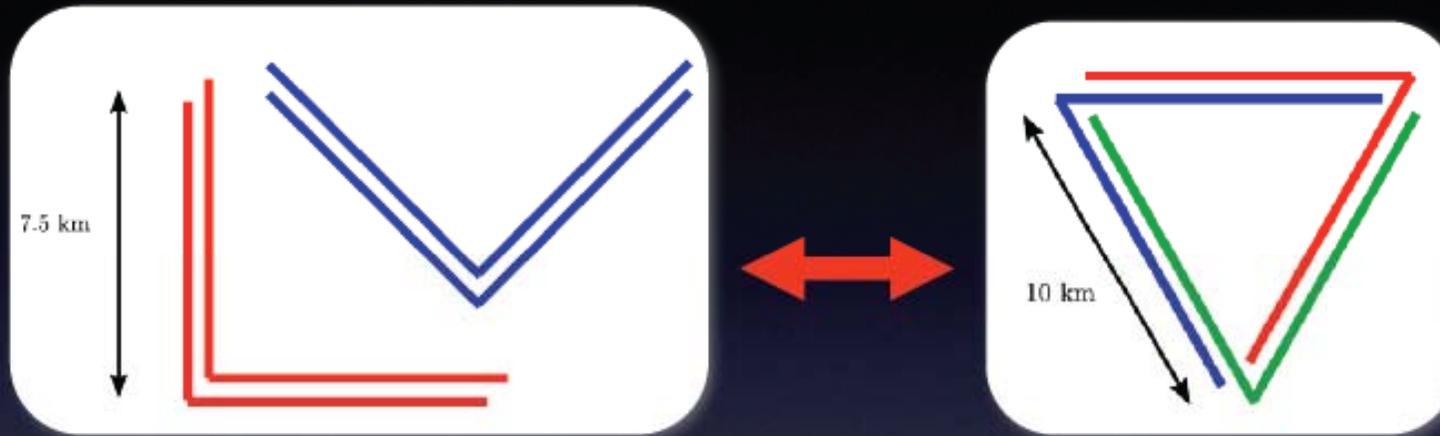


Einstein Telescope Site and infrastructure

GWADW, Elba, May 24, 2011 - jo@nikhef.nl



Multiple Interferometers



- The L-shape provides the **best form** for a differential measurement of quadrupole waves
- Two parallel interferometers provide **redundancy** (nullstream creation, operation during maintenance and upgrades)
- Two interferometers under 45 degrees can resolve **both polarisations**

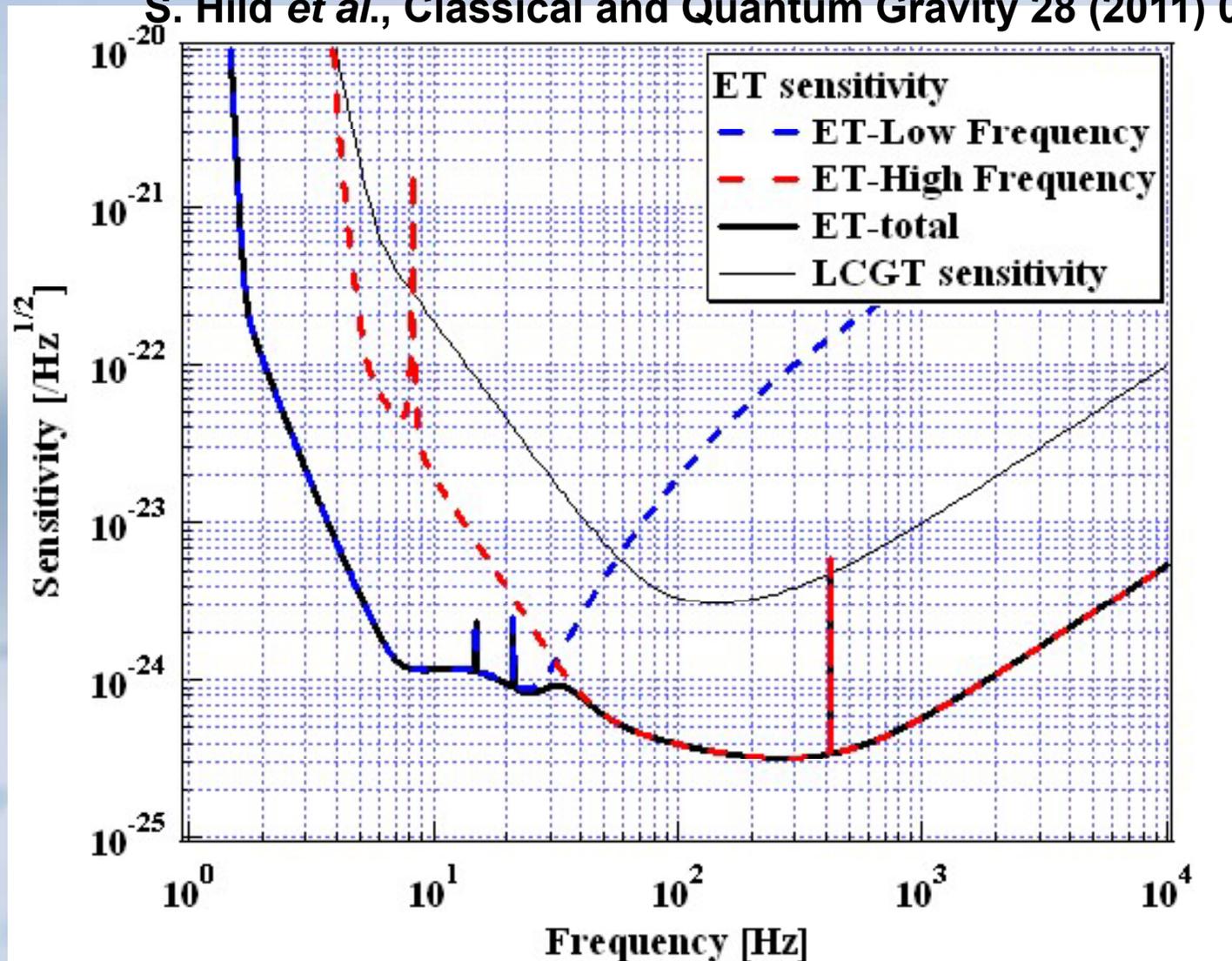
[A. Freise et. al.: Triple Michelson interferometer for a third-generation gravitational wave detector, Classical and Quantum Gravity, 2009, 26]

A Freise, GWADW Elba

24/05/2011

2. Einstein Telescope 関連

S. Hild *et al.*, Classical and Quantum Gravity 28 (2011) 094013.



2. Einstein Telescope 関連

何をしたか？

- (1) Parametric instability
- (2) Substrate thermoelastic noise and thermo-optic noise

(1) Parametric instability

鏡の弾性振動モードとcavityの光学モードの相互励起

Advanced LIGOとAdvanced Virgoで深刻な問題

ETではどうか？

2. Einstein Telescope 関連

(1) Parametric instability

2009/1/9 Andreas Freiseに

”もし誰も parametric instability について ET WP3 (interferometer configuration, 09/1/20) 会議で話さないなら話そうか？”

(1) ET workshop 2009 で発表

(2) **ET design study report** を執筆 (Daniel Heinert (Jena), Sergey Strigin (Moscow) と一緒に)

ET-Low Frequency: **問題なし** (Low laser power)

ET-High Frequency: unstable mode の数は Advanced LIGO, Advanced Virgo より多い (鏡が大きいため)。**対策必要。**

2. Einstein Telescope 関連

(2) Substrate thermoelastic noise and thermo-optic noise

どちらも熱雑音の一種。
熱流による散逸が原因。

Substrate thermoelastic noise : Heat flow in substrate

Thermo-optic noise : Heat flow

between substrate and coating

原理的には運動方程式と熱伝導方程式から計算することができる。

従来の式によるとパワースペクトルは低周波で発散。
何か妙。

2. Einstein Telescope 関連

(2) Substrate thermoelastic noise and thermo-optic noise

境界条件、仮定が適切でなかった。

きちんと考えると発散は消える。

Substrate thermoelastic noise :

無限大でなく有限の鏡を考えなければならない。

(Kenji Numataと計算)

Thermo-optic noise : **光軸方向だけでなく、それと垂直方向の熱拡散を考慮する必要がある。**

(Enrico Serra(Trento)計算中)

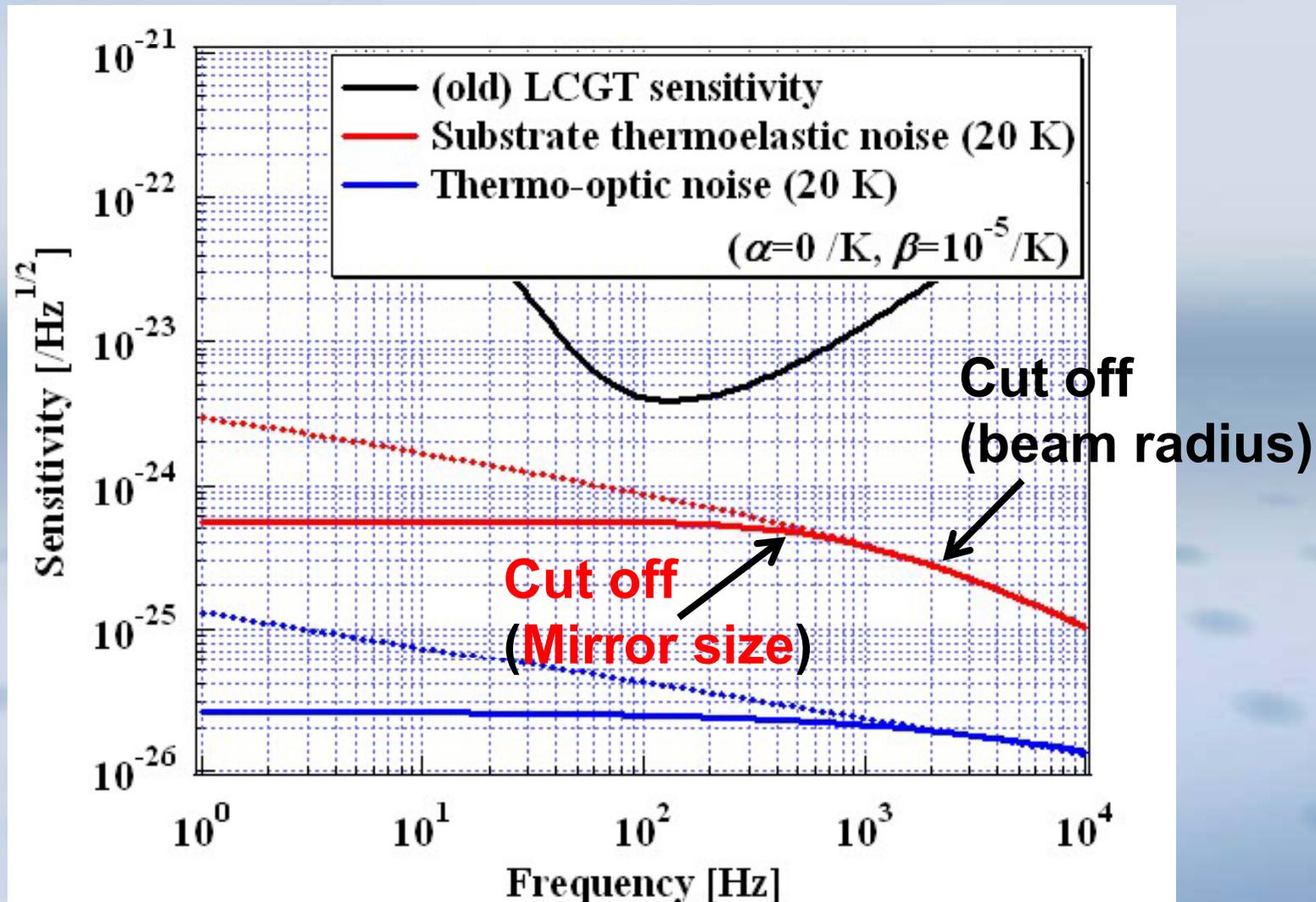
E. Serra and M. Bonaldi, International Journal for Numerical Methods in Engineering 78 (2009) 691.

低温、低周波でパワースペクトルが**従来の式と変わってくる。**

LCGT,ETではどうなるのか？

ET workshop 2010で発表。

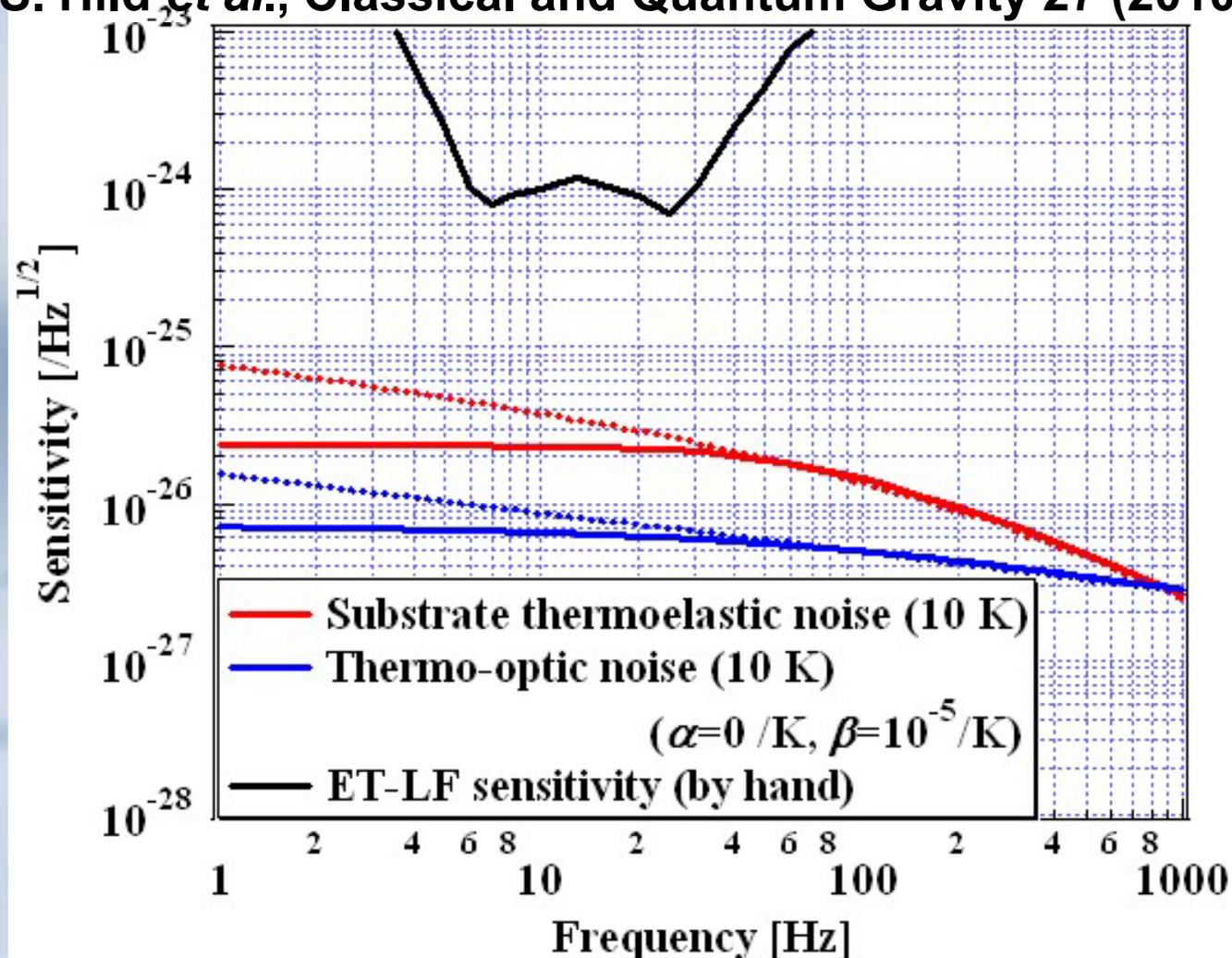
(2) Substrate thermoelastic noise and thermo-optic noise In the case of LCGT (Sapphire 20 K) ...



(2) Substrate thermoelastic noise and thermo-optic noise

In the case of ET-LF (Silicon 10 K) ...

S. Hild *et al.*, *Classical and Quantum Gravity* 27 (2010) 015003.



2. Einstein Telescope 関連

Annual workshops

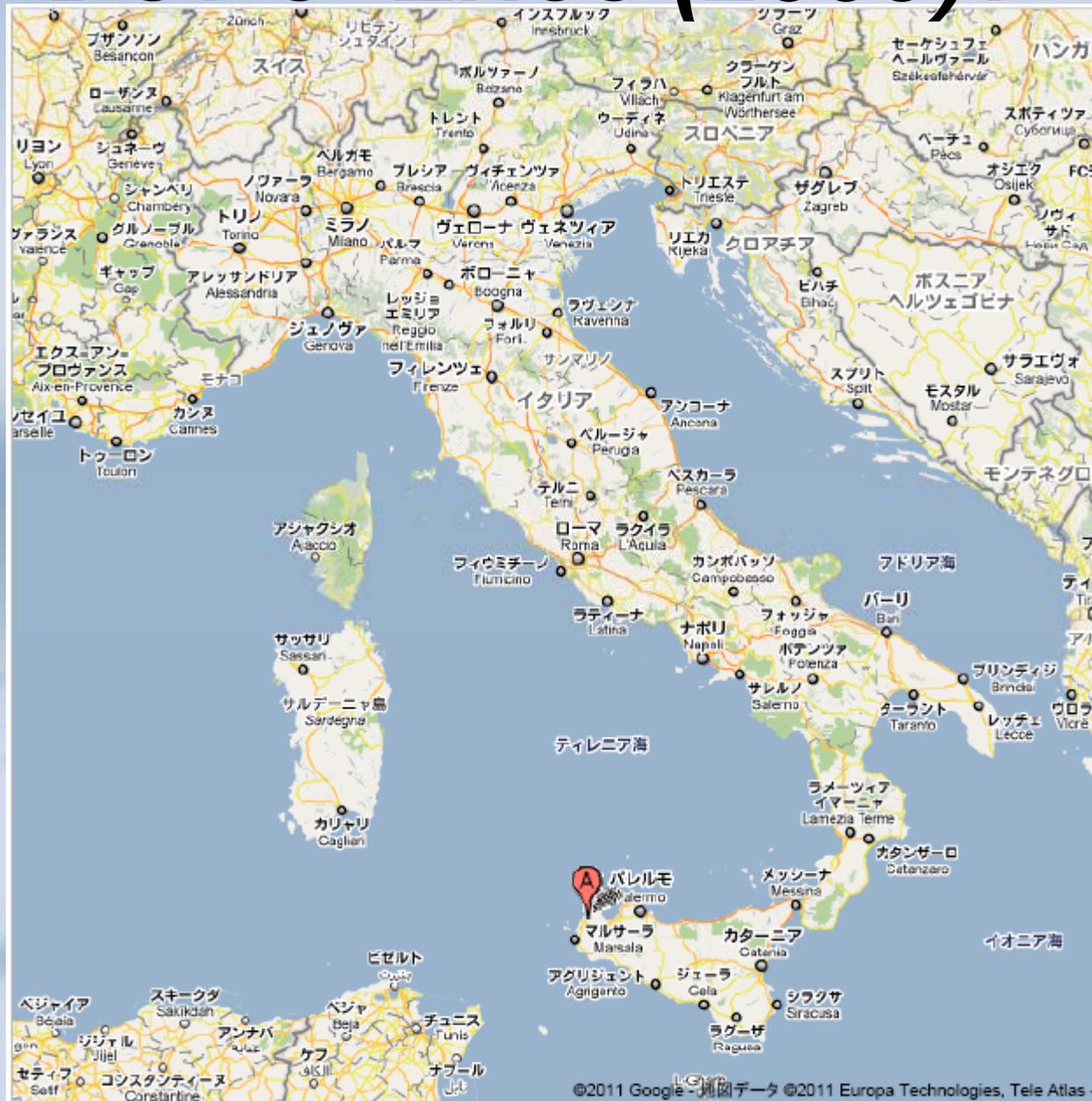
Cascina (Italy), November, **2008**

Erice, Sicily (Italy), October, **2009**

Budapest (Hungary), November, **2010**

<http://www.et-gw.eu/>

Dov'e Erice (2009)?



Erice



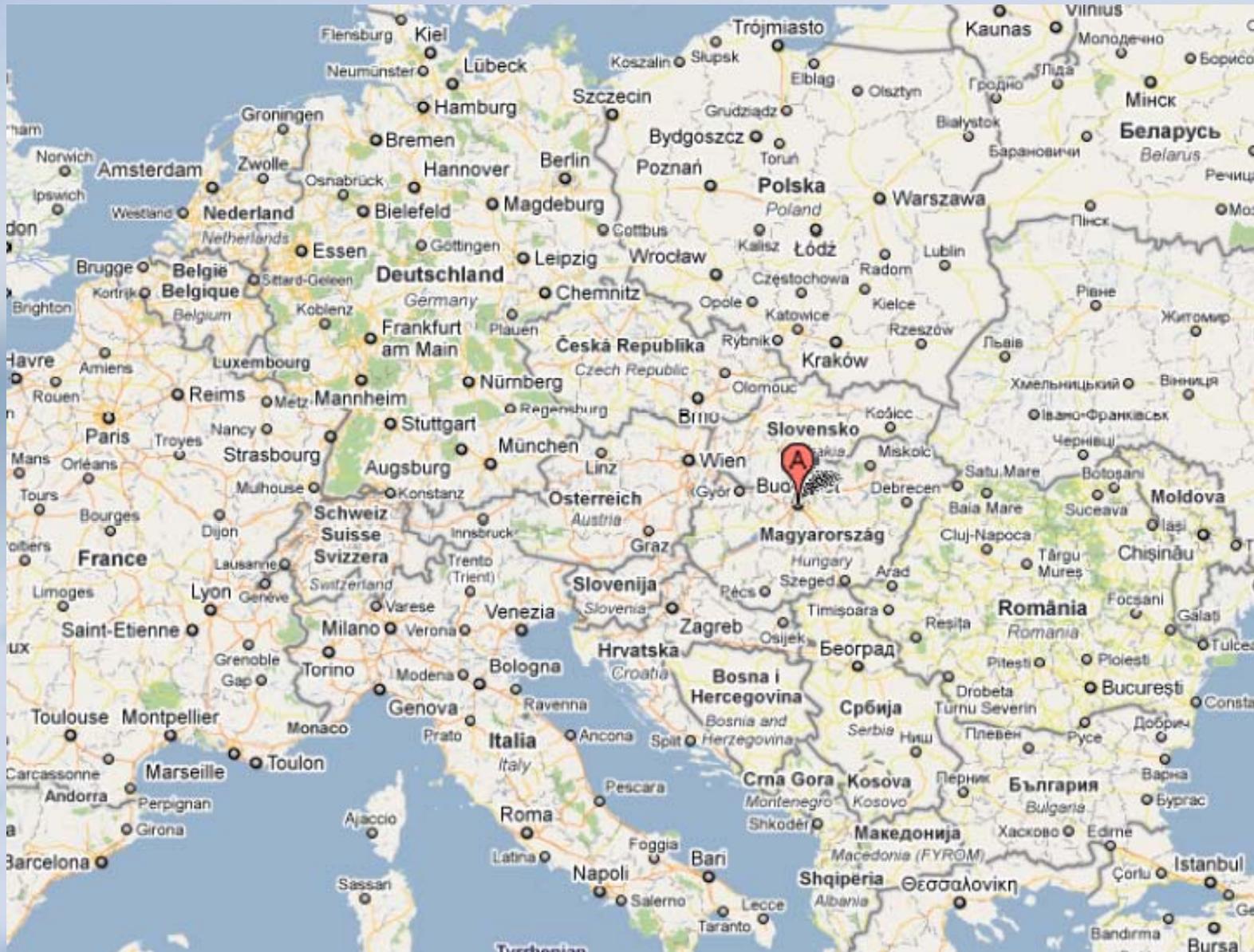
Conference Hall



View from coffee break room



Where is Budapest (2010)?



Budapest



Hungarian Academy of Sciences



Hungarian Academy of Sciences



3. その他熱雑音関連

- (1) “Coating thermal noise of
a finite-size cylindrical mirror”
K. Somiya and K. Yamamoto,
Physical Review D 79 (2009) 102004.
Light (**thin**) **mirrors** for **quantum measurement**
Thickness dependence of mirror thermal noise
- (2) “Thermo-refractive noise of finite-sized cylindrical test
masses”
D. Heinert, A. G. Gurkovsky, R. Nawrodt,
S. P. Vyatchanin, and K. Yamamoto
Submitted (Physical Review D)
Substrate thermo-refractive noise of **cryogenic**
interferometer (CLIO, LCGT, ET)

5. 外国での研究職を得るには

Personal lessons learn

固有名詞は排除

Regularな方法とirregularな方法

Regularな方法

公募に挑戦

何を見れば公募を知ることができるか？

日本の重力波関連のmailing list

Institute of Physicsによる求人web

<http://brightrecruits.com/tiptop/>

5. 外国での研究職を得るには

Irregularな方法

(おそらく) ポスドクのみが可能な手法 (若さ勝負?)

公募してなくてもとにかく聞く

覚悟すべき点：断られることがある (かなり痛い)。

波及効果：求職中ということが知られるようになる。

他のチャンスを紹介、仲介してくれるかもしれない。

うまくいくための (おそらく) 必要条件

(1) 知り合いである。

(2) 仲介者がいる (仲介の仲介の…は厳しい)

一言で言うと**コネ**

5. 外国での研究職を得るには

Irregularな方法

知り合いをつくるには？（もしくは仲介してもらうためには）

- (1) 国際学会に出て（良い）発表をする。
- (2) 国際学会に出て個人的にdiscussionをする。
- (3) （良い）論文を書く。

Irregularな方法を突破するために必要な努力は極めて
regularなもの

6. Summary

- (1)日本では得られない経験をする事ができた。
但しそれが糧になっているのかと言われると…
- (2)何か後ろめたさ。もっとよい成果は出せなかったのか？
- (3)英語が上手くなったのかと言われるとそんな気はしない。
ドイツ語は多少ましに。イタリア語は???
- (4)海外に知り合いは増えた。特にヨーロッパ。
- (5)国際会議で平気で質問できるようになった。
図々しくなっただけ？
- (6)生活自体は楽しめました。 続く？

Vielen Dank fuer Ihre Aufmerksamkeit !

Vi ringrazio molto per la vostra attenzione !

ご静聴ありがとうございました。

あちこち旅行しました。

ドイツ:かなりの部分

イタリア:Pisa以北のかなりの部分

その他:デンマーク、オランダ、ベルギー、
ルクセンブルグ、フランス、スイス、
オーストリア、チェコ、サンマリノ、イギリス、
ハンガリー

Pergamonmuseum (Berlin)



Deutsches Museum (Muenchen)



Deutsches Museum (Muenchen)



Hideki Yukawa

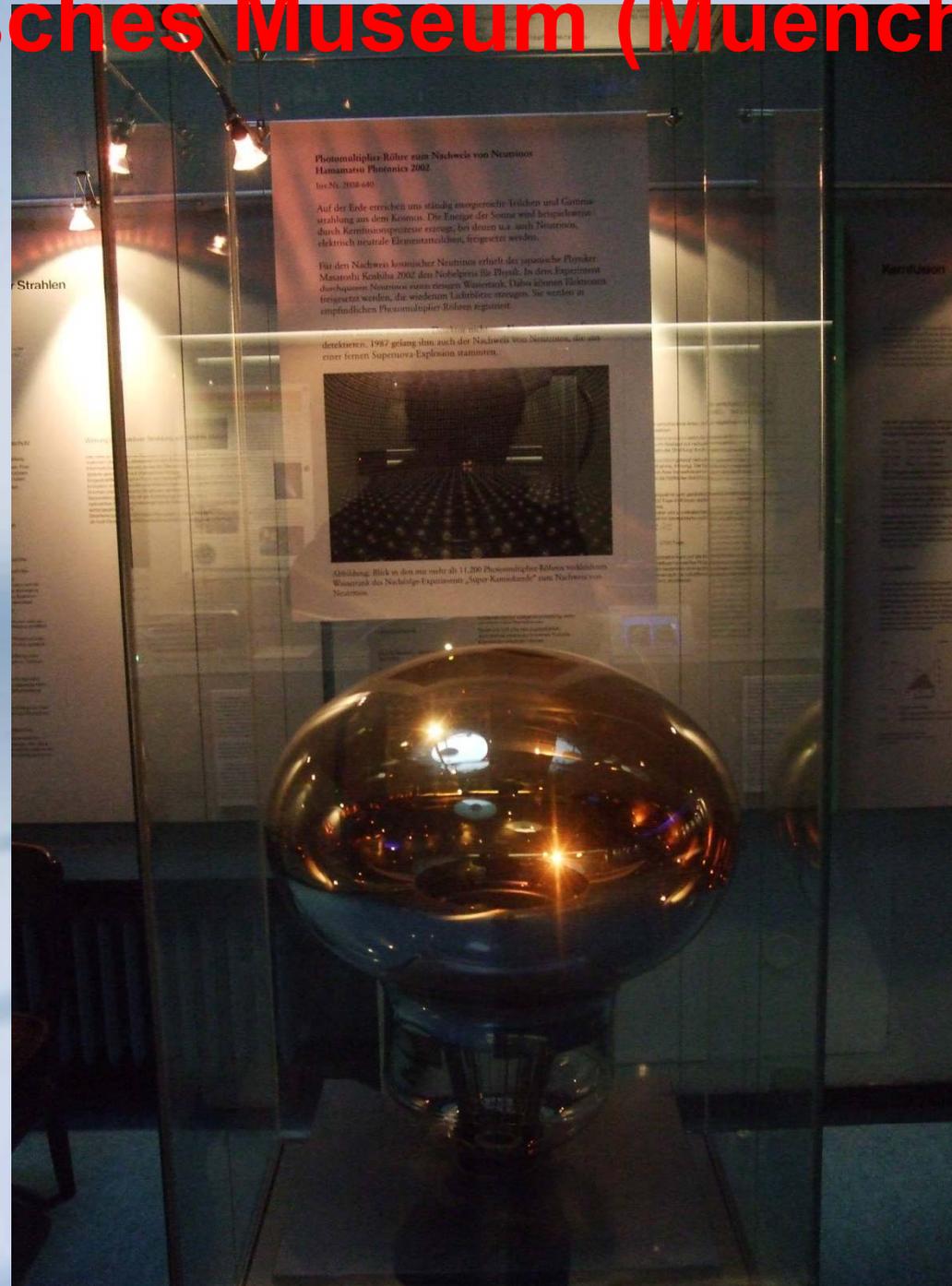
geb. 22. Januar 1907 in Tokio

Hideki Yukawa wuchs, wie er in seiner Autobiographie schreibt, in »einer Welt der Bücher« auf. Obwohl er, angeregt durch seinen Vater, Geologie studieren wollte, wandte er sich schließlich der Physik zu. Sein spezielles Interesse galt der Quantenmechanik.

Von 1932 bis 1939 lehrte er als Dozent an den Universitäten Kyoto und Osaka. 1939 wurde er Professor für theoretische Physik und übernahm 1953 die Leitung des neugeschaffenen Research Institute for Fundamental Physics. In den Jahren 1933 bis 1935 veröffentlichte er eine Theorie über Kern-elektronen und stellte eine Wellengleichung für die Kernkräfte auf. Seine Beiträge zur Quantentheorie wurden unter anderem durch Vorträge von A. Sommerfeld, W. Heisenberg und P. Dirac beeinflusst.

H. Yukawa erhielt 1949 den Nobelpreis für Physik.

Deutsches Museum (Muenchen)



Rhein (Deutschland)



Rhein (Deutschland)



Lago di Garda (Italia)



Venezia



Venezia



Venezia



Train (ICE) from Denmark to Germany



Amsterdam, Netherlands



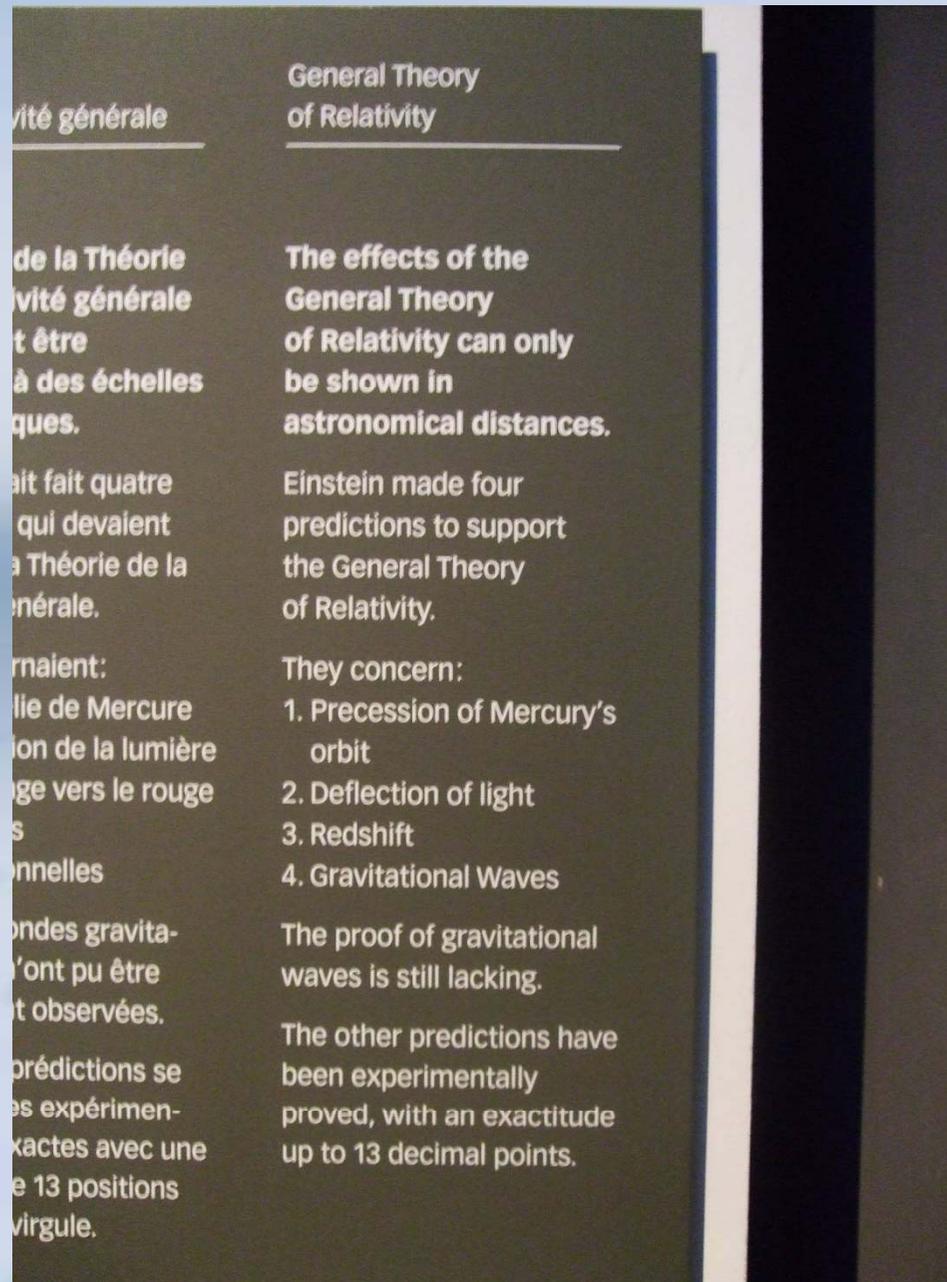
Bruges, Belgium



Mont Saint-Michel, France



Einstein Museum, Bern, Schweiz



ATLAS, CERN, Geneva, Switzerland



Schloss Schoenbrunn, Wien, Oestereich



Prague, Czech



San Marino



Edinburgh Castle, United Kingdom



Budapest



Hungarian Academy of Sciences



Hungarian Academy of Sciences



Hungarian Academy of Sciences

