



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE INDUSTRIA, COMERCIO
Y TURISMO

QuantumPascal: Propuestas límite y fundamentación cuántica

¹E. Bernabeu, ²S. Moltó, ³M.A. Sáenz-Nuño, ^{1,4}T. Belenguer,
²M.C. García-Izquierdo, ²M.N. Medina, ²M.D. del Campo

¹Universidad Complutense de Madrid

²Centro Español de Metrología

³Instituto de Investigación Tecnológica, Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI), Universidad Pontificia Comillas.

⁴Laboratorio de Investigación Espacial (LINES), INTA



¿Qué es el QuantumPascal?

$$P = \frac{F}{A}$$



<https://la.flukecal.com>

Métodos Mecánicos

En el proyecto EMPIR 18SIB04 QuantumPascal se realiza una investigación sobre métodos de medidas primarios de presión.

Nuevo SI: $u(k_B = 0)$

Nuevo SI: $u(N_A = 0)$

$$P = \rho N_A k_B T$$
$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = A_R \rho$$

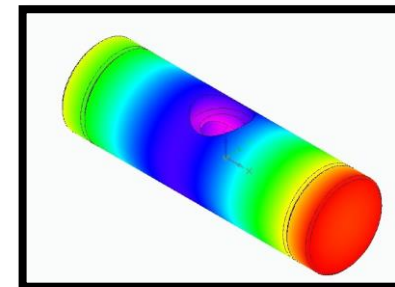
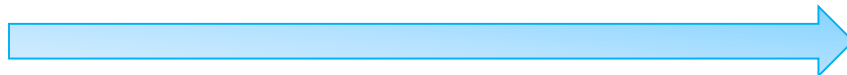


<https://doi.org/10.1116/1.5022244>.

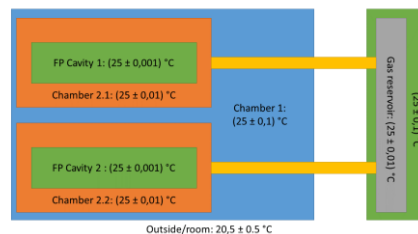
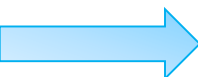
Métodos basados en densidad de gases

Retos Tecnológicos

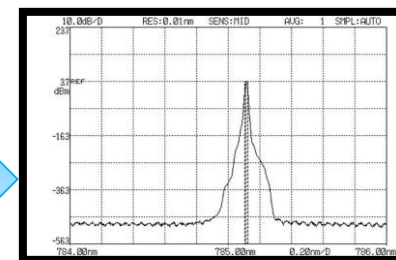
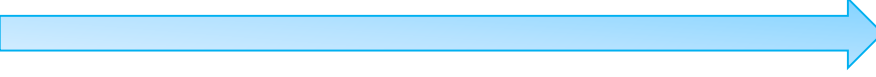
Deformación mínima de las cavidades ópticas



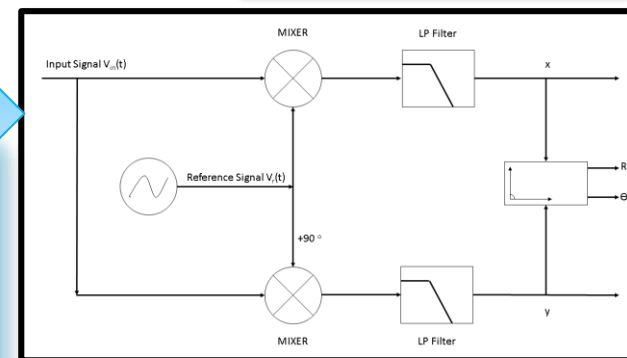
Estabilidad térmica de las cavidades ópticas próxima a 1 mK



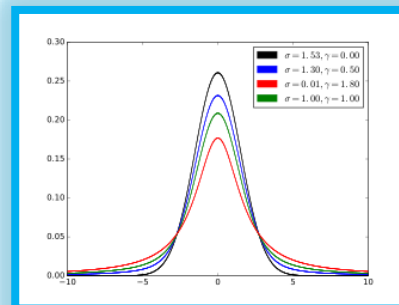
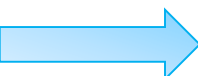
Estabilidad y control de la fuente de luz



Electrónica de modulación de la señal óptica



Tratamiento de datos por deconvolución





Deformación Mínima

Análisis mecánico mediante el método de elementos finitos (FEM). Dos variables principales:

Geometría

- Cúbica.
- Cilíndrica.
- Semicilíndrica.
- 1 espaciador con 2 cavidades.
- 2 espaciadores con 1 cavidad.
- Número de conexiones con el sistema de vacío.

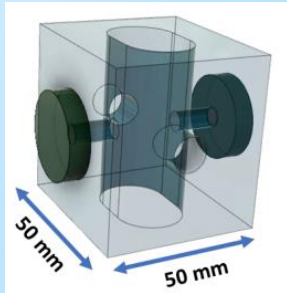
Materiales

- INVAR.
- Zerodur
- Ultra Low Expansion Glass
- ClearCeram
- NEXCERA

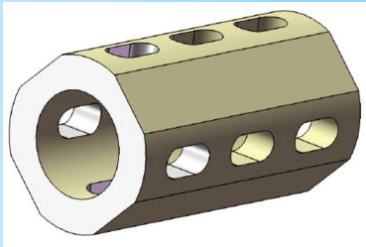


Geometría del Espaciador

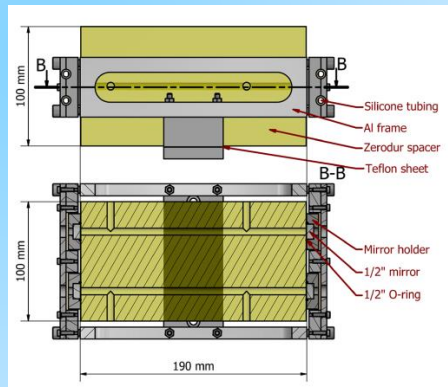
Otros NMIs



Z. Silvestri, D. Bentouati, and P. Otal, doi: 10.21014/acta_imeko.v9i5 .989.

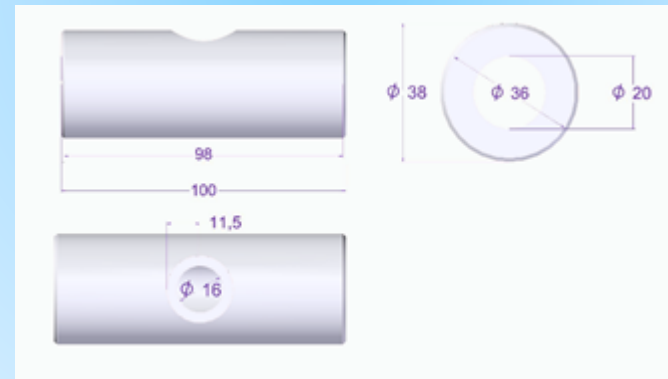


J. Zakrisson et al, doi: 10.21014/acta_imeko.v9 i5.985.



I. Silander, T. Hausmaninger, M. Zelan, and O. Axner, doi: 10.1116/1.5022244.

CEM





Geometría del Espaciador

Comparación de la deformación relativa normalizada en presión simulada para diferentes cavidades Fabry-Perot hechas de Zerodur.

NMI	$\frac{\Delta L}{L} \left(10^{-12} \text{ Pa}^{-1} \right)$	$u \left(\frac{\Delta L}{L} \left(10^{-12} \text{ Pa}^{-1} \right) \right)$	Referencia
CEM	-5,7585840	0,0000047	S. Moltó, M.A. Sáenz-Nuño, E. Bernabeu, M.N. Medina. Aceptada para Publicación 2022.*
LCM LNE/CNAM	-6,581	--	Z. Silvestri, D. Bentouati, and P. Otal, doi: 10.21014/acta_imeko.v9i5.989.
INRiM	-6,3902	0,00015	J. Zakrisson et al, doi: 10.21014/acta_imeko.v9i5.985.

*Uncertainty in mechanical deformation of a Fabry-Perot cavity due to pressure: towards best mechanical configuration.



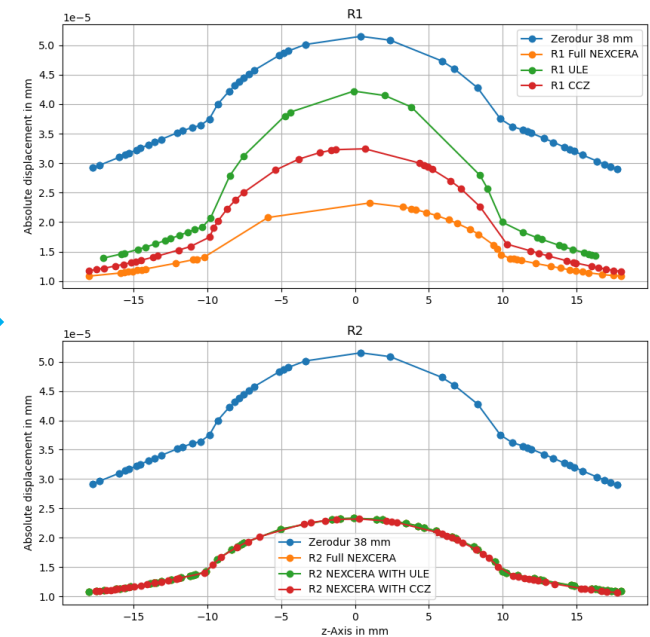
Material del Espaciador y Espejos

- Sobre el papel NEXCERA CD107 y CCZ regular son cerámicas más resistentes que el Zerodur o el INVAR.
- Se simuló la deformación de los espejos con vacío dentro de la cavidad y presión atmosférica fuera.

4 configuraciones simuladas:

- Dos espejos de Zerodur.
- Todo NEXCERA
- Un espejo de ULE y otro de NEXCERA
- Un espejo de CCZ y otro de NEXCERA

SIMULACIONES HECHAS CON ESPEJOS PLANOS

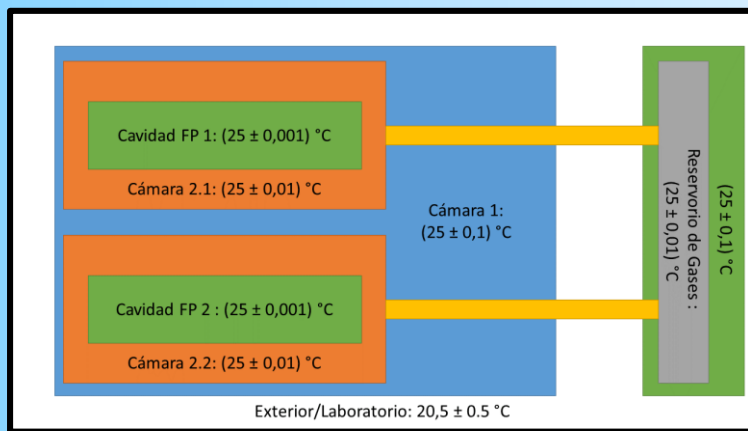




Sistema de Estabilización Térmica

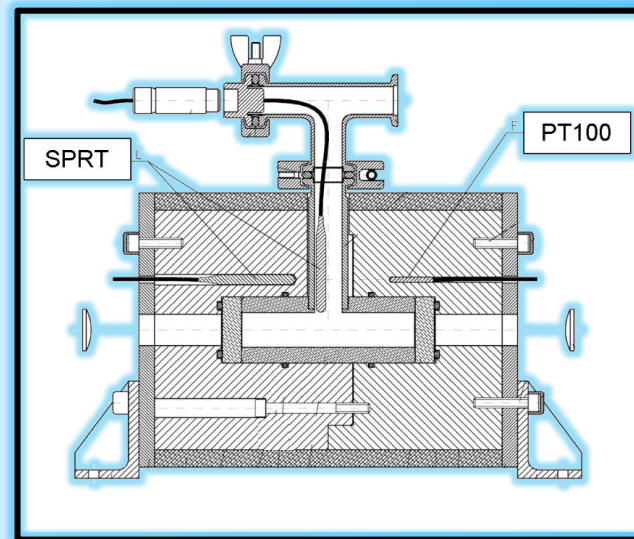
Sistema de Control Térmico

- Control de temperatura de FP conformado por 3 etapas de control.
- Ecuador de gases.



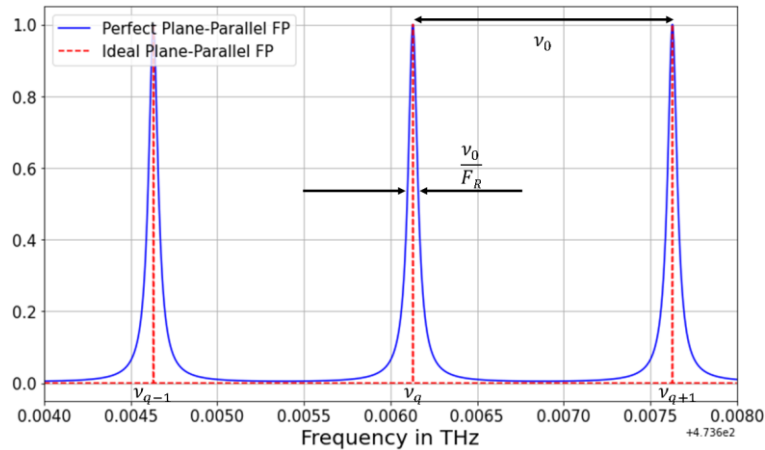
Regulación y Medida

- $U(T) = 3 \text{ mK}$.
- 2 sondas Pt-25.

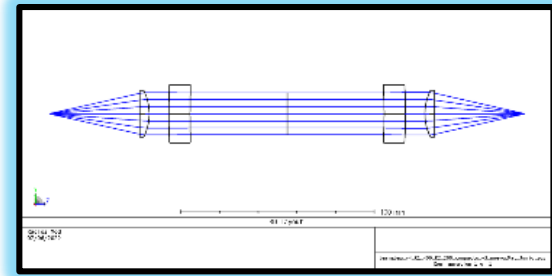




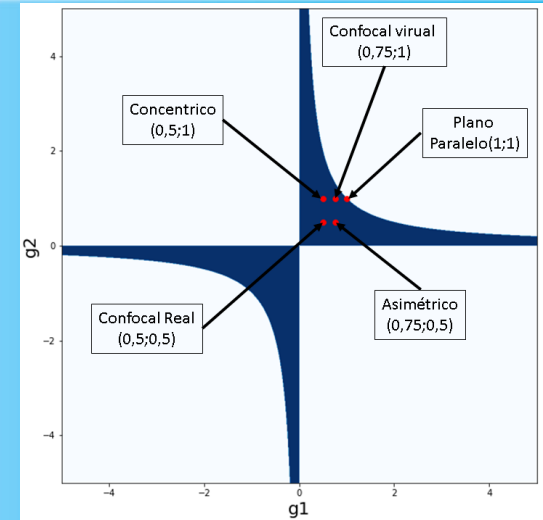
Configuración Óptica



$$\frac{1}{F^2} = \frac{1}{F_R^2} + \frac{1}{F_{ab}^2} + \frac{1}{F_\theta^2} + \frac{1}{F_{ds}^2} + \dots$$



Configuración	Parámetros Equivalencia					
	Nº tramos L	F. Reflexión	m _{st}	F _R	γ _q (MHz)	δγ(kHz)
Confocal Real	6	98,21 %	> 80	174	500	13.158
Concéntrico	8	98,80 %	> 96	260	375	7.979
Confocal Virtual	12	98,21 %	> 130	174	250	4.808
Asimétrico R1/R2 = 2	20	95,12 %	> 230	>63	150	2.632





Lorentz-Lorenz generalizada para átomos y moléculas

Lorentz-Lorenz Clásica

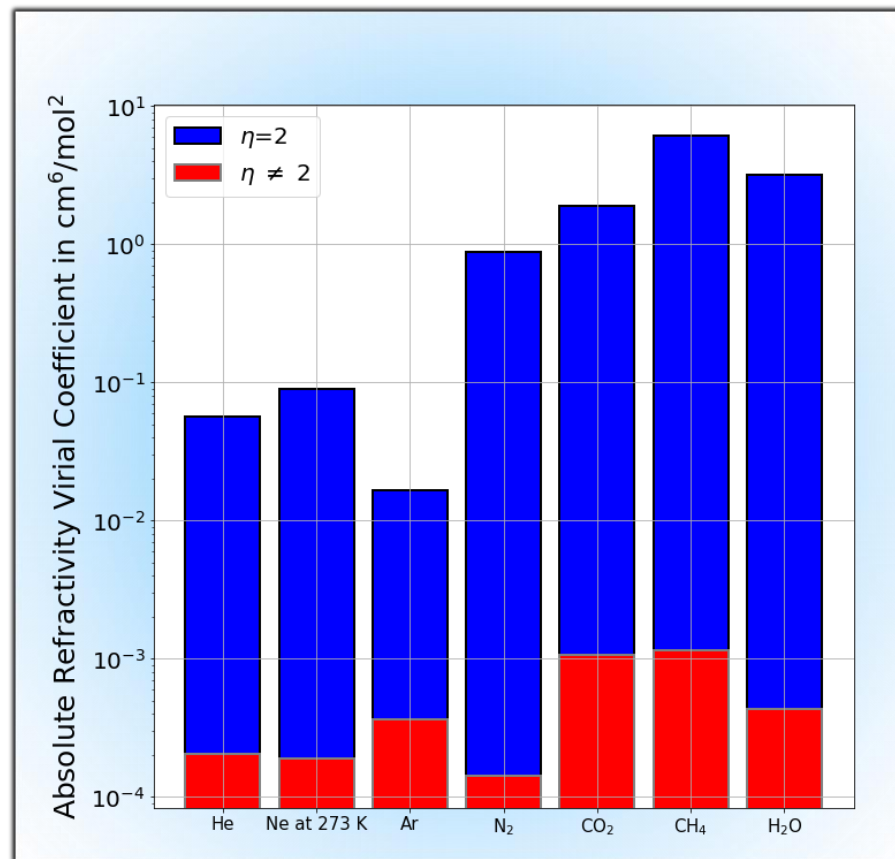
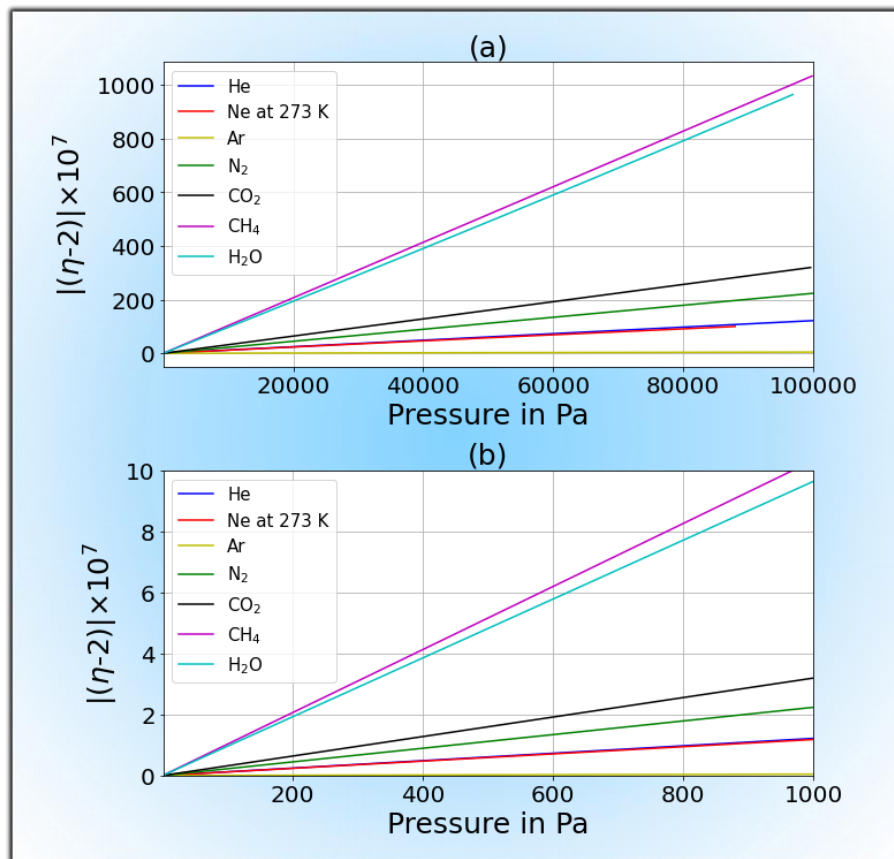
- Moléculas son pequeñas esferas conductoras.
- Separadas a una distancia mucho mayor que su diámetro.
- Se usa el desarrollo del virial para compensar las idealidades.
- $$\frac{n^2-1}{n^2+2} = \frac{N\alpha}{3\epsilon_0} = A_R\rho$$

Lorentz-Lorenz Generalizada

- Moléculas no se consideran pequeñas esferas conductoras.
- Se tienen en cuenta efectos de compresión reflejado en el parámetro η .
- $$\frac{n^2-1}{n^2+\eta} = \frac{N\alpha}{3\epsilon_0} = A_R\rho$$



Lorentz-Lorenz generalizada para átomos y moléculas





Factor de Forma (r)

$$\frac{\eta^2 - 1}{3(n^2 \epsilon_0 r - \epsilon_0 r + 1)} = A_R \rho \Rightarrow r = \frac{1}{3\epsilon_0} \left(\frac{n^2 + \eta - 3}{n^2 - 1} \right)$$

GAS	r (F/m) $\times 10^{-10}$	$u(r)$ (F/m) $\times 10^{-16}$
He	2.976045	16
Ne at 273 K	3.428299	15
Ar	3.76826805	0.23
N ₂	3.93417082	0.14
CO ₂	3.92673783	0.08
CH ₄	4.29400680	0.09
H ₂ O	4.64084458	0.32
Ideal Molecule	3.76469689	--



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE INDUSTRIA, COMERCIO
Y TURISMO

MUCHAS GRACIAS





MUCHAS GRACIAS

Factor de Forma y 2º Coef. del Virial vr. Temperatura

