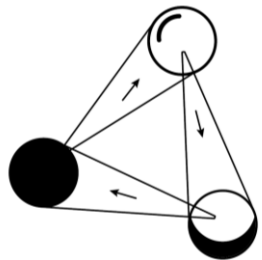


Detection of extremely weak signals at room temperature for radioastronomy and Earth observation applications



**MILLIMETER AND
SUBMILLIMETER TEAM**

Luis Enrique García Muñoz

**Full Professor
Universidad Carlos III de Madrid**

November 14th 2023

Motivación

Electro optic up-converter

Experiment

Sensitivity as radiometer

Conclusions

Consideraciones previas

Otra dificultad para nuestro *ahora*: ¡espacio y tiempo no son constantes! Nuestra velocidad en el tiempo está relacionada con nuestra velocidad en el espacio. Imaginemos nuestra esfera espaciotemporal así:



El límite del amarillo y el azul se mueve según nuestra velocidad.

Cuanto más deprisa se desplace un objeto en el espacio, más **se ralentiza en el tiempo**. En la esfera, la superficie amarilla aumenta; la azul disminuye:



Al ganar velocidad en el espacio, el piloto pierde en velocidad temporal. El tictac de su reloj se ralentiza...

... comparado con el tictac del reloj de Adam.

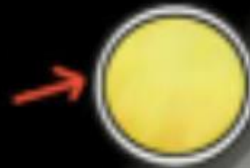


Consideraciones previas



Por el contrario, la luz se desplaza a la velocidad máxima. Siempre se aleja de nosotros a 300.000 kilómetros/segundo*, cualquiera que sea nuestra velocidad: está como fuera del tiempo.

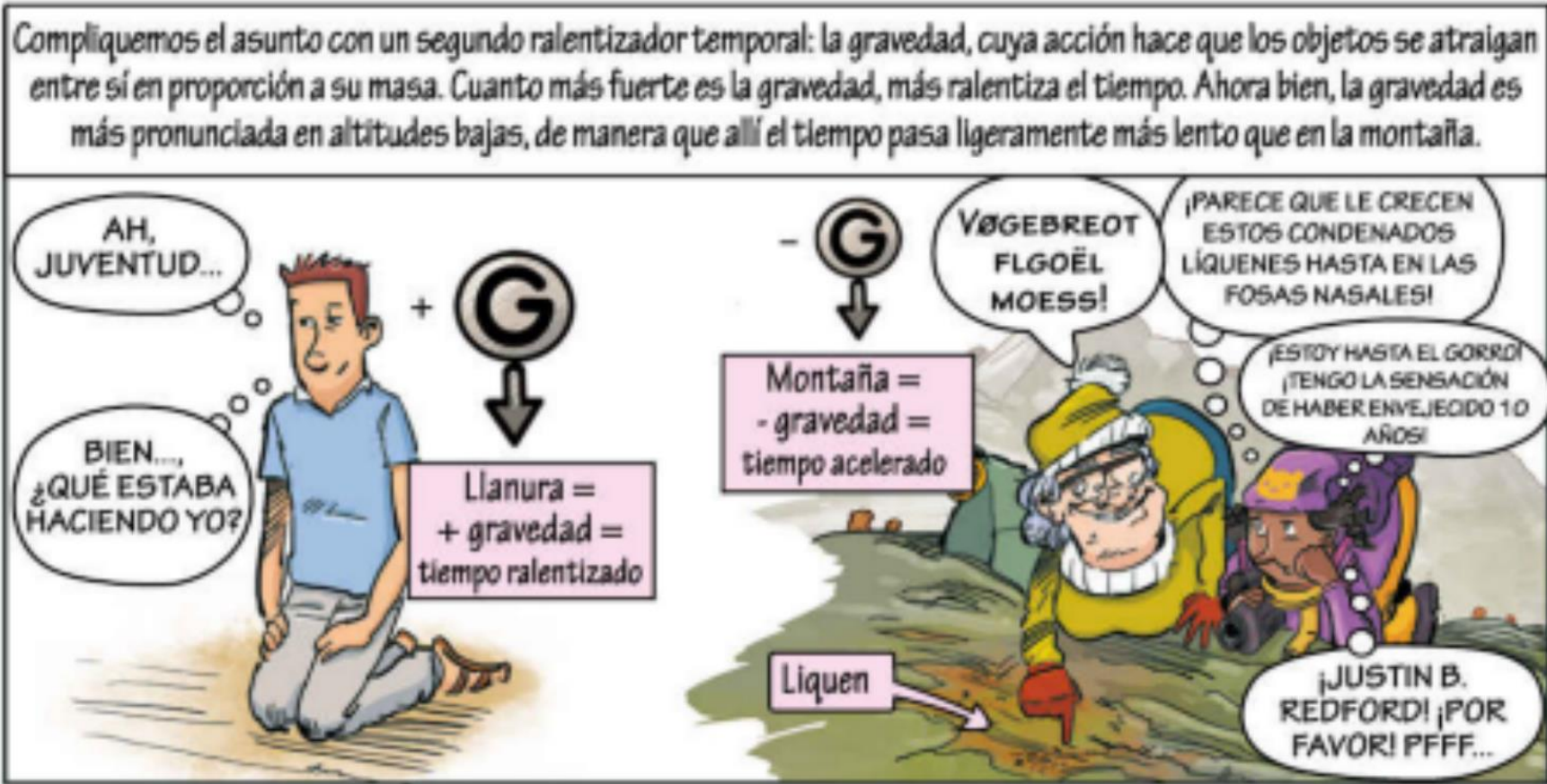
La luz solo se desplaza en «el espacio». ¡Para ella, el tiempo no pasa!



Los fotones transportan la luz. No tienen masa.

* Exactamente: 299.792,458 km/s.

Consideraciones previas



He aquí el problema (aparte de la ausencia de Justin B. Redford). En varios puntos del globo, todos concuerdan en un *ahora* a las 10 h 00 min y 00,0 segundos. Pero una medición más precisa señala el fin de la simultaneidad: en cada uno de esos lugares imperan condiciones distintas de gravedad y de velocidad de desplazamiento. Además, unas centésimas de segundo los separan debido a la velocidad de la luz.

Consideraciones previas

En resumen: el *ahora* de unos difiere en algunos nanosegundos con respecto al *ahora* de otros. Dado que nuestros sentidos son incapaces de percibir el mundo por debajo de alrededor de una décima de segundo, las 10 h 00 min 00,00 s UTC solo nos proporcionan la *ilusión* de un tiempo simultáneo en todos los lugares de la Tierra.



¿Es rápido un mosquito?



Visto así, sí.



Consideraciones previas



Consideraciones previas

Cualquier conversación telefónica (onda de radio), imagen (onda de luz visible) u otra onda electromagnética emitida en nuestro planeta también sale al cosmos. Esta onda tarda casi un segundo y medio en llegar a la Luna, nuestro «matorral cósmico» más cercano. Así, la escala del tiempo de transmisión cambia: de un máximo de unos 0,1 segundos en la Tierra, pasa a poco más de 1 segundo.



TIERRA

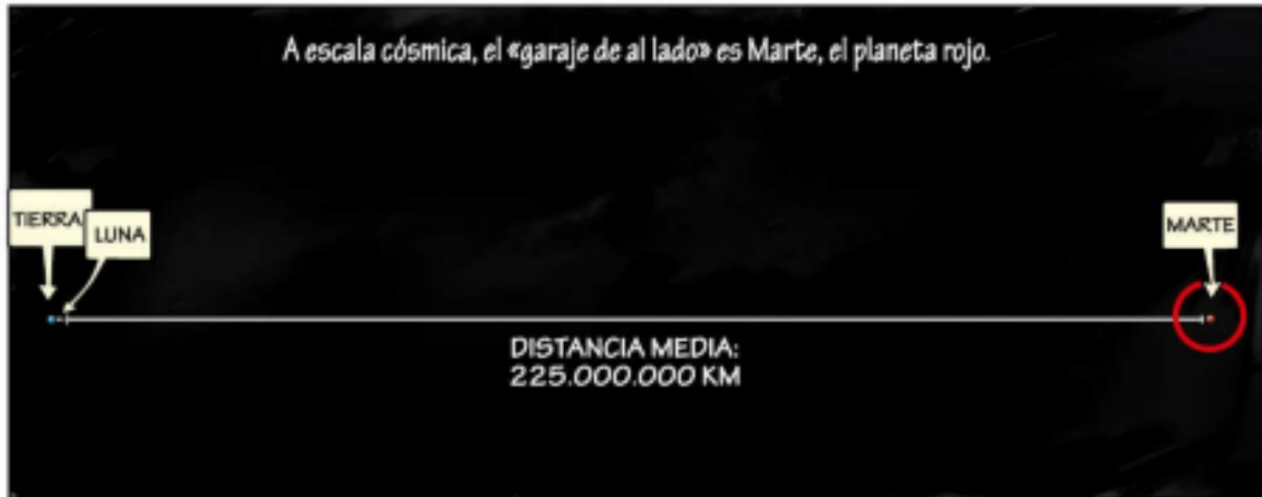
1,3 SEGUNDOS

¿Y NO TE HAS LLEVADO UNA POMADA?

LUNA

DISTANCIA MEDIA:
384.000 KM



Consideraciones previas





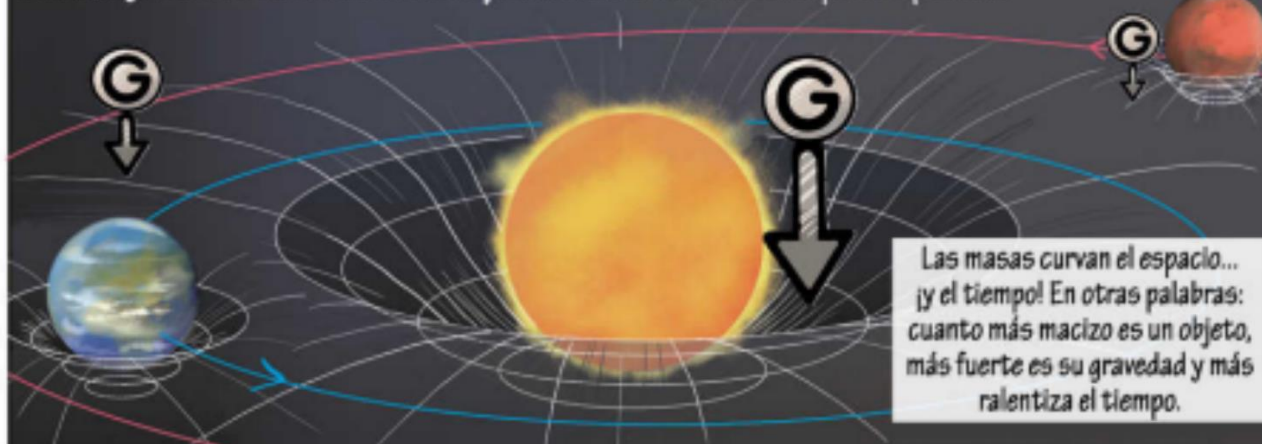
Podríamos definir un instante « t » para compensar el intervalo de 20 minutos necesarios para la llegada de la señal. Pero, una vez más, sería imposible observar las dos escenas de aquí abajo de manera simultánea, en pantallas, por ejemplo. Un instante « t » entre la Tierra y Marte tendría incluso cierto aire surrealista.

Consideraciones previas

Además, recuerda: un objeto se desplaza en el espacio (en amarillo  en la pequeña esfera), pero también en el tiempo (en azul ). La velocidad combinada de su velocidad en el espacio y en el tiempo equivale a la esfera entera: es la velocidad de la luz, siempre constante. Ahora bien, la Tierra orbita unos miles de km/h más rápido que Marte. Un observador situado en el Sol, por ejemplo, mediría que el tiempo pasa un poco más lentamente en la Tierra que en Marte.



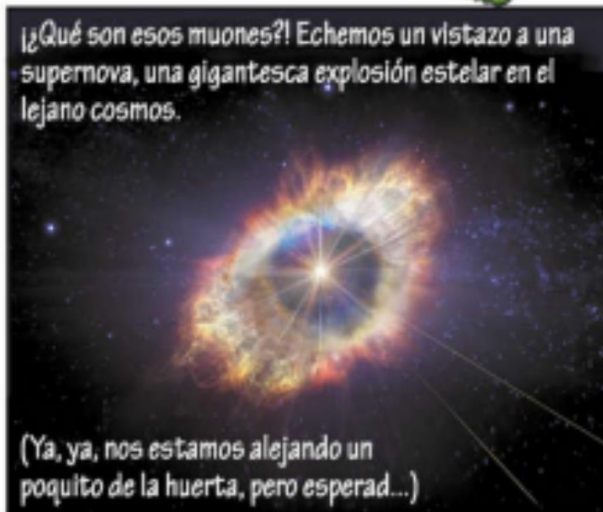
Añadamos un elemento del que ya hemos hablado: la gravedad. Al integrar la gravedad a la relatividad restringida, Albert Einstein descubrió la **relatividad general**. Esta demuestra que todo el espacio-tiempo es blando, algo así como un colchón sobre el que hubiésemos colocado unas pelotas pesadas.



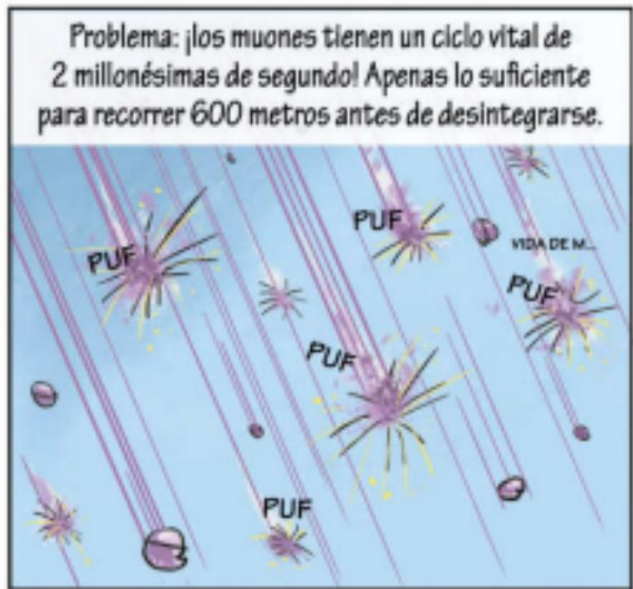
La Tierra y Marte tienen **sistemas de referencia distintos**. Su gravedad, su velocidad y, por tanto, su tiempo, difieren. La diferencia es imperceptible, pero medible. Además, una distancia muy grande entre los objetos cósmicos también influye en la desincronización temporal, como veremos más adelante.

Velocidad orbital más rápida
+ gravedad más fuerte =
tiempo más lento

Visto por un observador externo, un reloj terrestre se retrasa unos nanosegundos cada segundo comparado con un reloj marciano.



Consideraciones previas



Consideraciones previas



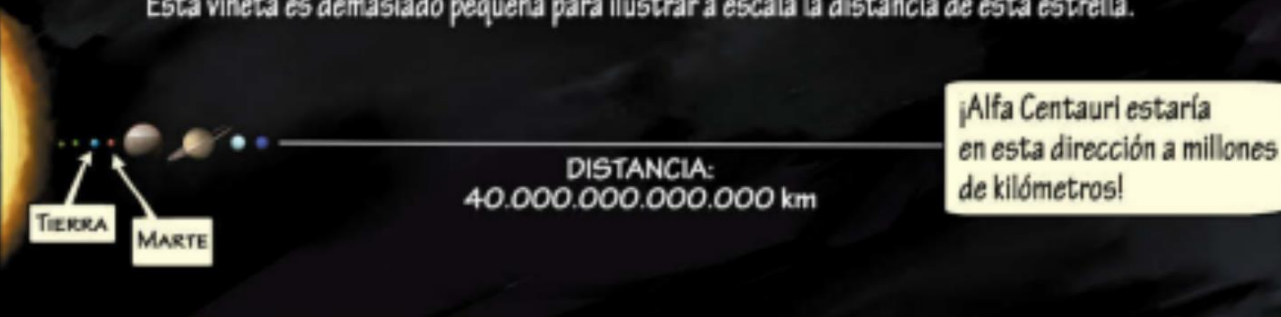


Consideraciones previas



Consideraciones previas

Nuestro mosquito de referencia ha viajado así desde el «garaje de al lado» hasta el otro extremo de la Tierra. En equivalencia cósmica, nuestro insecto habría llegado a la estrella **alfa Centauri**, fuera del Sistema Solar. Esta viñeta es demasiado pequeña para ilustrar a escala la distancia de esta estrella.



¡Alfa Centauri estaría en esta dirección a millones de kilómetros!

DISTANCIA:
40.000.000.000.000 km

TIERRA MARTE

En la escala del universo, alfa Centauri es, sin embargo, una vecina: la estrella más próxima al Sistema Solar, a «solo» 4 años luz. ¡Ella y nuestro Sol están a las afueras de una galaxia que cuenta al menos con 100.000 millones de estrellas!



NUESTRA GALAXIA,
LA VÍA LÁCTEA.

Nosotros Alfa Centauri

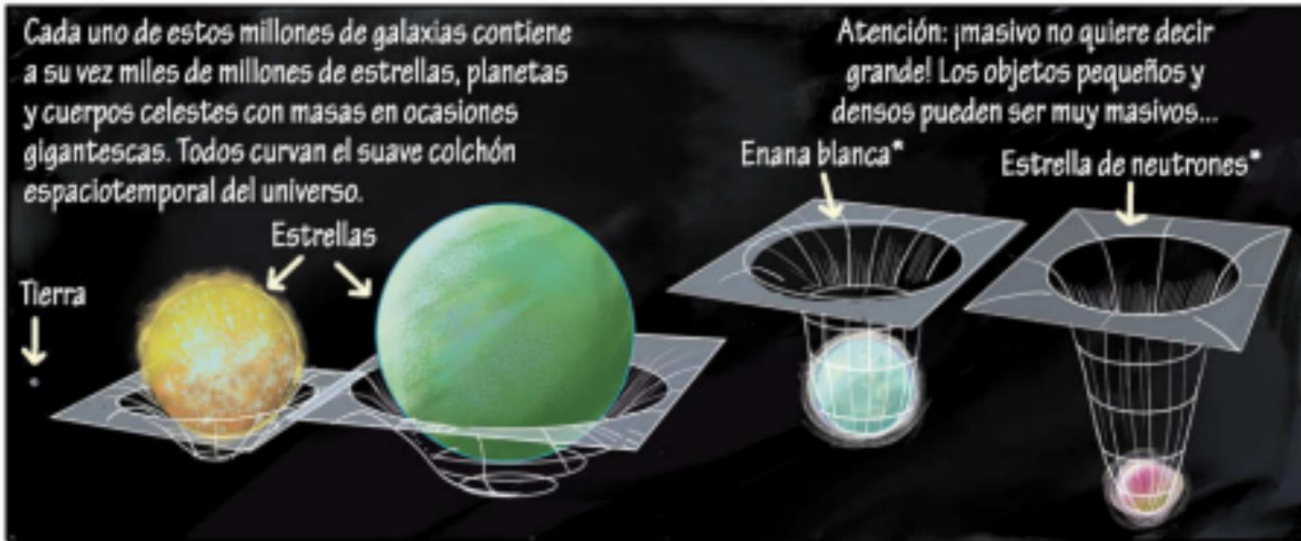
A esta escala,
la distancia entre la
Tierra y alfa Centauri
en realidad mediría
¡la décima parte del
espesor de un cabello!



Consideraciones previas

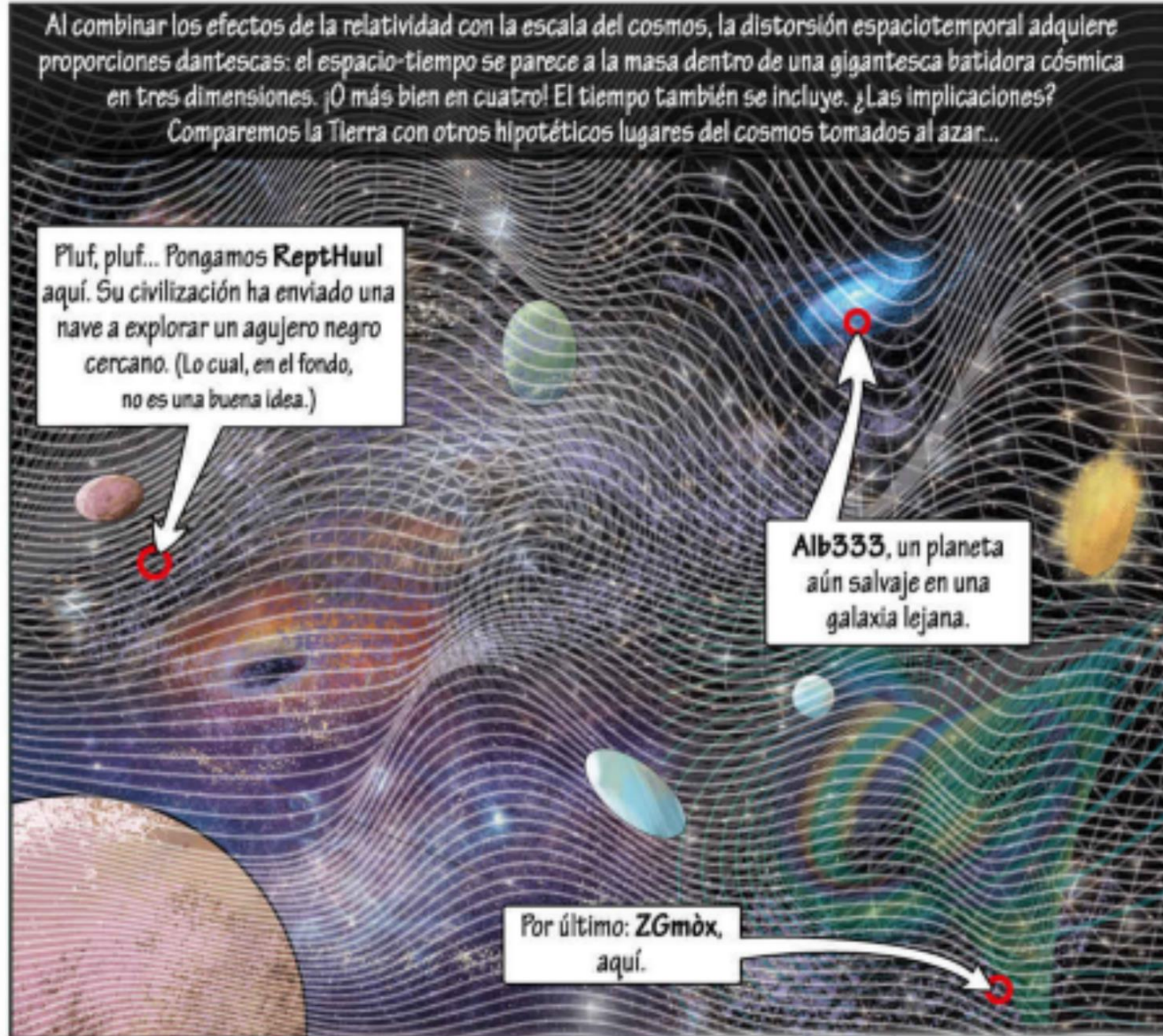


Consideraciones previas





Consideraciones previas



Consideraciones previas

Imaginemos escenas en estos cuatro rincones del universo: **30 minutos** según su correspondiente punto de vista —su tiempo propio—. En primer lugar, 30 minutos en la Tierra.



0 min NOS VEMOS DENTRO.

15 min HE PEDIDO «CAFÉ ESPECIAL MOKACCINO MUY DELICIOSO»... ¿Y TÚ??
¡CAFÉ!
PARECEN IGUALES. ¿NO?
AH, CLARO QUE NO... ¡EL TUYO ES «DELICIOSO!» Y ADEMÁS «MUY!»

23 min BLA, BLA, BLA

30 min

Los mismos 30 minutos, en los alrededores del planeta ReptHuul.



0 min AQUÍ NAVE TR-01 VÍA ONDAS SUPRALUMÍNICAS. ¡EL AGUJERO NEGRO ESTÁ A LA VISTA!

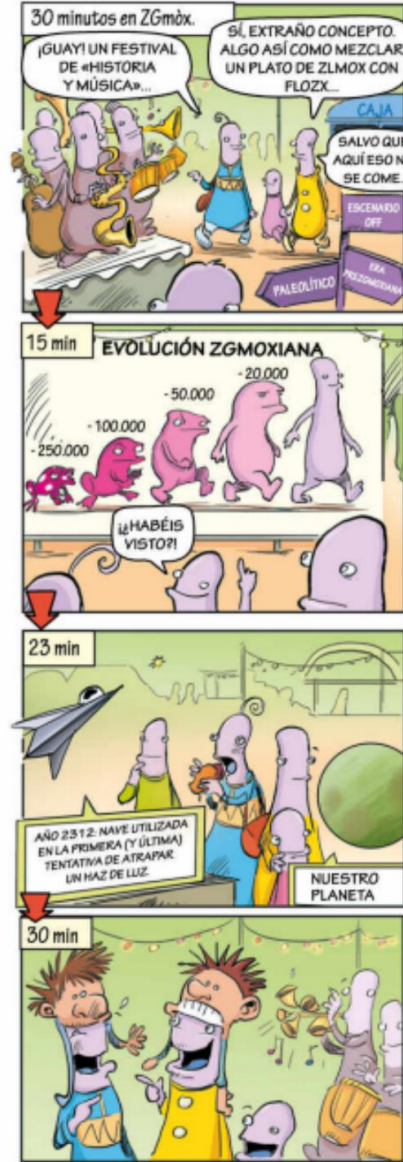
15 min ABANDONAMOS LA ERGOSFERA Y VAMOS A ATRAVESAR EL HORIZONTE DE SUCESOS.
¡MUY BIEN, CONTINÚE!

23 min ¡HEMOS CRUZADO!

25 min ¡INCREÍBLE!

30 min ¡MIRAD ALLÁ ABAJO!

30 minutos en ZGmòx.



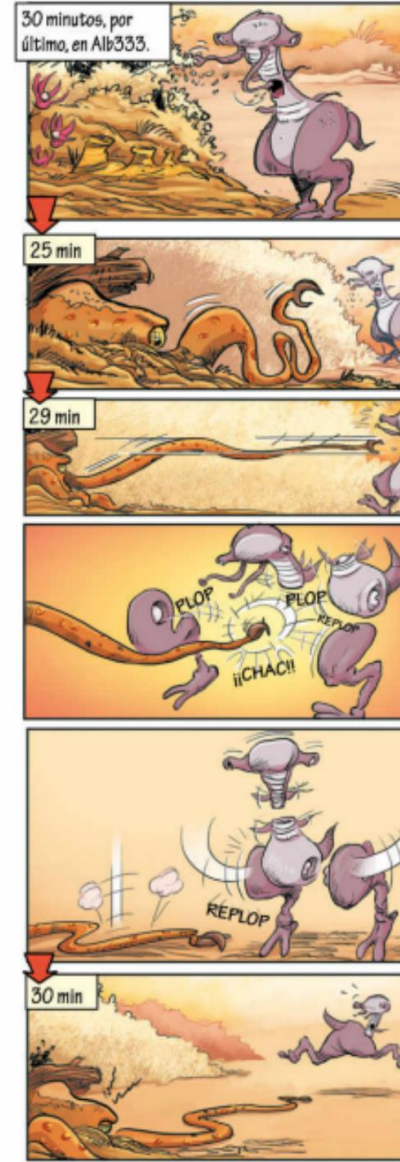
0 min ¡GUAY! UN FESTIVAL DE «HISTORIA Y MÚSICA»...
¡EXTRAÑO CONCEPTO. ALGO ASÍ COMO MEZCLAR UN PLATO DE ZLMOX CON FLOZX...»
CAJA SALVO QUE AQUÍ ESO NO SE COME.
ESCENARIO OFF. ERA POLIZONERAMA. PALEOLÍTICO.

15 min EVOLUCIÓN ZGMOXIANA
-250.000 -100.000 -50.000 -20.000
¿HABÉIS VISTO?!

23 min AÑO 2312: NAVE UTILIZADA EN LA PRIMERA (Y ÚLTIMA) TENTATIVA DE ATRAPAR UN HAZ DE LUZ.
NUESTRO PLANETA

30 min

30 minutos, por último, en Alb333.



0 min

25 min

29 min

30 min PLOP PLOP ¡¡CHAC!!
RÉPLOP

30 min

Consideraciones previas

Recuperemos ahora las mismas escenas de 30 minutos, pero esta vez desde un **punto de vista único**: el de la Tierra.

30 minutos en la Tierra

Al ser nuestro planeta el punto de referencia, los acontecimientos se desenvuelven de manera idéntica.

Pero he aquí lo que veríamos si pudiéramos observar «en directo» los otros tres planetas.

Vista desde la Tierra, la nave de los reptuulianos no se movería.

A nuestros ojos, el aparato parecería perfectamente inmóvil, como suspendido en el espacio.

La escena permanecería congelada de este modo ante el agujero negro...

... durante millones y millones de años.

Para siempre.



Por el contrario, en 30 minutos veríamos a cámara rápida 4.000 años de historia en ZGmòx.

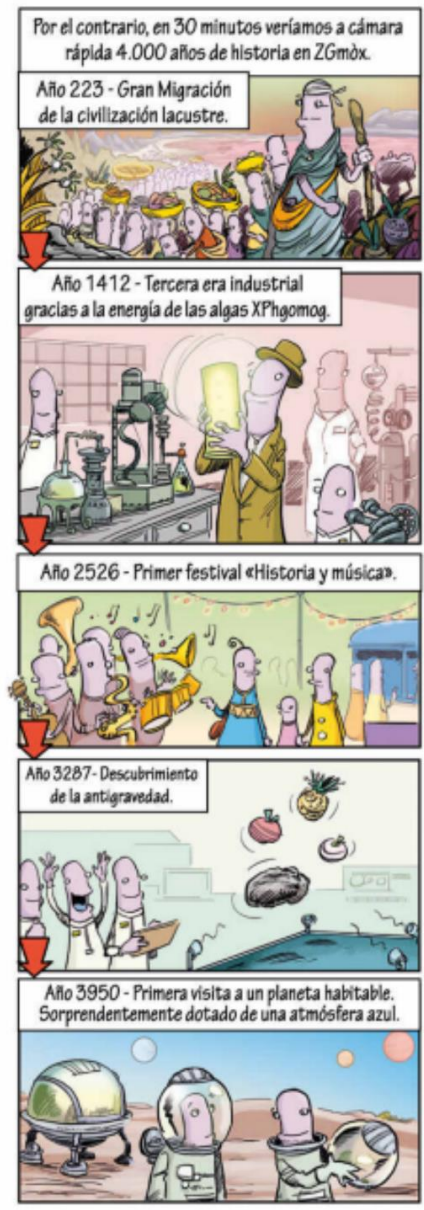
Año 223 - Gran Migración de la civilización lacustre.

Año 1412 - Tercera era industrial gracias a la energía de las algas XPhgomog.

Año 2526 - Primer festival «Historia y música».

Año 3287 - Descubrimiento de la antigravedad.

Año 3950 - Primera visita a un planeta habitable. Sorprendentemente dotado de una atmósfera azul.

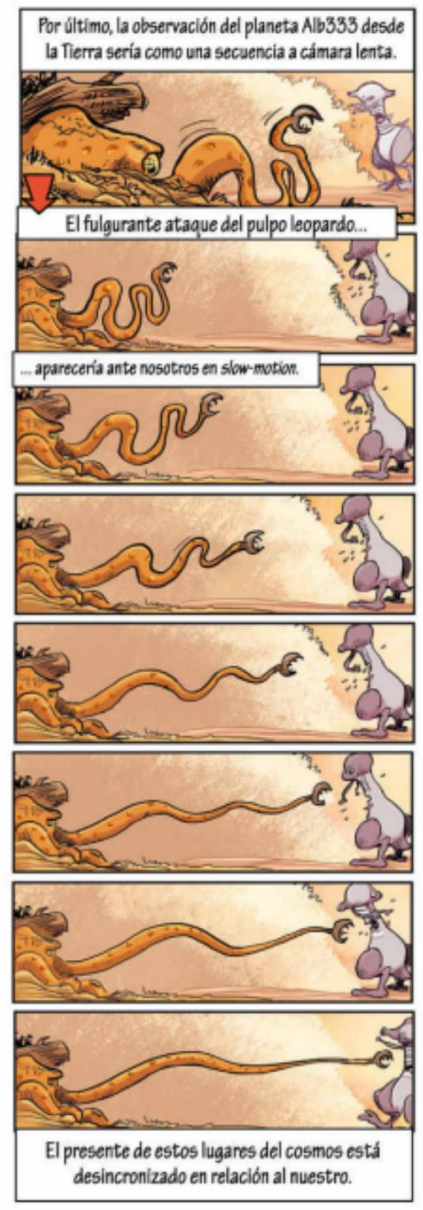


Por último, la observación del planeta Alb333 desde la Tierra sería como una secuencia a cámara lenta.

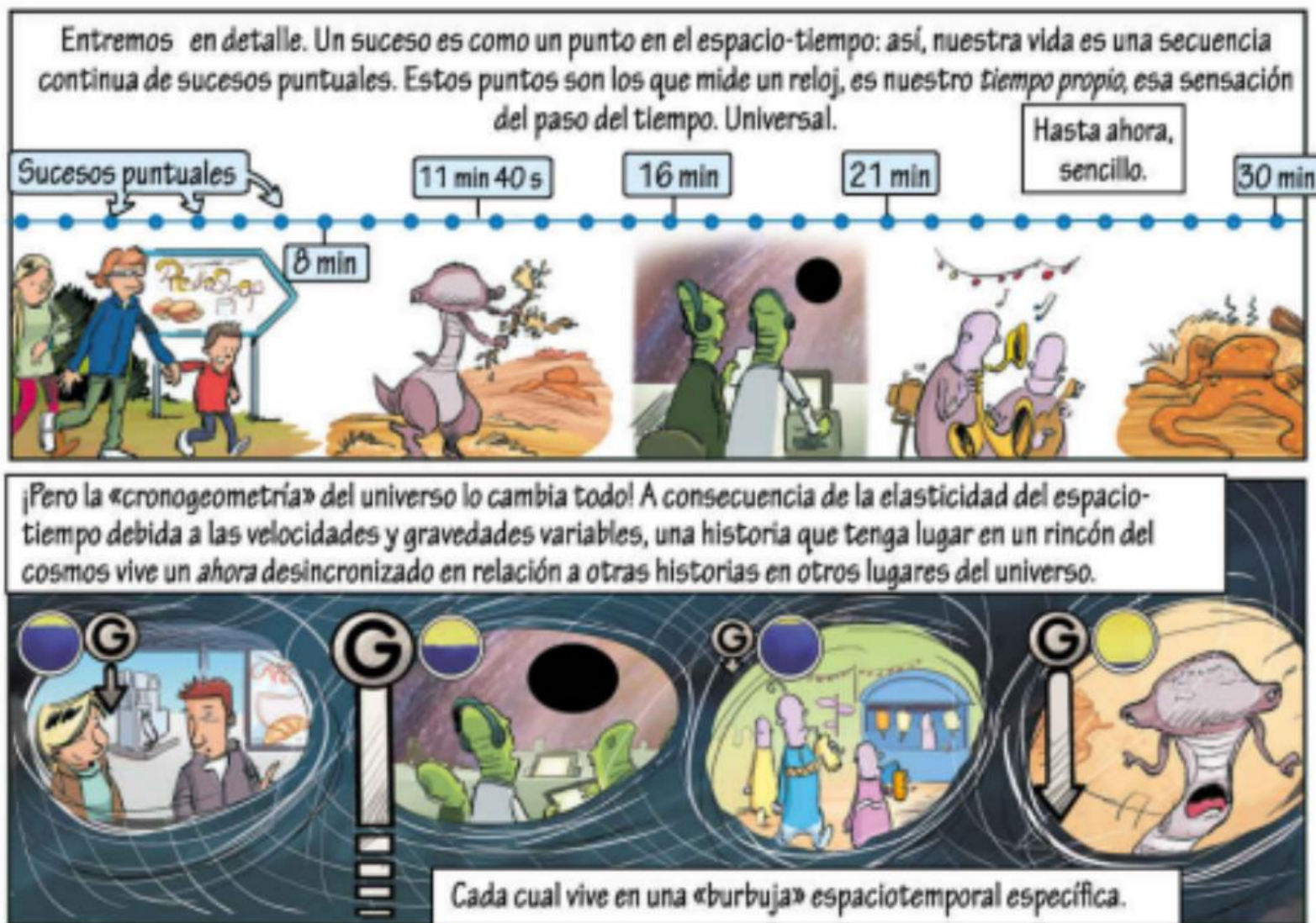
El fulgurante ataque del pulpo leopardo...

... aparecería ante nosotros en slow-motion.

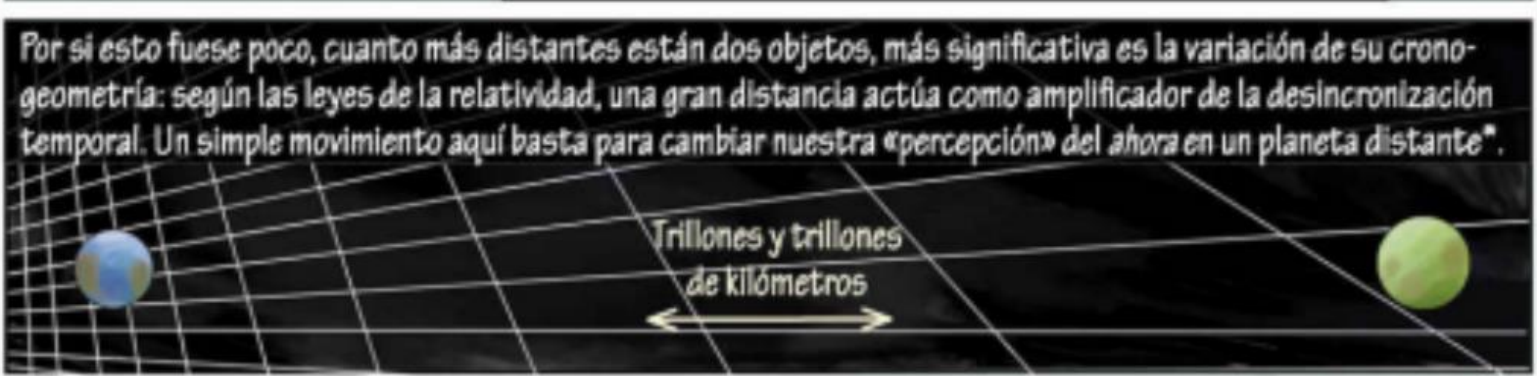
El presente de estos lugares del cosmos está desincronizado en relación al nuestro.



Consideraciones previas



Consideraciones previas



Dicho de otro modo: «El ahora de una galaxia lejana [...] cuando camino puede diferir en miles de años con respecto al ahora de la misma galaxia cuando estoy inmóvil», escribe el astrofísico Trinh Xuan Thuan. Imaginemos que Zoé y Adam pudieran ver el ahora del planeta ZGmòx. En la práctica, es imposible. Pero aceptemos que poseen una especie de visión mágica.



Consideraciones previas

Volvamos a nuestra pregunta inicial: **¿Qué hora es en el universo?** Esto es lo que nos dice la relatividad: los constituyentes del universo no son objetos tridimensionales existentes en la *duración*, sino más bien objetos tetradimensionales cuya componente temporal está integrada en las componentes espaciales. El tiempo, al igual que el espacio, no pasa. Por consiguiente, pasado, presente y futuro se confunden en una especie de universo bloque donde todos los momentos están al mismo nivel, sin cronología.

UNIVERSO BLOQUE: PASADO, PRESENTE Y FUTURO COEXISTEN, COMO PORCIONES DE UN ENORME PASTEL ESPACIOTEMPORAL.

LOS FOTONES, VECTORES DE LA LUZ Y DESPROVISTOS DE MASA, SON ATEMPORALES. CARECEN DE SISTEMA DE REFERENCIA, ESTÁN FUERA DE CAMPO. ¡UN FOTÓN NACE Y MUERE AL MISMO TIEMPO!

AL ENTRAR EN UN AGUJERO NEGRO, EN LA GRAVEDAD «INFINITA», LA TRIPULACIÓN REPTHULIANA VE CÓMO LA ETERNIDAD PASA EN UN INSTANTE. LA VIDA Y LA MUERTE DE LOS QUE SE HAN QUEDADO EN REPTHUL, DE SU PLANETA, DE SU GALAXIA, DEL COSMOS ENTERO. EL TODO EN UNA FRACCIÓN DE SEGUNDO.

1890: CLÉMENT ADER A BORDO DEL ÉOLE, UNO DE LOS PRIMEROS VUELOS CON MOTOR

1877: LUDWIG BOLTZMANN DEFINE EL ASPECTO ESTADÍSTICO DE LA ENTROPÍA, DESCRIBIENDO UN MUNDO QUE SIEMPRE VA DEL ORDEN AL DESORDEN.

¿EL TIEMPO SE DETIENE? ¿O ES INFINITO?

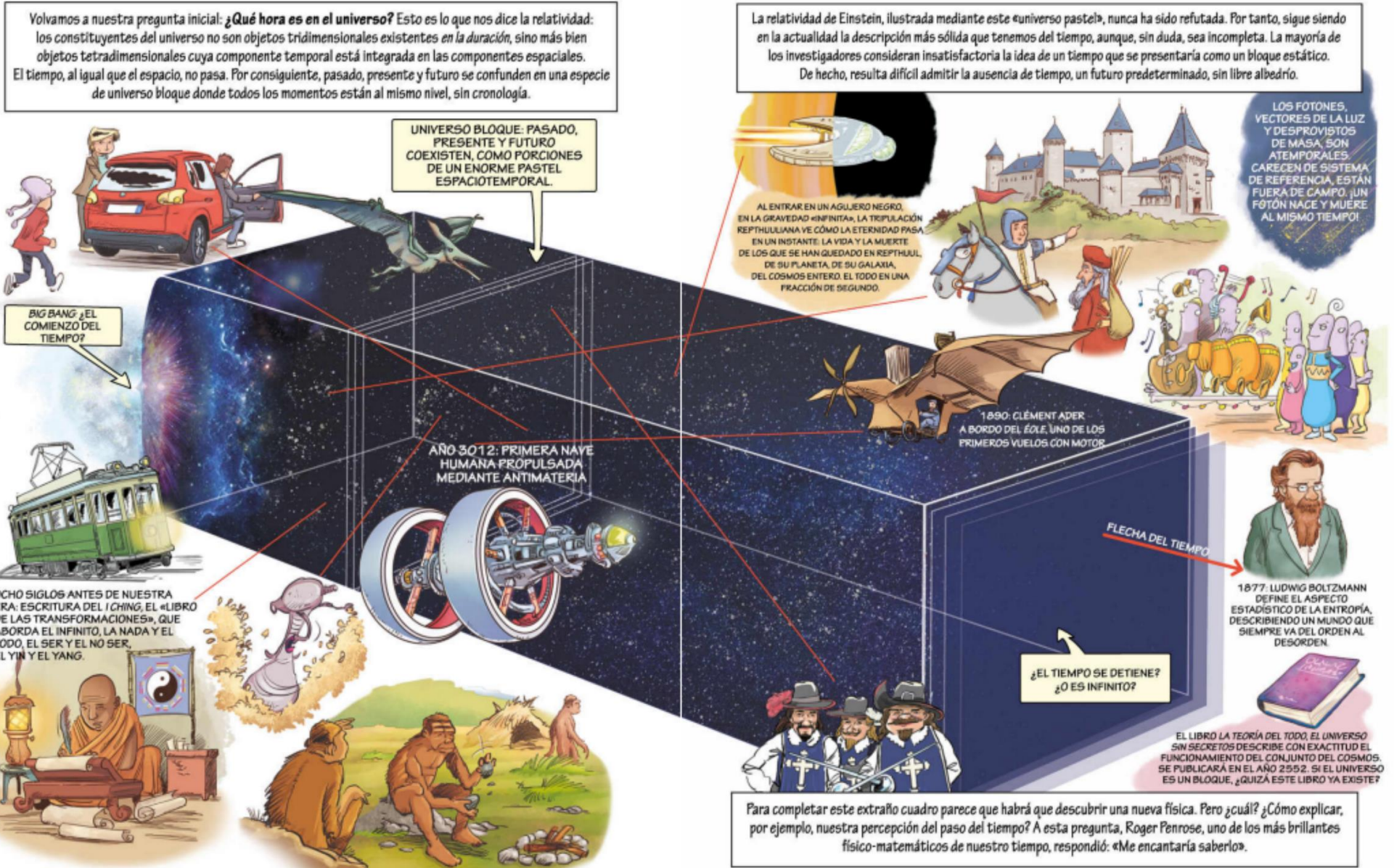
EL LIBRO LA TEORÍA DEL TODO: EL UNIVERSO SIN SECRETOS DESCRIBE CON EXACTITUD EL FUNCIONAMIENTO DEL CONJUNTO DEL COSMOS. SE PUBLICARÁ EN EL AÑO 2552. SI EL UNIVERSO ES UN BLOQUE, ¿QUIZÁ ESTE LIBRO YA EXISTE?

Para completar este extraño cuadro parece que habrá que descubrir una nueva física. Pero ¿cuál? ¿Cómo explicar, por ejemplo, nuestra percepción del paso del tiempo? A esta pregunta, Roger Penrose, uno de los más brillantes físico-matemáticos de nuestro tiempo, respondió: «Me encantaría saberlo».

BIG BANG ¿EL COMIENZO DEL TIEMPO?


ANO 3012: PRIMERA NAVE HUMANA PROPULSADA MEDIANTE ANTIMATERIA

OCHO SIGLOS ANTES DE NUESTRA ERA: ESCRITURA DEL I CHING, EL «LIBRO DE LAS TRANSFORMACIONES», QUE ABORDA EL INFINITO, LA NADA Y EL TODO, EL SER Y EL NO SER, EL YIN Y EL YANG.

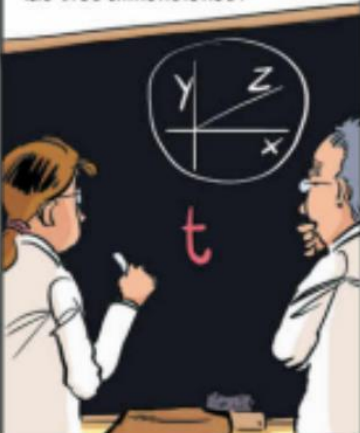


Consideraciones previas


El debate existe. Recordemos que la teoría del universo bloque carga con algunos pesaditos...



¿Sería completamente necesario incluir el tiempo «t» en las ecuaciones? ¿Mezclarlo con las tres dimensiones?



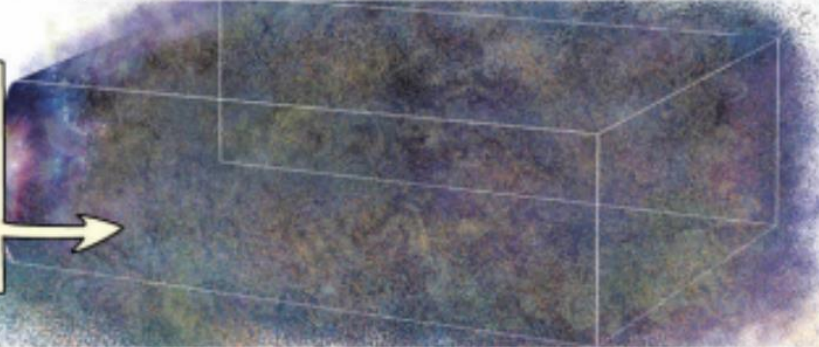
Algunos físicos piensan que no. En su opinión, «espacializar» el tiempo es un error: matemáticas y realidad no tienen por qué rimar.



Para ellos, el tiempo es el fundamento de lo real, no una ilusión.

Tal vez un espacio-tiempo cuántico reconciliaría a todo el mundo. Problema: las ecuaciones de la relatividad (que describen lo infinitamente grande) y las de la física cuántica (que describen lo infinitamente pequeño) son incompatibles*. Para reunir las, habría que encontrar una naturaleza cuántica en la gravedad. Coexisten varias teorías...

Así por ejemplo, la teoría de la gravedad cuántica de lazos imagina un universo compuesto de minúsculos granos -o cuantos- de espacio-tiempo, en lugar de un universo bloque estático.



El espacio-tiempo sería así una nube probabilística cuántica cuya realidad emergería de lo infinitamente pequeño. Todavía especulativa, esta teoría elimina el problema de un futuro ya determinado.

Consideraciones previas

También solucionaría la densidad *infinita* del agujero negro. Este podría contener en su centro una «estrella de Planck». A modo de recordatorio, he aquí la visión clásica de un agujero negro:

En el medio una *singularidad*, es decir, una densidad infinita...



... y un ciclo vital de trillones y trillones de años. Pero ¿es este en realidad el caso? ¿Y si...

... un agujero negro fuera de hecho una «explosión»? Su aparente inmovilidad a nuestros ojos solo se debería a la ralentización temporal creada por la gravedad. Como la nave reptHuuliana congelada ante el horizonte de sucesos.



Una estrella de Planck en el centro.

Esta «explosión», un colapso y luego un rebote, sería causada por el franqueamiento de una densidad-límite (por tanto, no infinita) que supondría el paso de un agujero negro...



¡... hacia un agujero blanco!

Una especie de gemelo invertido del agujero negro del que es posible salir pero no entrar.

«La relatividad general predice la posibilidad de agujeros blancos», explica el físico Carlo Rovelli, coautor de la teoría.



Existen otras hipótesis. Todas tratan de resolver los enigmas de los agujeros negros y el tiempo. Y todas buscan pruebas.

Pero en el estado actual del conocimiento, la relatividad nos dice que el tiempo es una línea inmóvil que se extiende hasta el infinito en las *dos* direcciones. Por otra parte, la variable tiempo no existe en las ecuaciones físicas fundamentales: para ellas, el tiempo no tiene dirección.



En otras palabras, las cosas pueden suceder en un sentido o en otro: los copos de nieve ascender hacia las nubes, los huevos rotos repararse. Como una película que reprodujéramos hacia atrás.



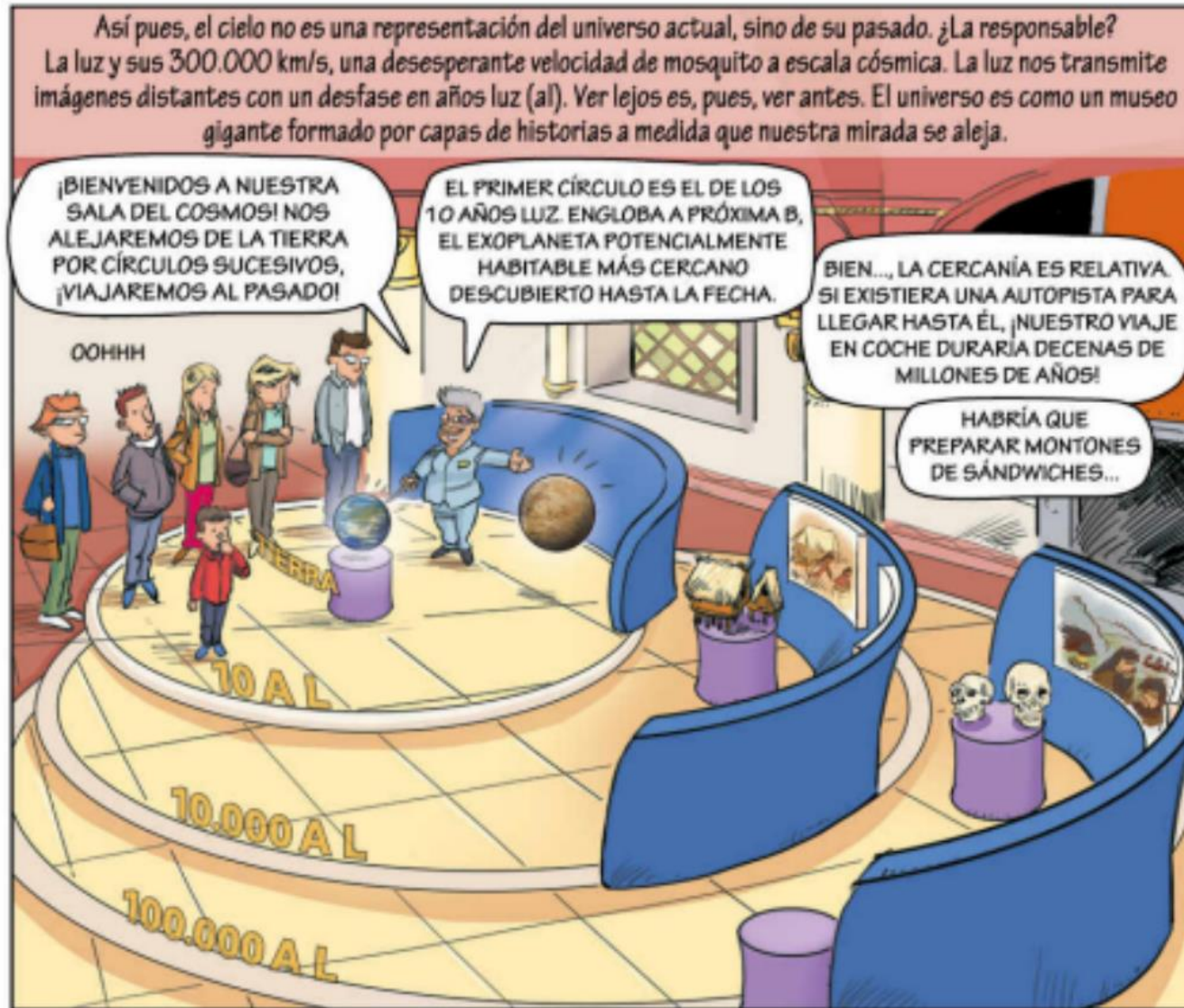
Nunca sucede porque hay un sentido, una flecha en el tiempo. Y esta se debe a un *único* factor: la termodinámica y su segundo principio. Por su acción, sin aporte de energía exterior, tu café pasará de caliente a frío. Nunca al revés.



Consideraciones previas



Consideraciones previas



Consideraciones previas



Consideraciones previas

ALEJÉMONOS A 5 MILLONES DE AÑOS LUZ. YA NO HAY UNA, SINO VARIAS GALAXIAS: EL GRUPO LOCAL. POR LO MENOS CINCUENTA GALAXIAS, ENTRE ELLAS LA NUESTRA Y LA CERCANA ANDRÓMEDA. TODAS ESAS GALAXIAS GIRAN Y GIRAN...

5.000.000 años luz

NUBE DE MAGAÉLANES
VÍA LÁCTEA
ENANA DE SEXTANS
ANDRÓMEDA

NGC 185
M 110

... ALGO ASÍ COMO UN TORBELLINO DE PAQUIDERMÓS GIGANTES UNIDOS POR SUS RESPECTIVAS FUERZAS DE GRAVEDAD.

OBSERVEN QUE ANDRÓMEDA ES EL OBJETO CELESTE MÁS LEJANO QUE PUEDE VER EL OJO HUMANO... ¡EN CASO DE QUE TENGA BUENA VISTA! ESTA GALAXIA SE NOS MUESTRA TAL COMO ERA HACE 2,5 MILLONES DE AÑOS.

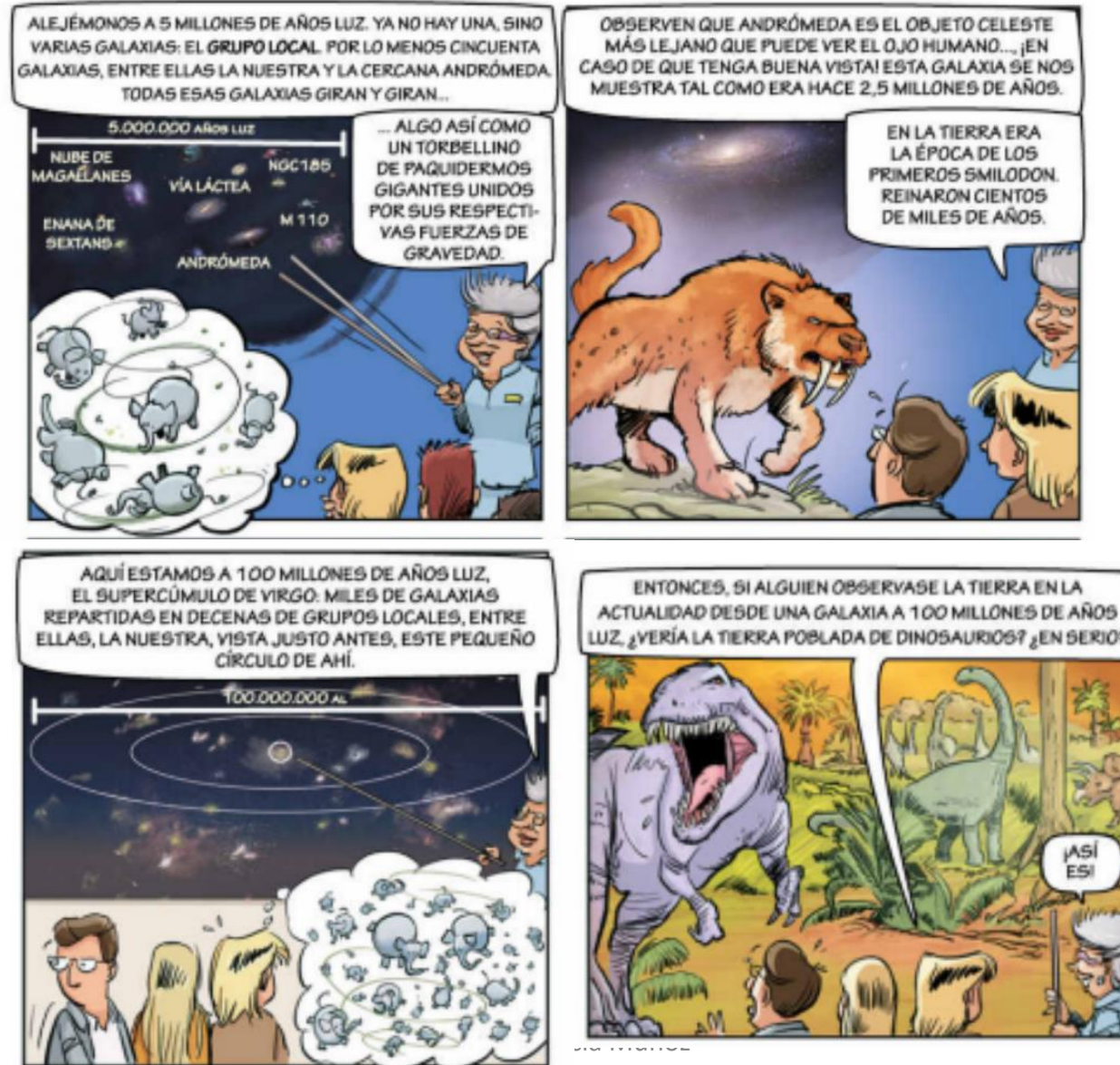
EN LA TIERRA ERA LA ÉPOCA DE LOS PRIMEROS SMILODON. REINARON CIENTOS DE MILES DE AÑOS.

AQUÍ ESTAMOS A 100 MILLONES DE AÑOS LUZ, EL SUPERCÚMULO DE VIRGO: MILES DE GALAXIAS REPARTIDAS EN DECENAS DE GRUPOS LOCALES, ENTRE ELLAS, LA NUESTRA, VISTA JUSTO ANTES, ESTE PEQUEÑO CÍRCULO DE AHÍ.

100.000.000 AL

ENTONCES, SI ALGUIEN OBSERVASE LA TIERRA EN LA ACTUALIDAD DESDE UNA GALAXIA A 100 MILLONES DE AÑOS LUZ, ¿VERÍA LA TIERRA POBLADA DE DINOSAURIOS? ¿EN SERIO?

¡ASÍ ES!

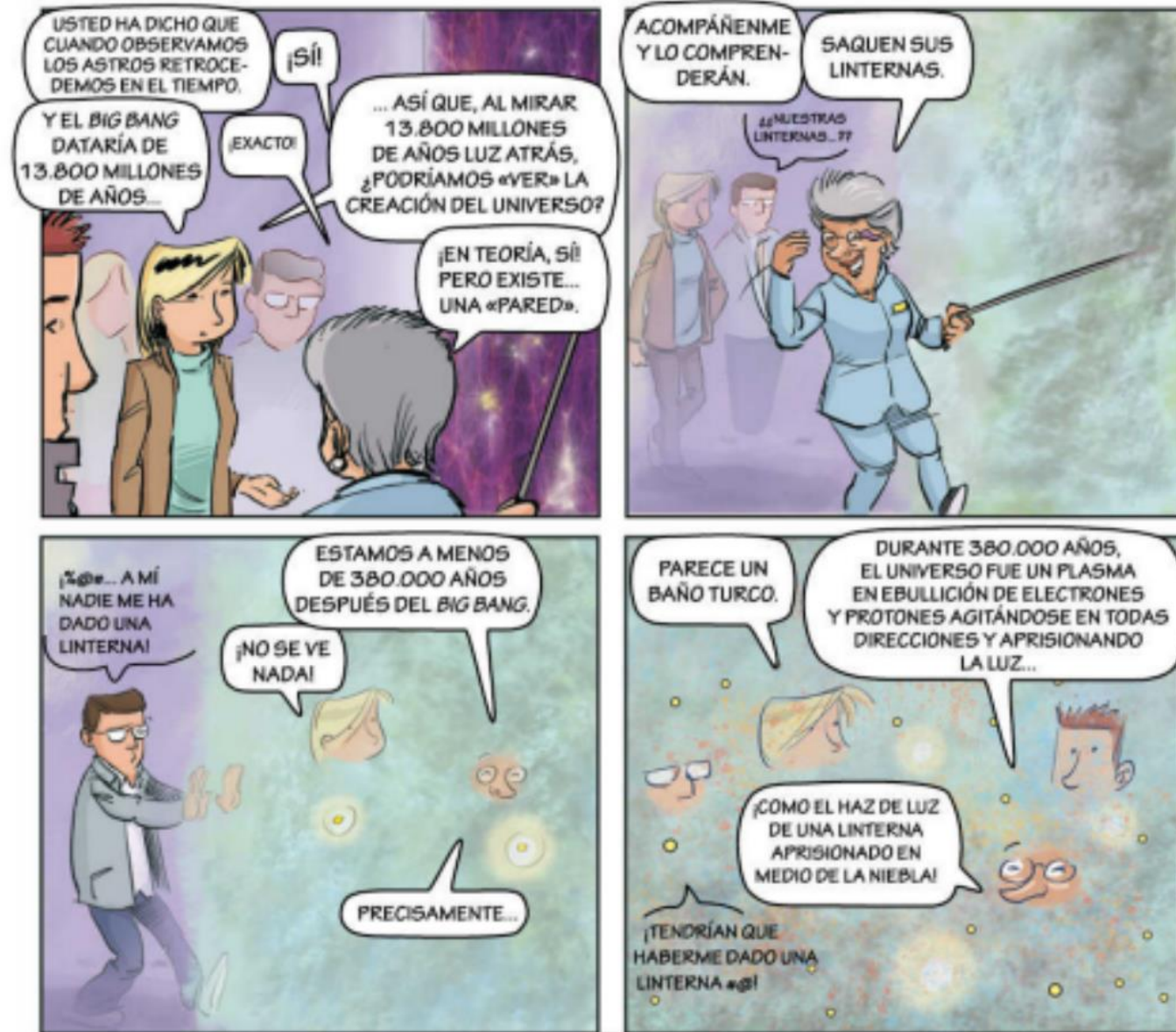


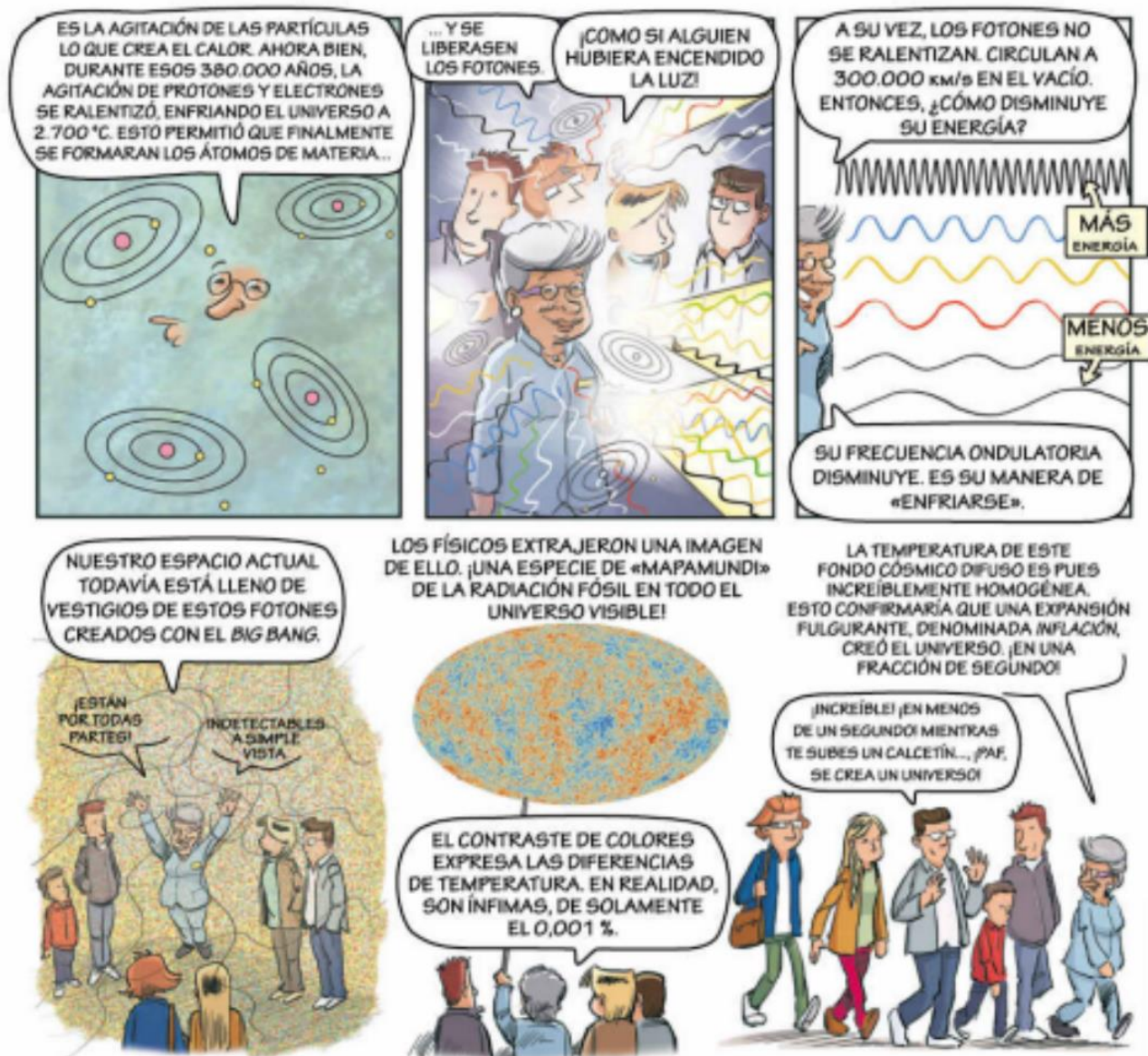
Consideraciones previas





Consideraciones previas





ES LA AGITACIÓN DE LAS PARTÍCULAS LO QUE CREA EL CALOR. AHORA BIEN, DURANTE ESOS 380.000 AÑOS, LA AGITACIÓN DE PROTONES Y ELECTRONES SE RALENTIZÓ, ENFRIANDO EL UNIVERSO A 2.700 °C. ESTO PERMITIÓ QUE FINALMENTE SE FORMARAN LOS ÁTOMOS DE MATERIA...

... Y SE LIBERASEN LOS FOTONES.

¡COMO SI ALGUIEN HUBIERA ENCENDIDO LA LUZ!

A SU VEZ, LOS FOTONES NO SE RALENTIZAN. CIRCULAN A 300.000 km/s EN EL VACÍO. ENTONCES, ¿CÓMO DISMINUYE SU ENERGÍA?

MÁS ENERGÍA

MENOS ENERGÍA

SU FRECUENCIA ONDULATORIA DISMINUYE. ES SU MANERA DE «ENFRIARSE».

NUESTRO ESPACIO ACTUAL TODAVÍA ESTÁ LLENO DE VESTIGIOS DE ESTOS FOTONES CREADOS CON EL BIG BANG.

¡ESTÁN POR TODAS PARTES!

INDETECTABLES A SIMPLE VISTA

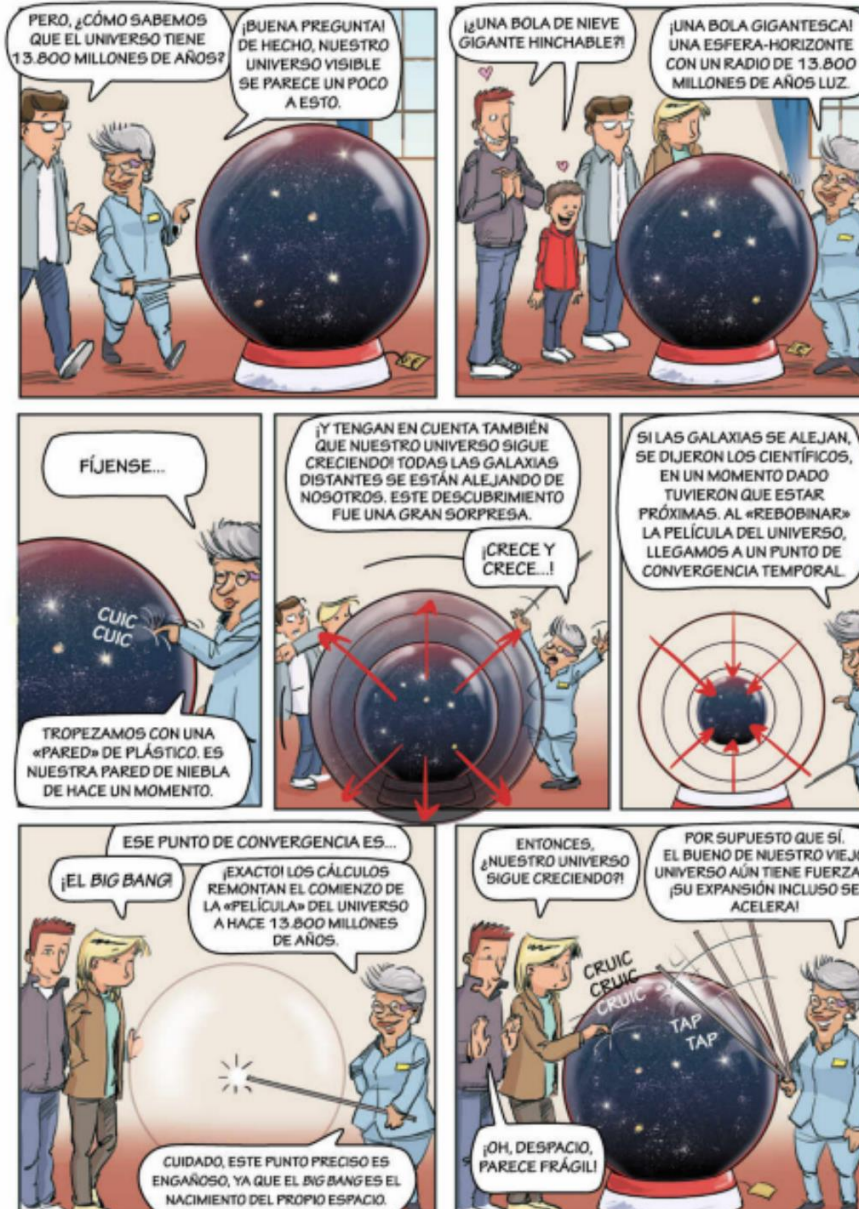
LOS FÍSICOS EXTRAJERON UNA IMAGEN DE ELLO. ¡UNA ESPECIE DE «MAPAMUNDO!» DE LA RADIACIÓN FÓSIL EN TODO EL UNIVERSO VISIBLE!

LA TEMPERATURA DE ESTE FONDO CÓSMICO DIFUSO ES PUES INCREÍBLEMENTE HOMOGÉNEA. ESTO CONFIRMARÍA QUE UNA EXPANSIÓN FULGURANTE, DENOMINADA INFLACIÓN, CREÓ EL UNIVERSO, EN UNA FRACCIÓN DE SEGUNDO!

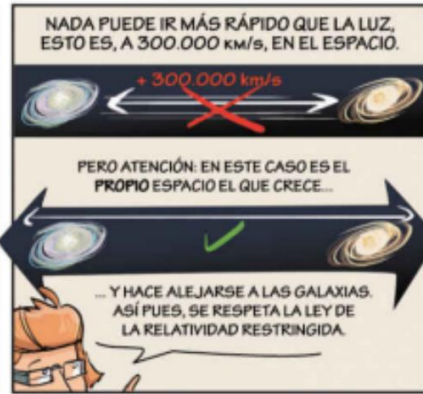
¡INCREÍBLE! ¡EN MENOS DE UN SEGUNDO! MIENTRAS TE SUBES UN CALCETÍN... ¡PAF, SE CREA UN UNIVERSO!

EL CONTRASTE DE COLORES EXPRESA LAS DIFERENCIAS DE TEMPERATURA. EN REALIDAD, SON ÍNFIMAS, DE SOLAMENTE EL 0,001 %.

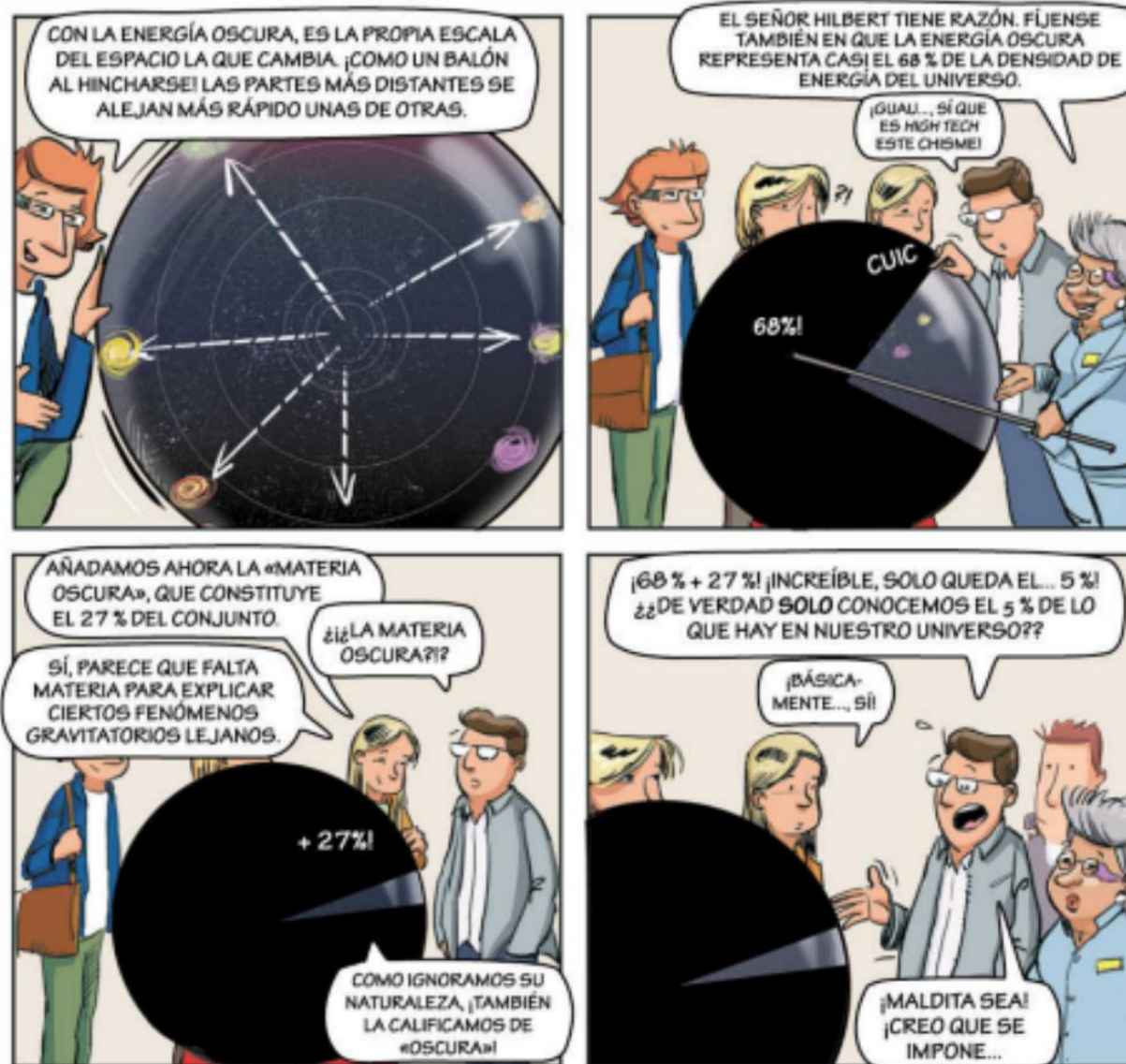
Consideraciones previas



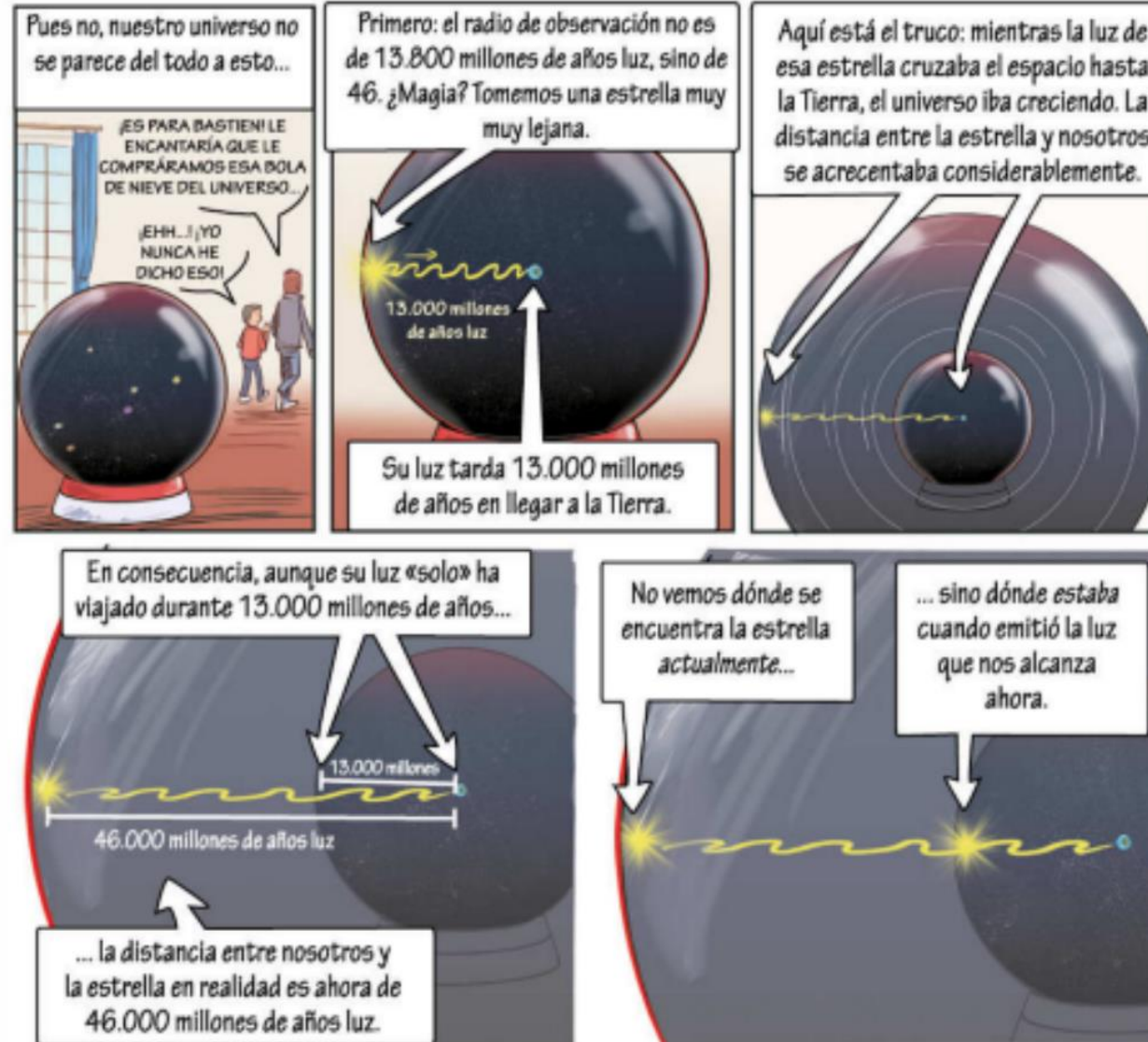
Consideraciones previas



Consideraciones previas



Consideraciones previas



Pues no, nuestro universo no se parece del todo a esto...

¡ES PARA BASTIENI LE ENCANTARÍA QUE LE COMPRÁRAMOS ESA BOLA DE NIEVE DEL UNIVERSO...

¡EHH...! ¡YO NUNCA HE DICHO ESO!

Primero: el radio de observación no es de 13.800 millones de años luz, sino de 46. ¿Magia? Tomemos una estrella muy muy lejana.

13.000 millones de años luz

Su luz tarda 13.000 millones de años en llegar a la Tierra.

Aquí está el truco: mientras la luz de esa estrella cruzaba el espacio hasta la Tierra, el universo iba creciendo. La distancia entre la estrella y nosotros se acrecentaba considerablemente.

En consecuencia, aunque su luz «solo» ha viajado durante 13.000 millones de años...

13.000 millones

46.000 millones de años luz

... la distancia entre nosotros y la estrella en realidad es ahora de 46.000 millones de años luz.

No vemos dónde se encuentra la estrella actualmente...

... sino dónde estaba cuando emitió la luz que nos alcanza ahora.

Consideraciones previas

Segundo: estar en el centro del universo es halagador. Pero, por desgracia para nosotros, pequeños terrícolas presuntuosos, esta esfera solo es el centro de **nuestra** zona observable.



La lejana estrella que acabamos de mencionar también posee su propia esfera-horizonte de observación en el cosmos, diferente de la nuestra.



Y, en realidad, cada cuerpo celeste está en el centro de su propia esfera-horizonte.



El horizonte observable desde la Tierra no es más que una insignificante bolita en un universo mucho, MUCHO más vasto. ¿Cuánto de vasto? ¿A qué se parece el universo entero? ¿Es finito o infinito?



No tenemos una respuesta definitiva a estas preguntas: por culpa de los límites de nuestra esfera-horizonte.

Consideraciones previas

Aun así, hace falta mucho más para desanimar a los científicos, armados con fórmulas matemáticas, satélites, telescopios y otros artilugios de medición.

El estudio conjunto de la densidad del universo y del fondo cósmico difuso brinda importantes pistas.

La forma del universo está especialmente determinada por la relatividad general: la **densidad** de materia y energía* presentes puede curvar el universo en una dirección... **ALTA densidad**

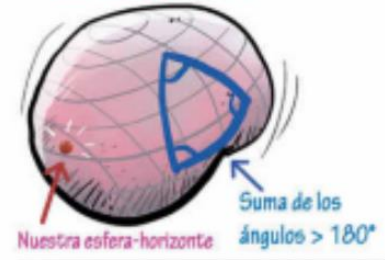
... o en otra.

Baja densidad

También podemos imaginar una especie de triángulo cósmico gigante sobre el fondo cósmico difuso: según la curvatura del universo, la suma de los ángulos varía...

Así, un triángulo trazado sobre un universo de curvatura *positiva*, como una patata, vería la suma de sus ángulos superar los 180 grados. Sin energía oscura, la densidad de la materia acabaría provocando que se contrajese sobre sí mismo.

UNIVERSO PATATA



Por el contrario, una curvatura *negativa* se parecería a una silla de montar, abierta y sin límite. El universo crecería sin fin, incluso sin energía oscura y con independencia de su densidad de materia.

UNIVERSO SILLA DE MONTAR



Finalmente, el universo podría ser plano como una caja: de curvatura *nula*. En este caso, la suma de los ángulos sería de 180 grados, como si el triángulo hubiera sido dibujado sobre una hoja de papel.

UNIVERSO CAJA



Consideraciones previas

Un universo «patata» podría ser finito... ¡pero sin bordes! Caminaríamos sobre él como hormigas cuya mente solo podría captar dos dimensiones.



Variante: el universo dónut. O hipertoro. También en este caso estaríamos en un espacio de dimensiones curvadas sin tener conciencia de ello.



*Vale, estos dos son extraños (pero reconocamos que la taza va de maravilla con el dónut).

A base de ecuaciones, la ciencia ha imaginado geometrías extrañas, complejas y multidimensionales. He aquí un ejemplo de universo «Calabi-Yau», utilizado en la denominada teoría de cuerdas.



En estas complejas geometrías, las salidas estarían conectadas con las entradas. Jamás podríamos irnos. Como si estuviéramos en el juego Pac-Man.



En la actualidad, la medida de la densidad del universo, así como el análisis preciso del fondo cósmico difuso convergen hacia un universo «caja», es decir, plano.

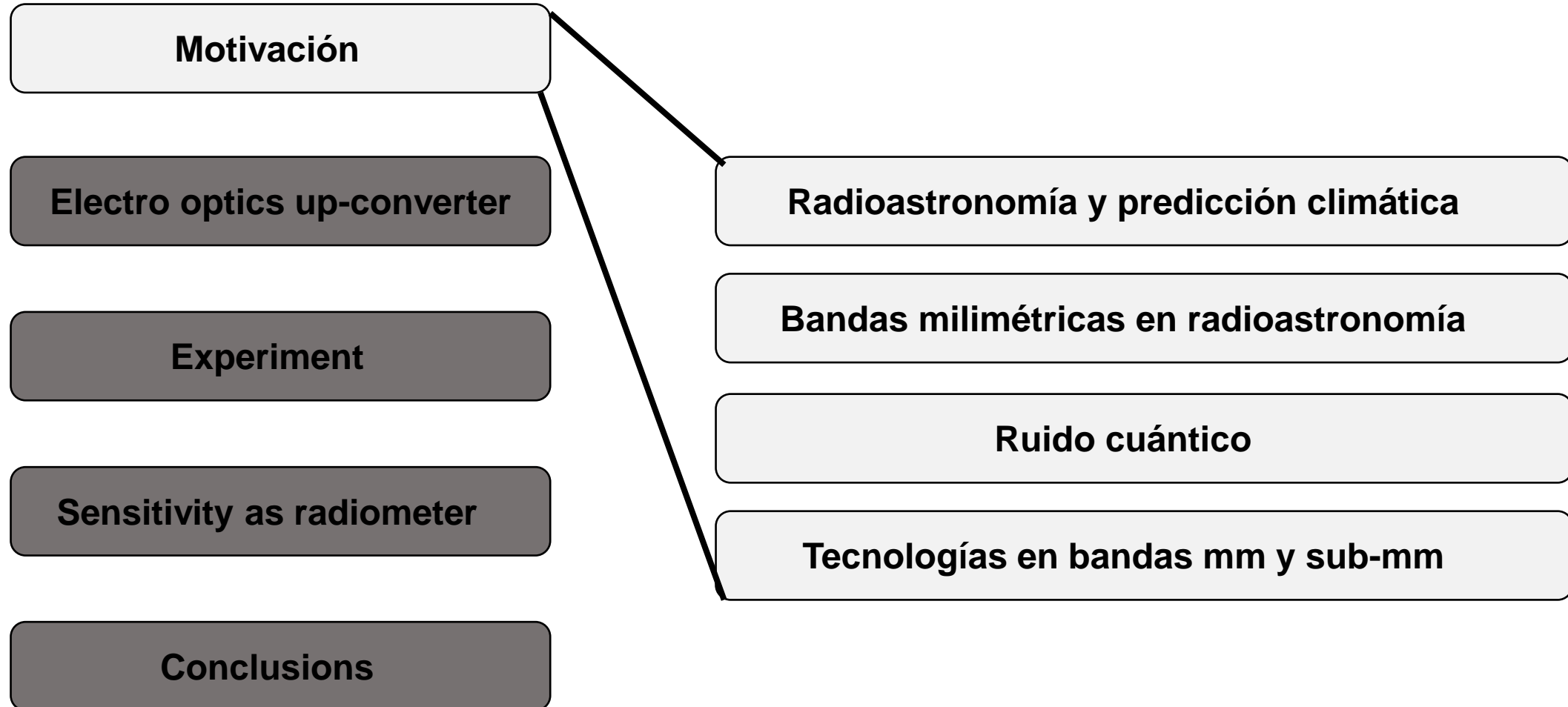


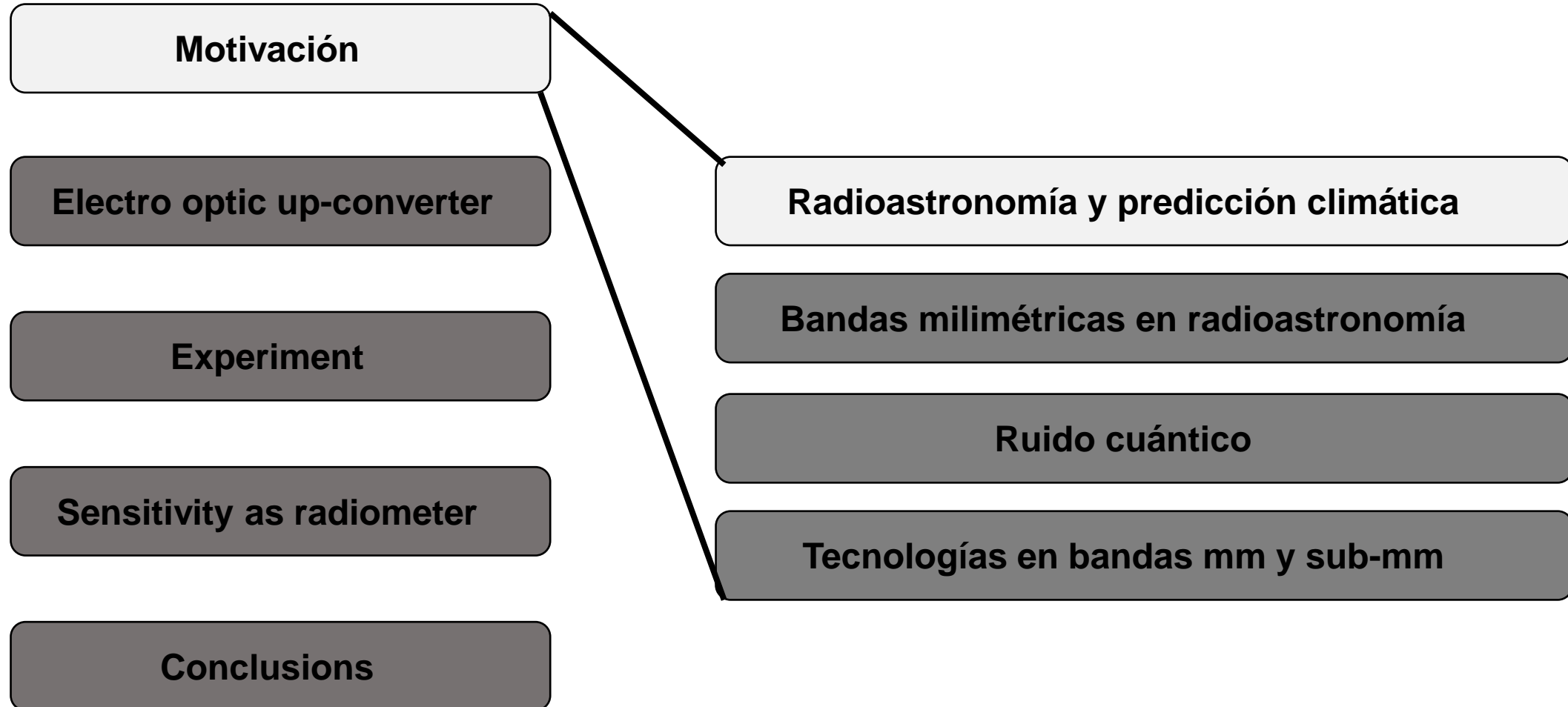
Cada metro cúbico contendría de media una masa equivalente a cinco átomos de hidrógeno, es decir, 10^{-25} gramos. Esta cantidad corresponde a la densidad crítica para que el universo sea casi plano.

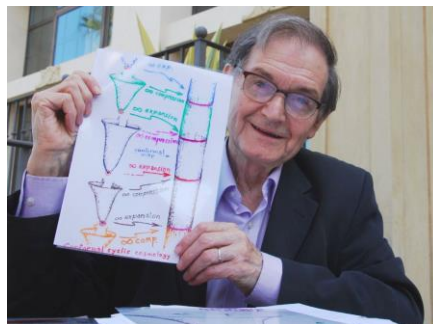
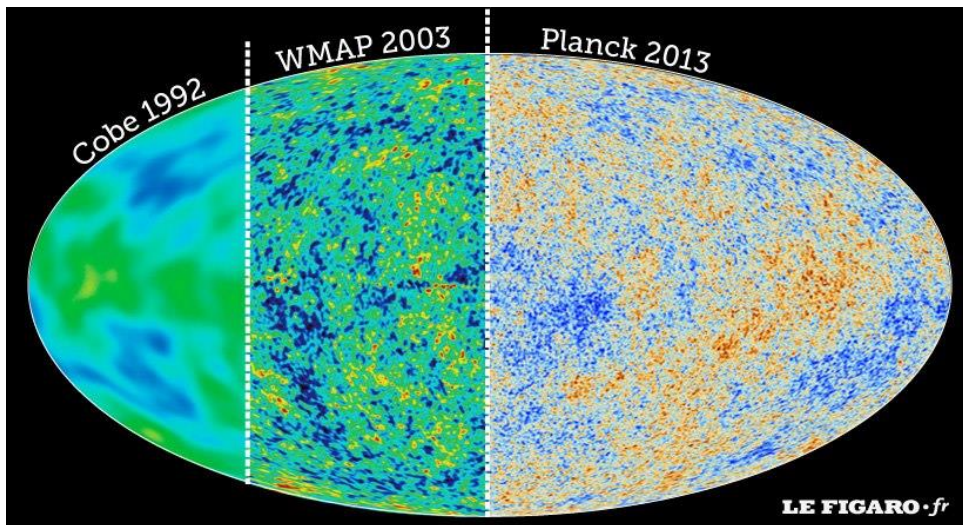


Pero medir la curvatura de un universo no es moco de pavo. Sería algo parecido a intentar calcular la de la Tierra a partir de una pequeña cafetería...





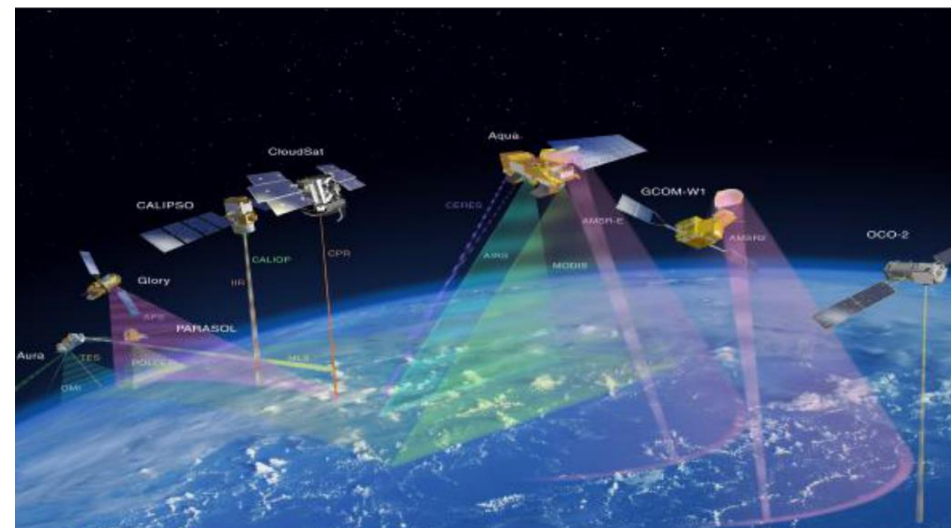
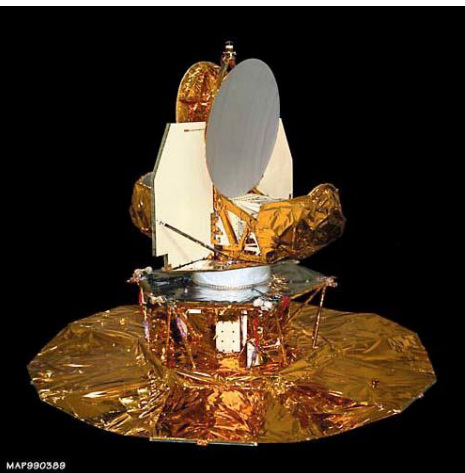


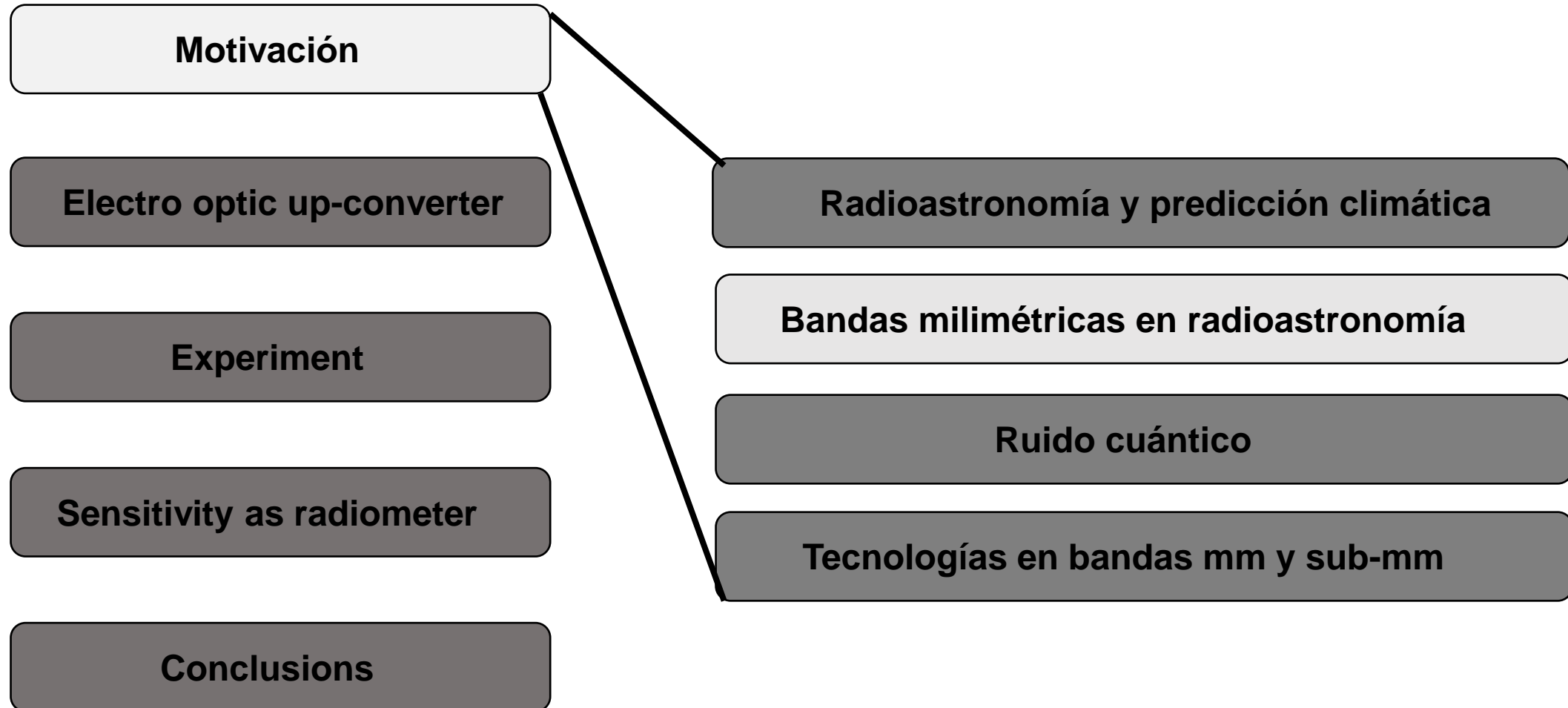


Source: WMAP website

Ultra-low noise instrumentation

Radio astronomy, Earth observation,
planetary missions, ...

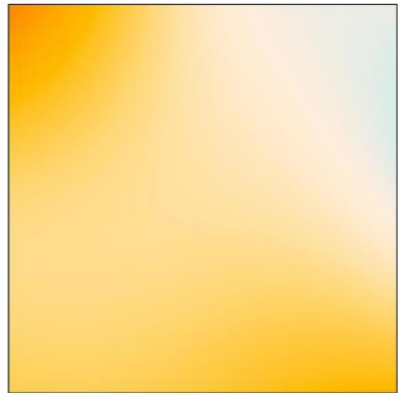
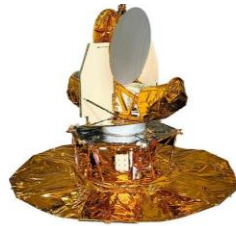




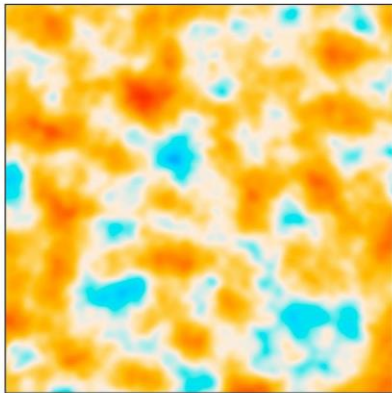
Motivación de las bandas milimétricas en radioastronomía



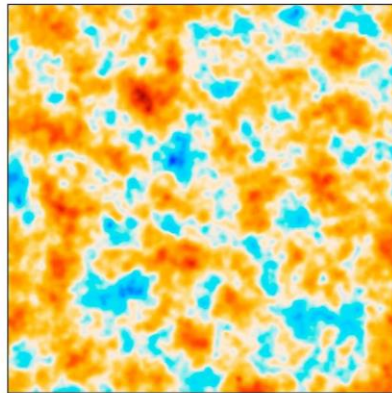
WMAP goal: map the relative CMB temperature over the full sky with a sensitivity of $20 \mu\text{K}$ per 0.3° square pixel.



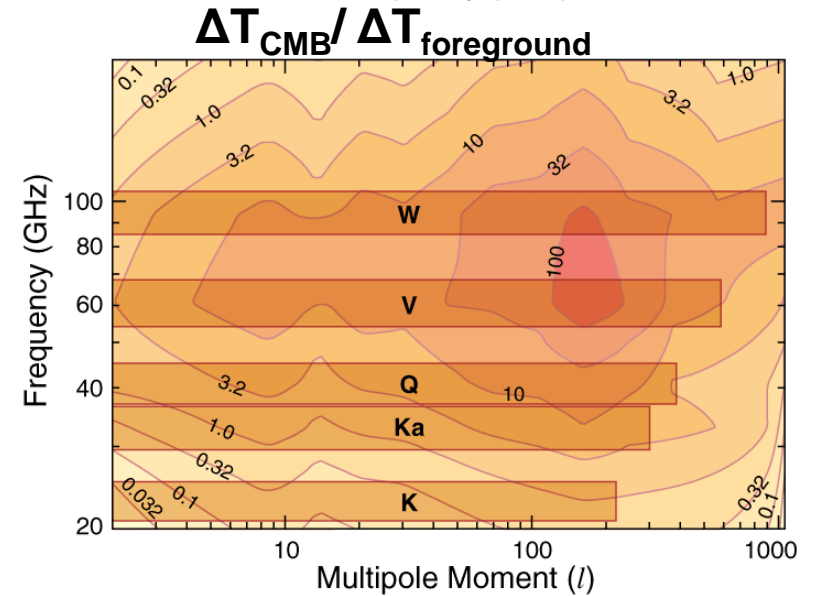
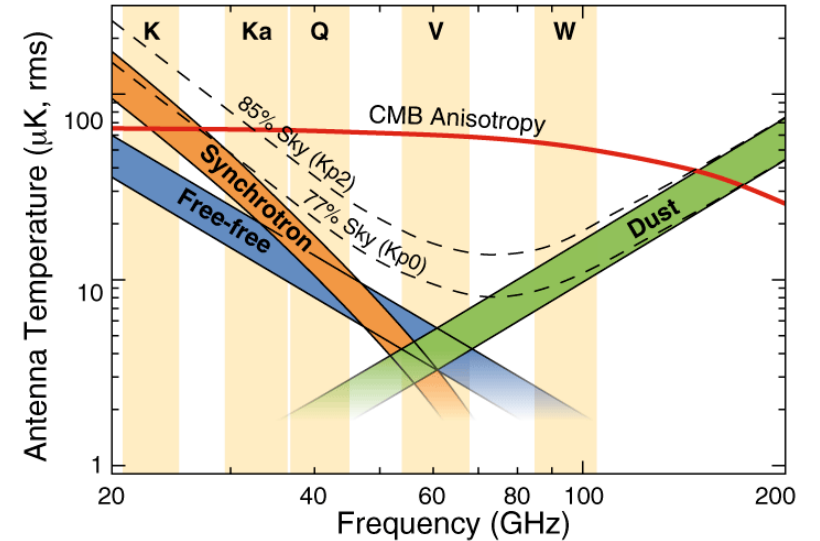
COBE

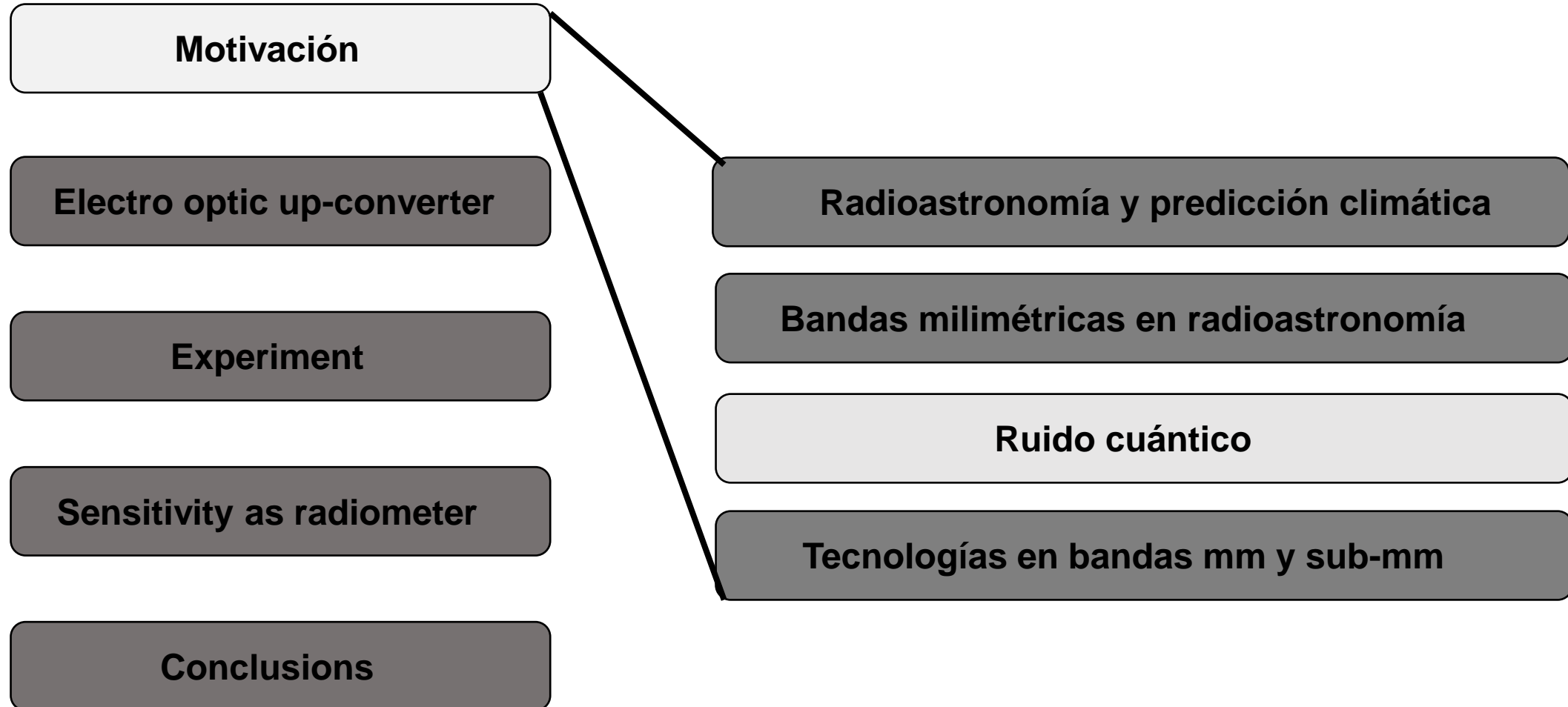


WMAP

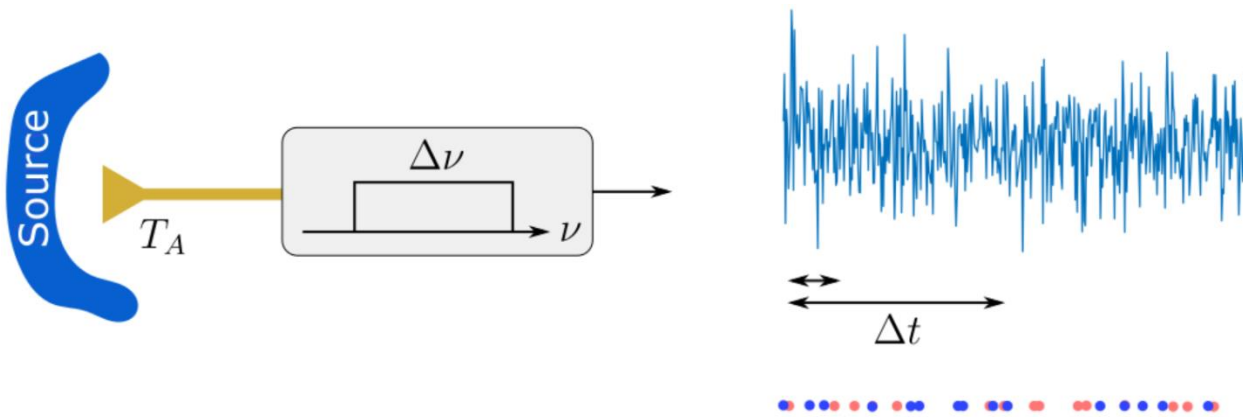
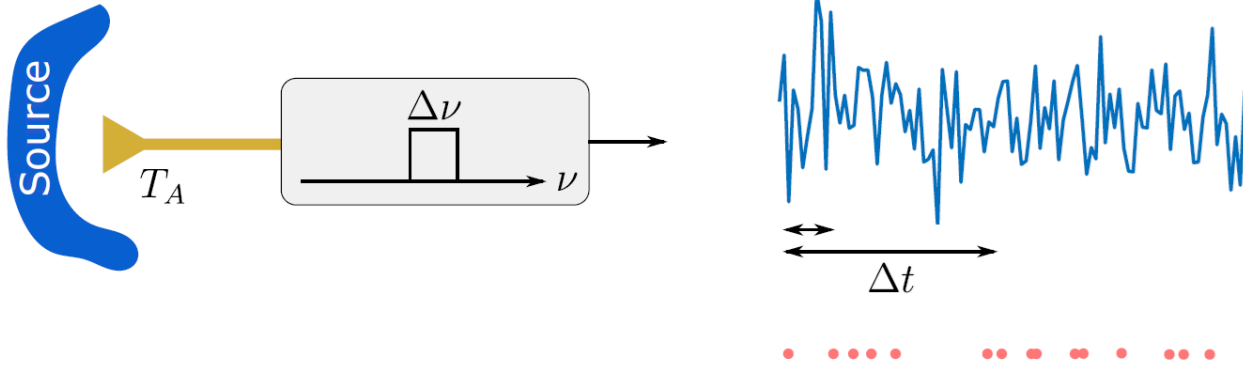


Planck





“Ideal” radiometer: No noise added, and 100% of photons detected



Mandel’s formula



$$\Delta n = \underbrace{\sqrt{\bar{n}}}_{\text{Shot noise}} + \underbrace{\frac{(\bar{n})^2}{\Delta\nu\Delta t}}_{\text{Thermal noise}}$$

$\Delta t \gg 1/\Delta\nu$

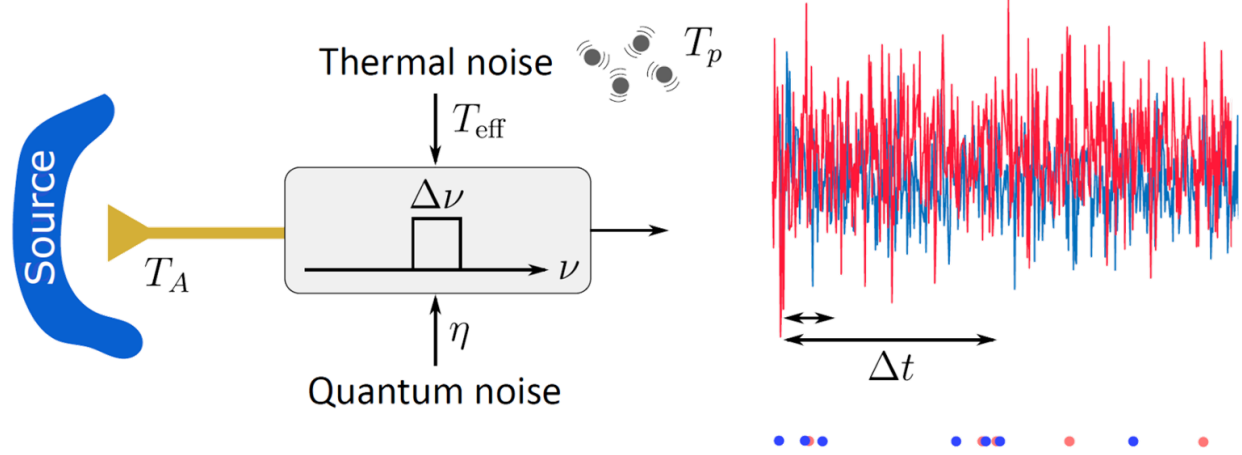
Planck’s formula

$$\Delta n \rightarrow \Delta T$$

Radiometer equation

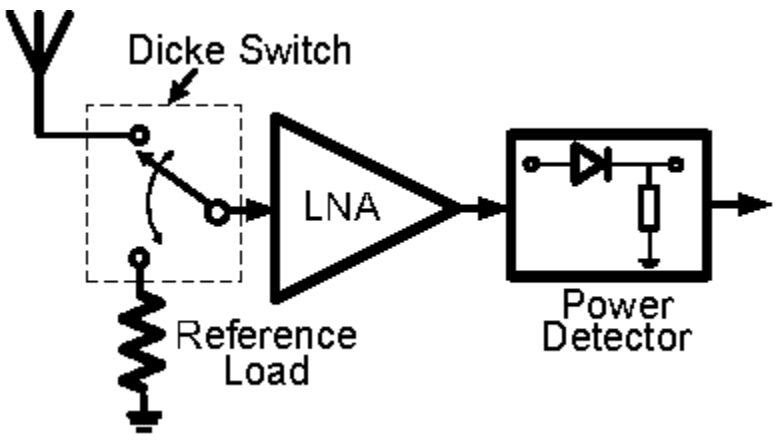
$$\Delta T = \underbrace{\frac{T_A}{\sqrt{\Delta t \Delta \nu}}}_{\text{classical}} \underbrace{\sqrt{\frac{h\nu}{k_B T_A} + 1}}_{\text{quantum}}$$

“Actual” radiometer: Thermal noise added and $\eta < 100\%$, some photons are lost.



Some integration techniques

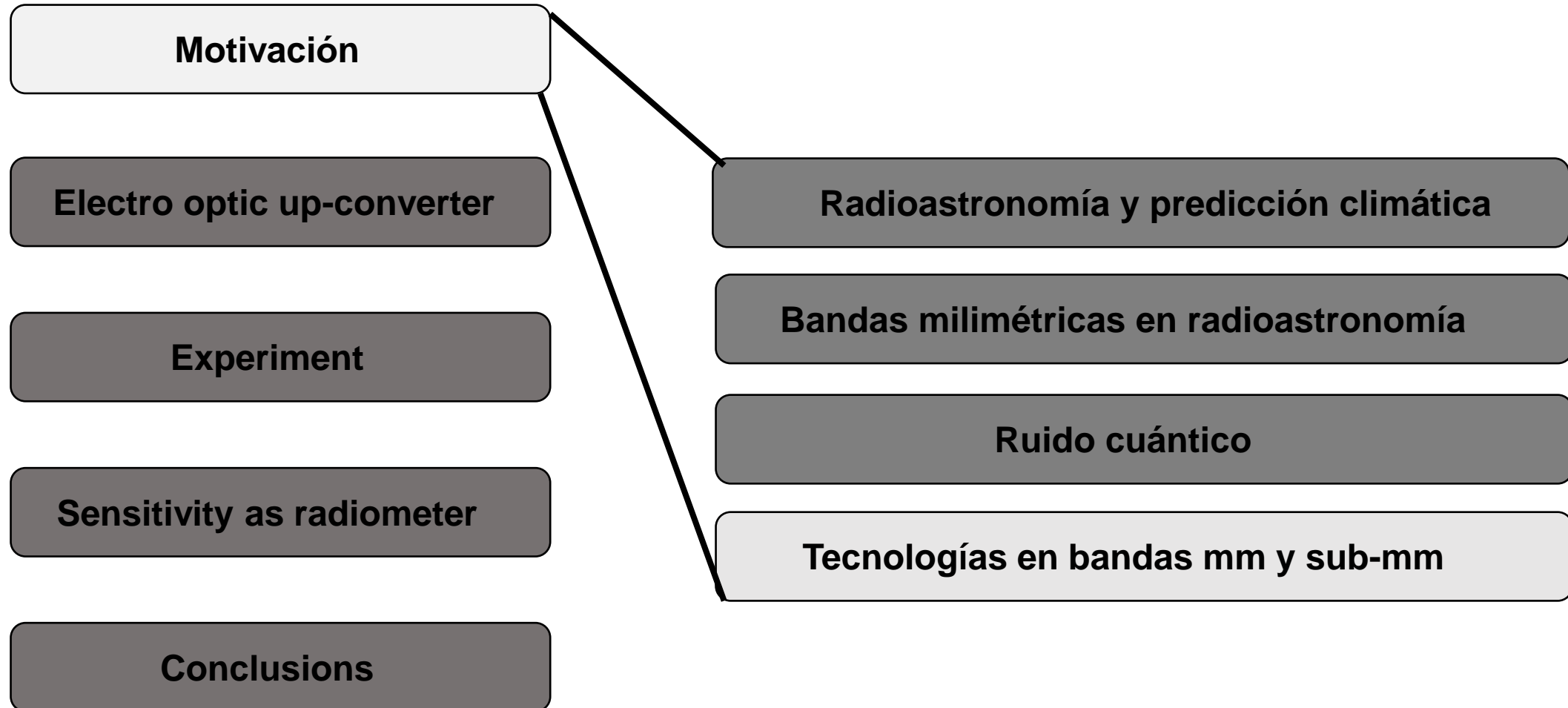
Dicke switching



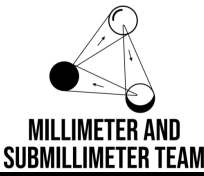
THE REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS VOLUME 17, NUMBER 7 JULY, 1946

The Measurement of Thermal Radiation at Microwave Frequencies

R. H. DICKE*
*Radiation Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts***
 (Received April 15, 1946)



Motivación: tecnologías de detección en bandas mm y sub-mm



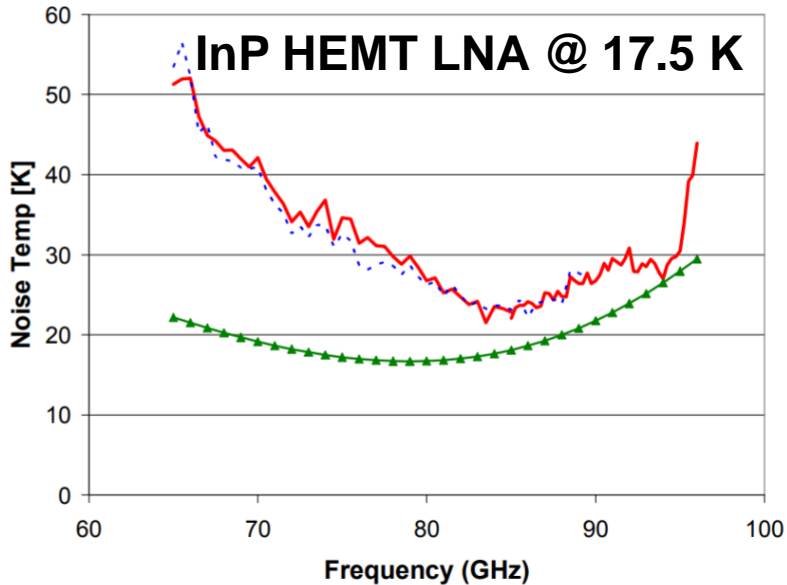
- Bolometric detectors (HEB, TES, ...)
- Superconductor-Insulator-Superconductor (SIS)
- Kinetic Inductance Detectors (KIDs)
- High-electron-mobility transistors (HEMTs)

	Type	Temp	Phase	NEP
Golay	thermal	300K	no	150 pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Pyroelectric	thermal	300K	no	150 pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$
HEB	thermal	mK	no	10^{-19} W/ $\sqrt{\text{Hz}}$
TES	thermal	mK	no	10^{-21} W/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Schottky	field rectifying	300K	yes	pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$
CMOS	FET	300K	yes	pW/ $\sqrt{\text{Hz}}$

Cryogenic operation

A W-Band Low-Noise Amplifier with 22K Noise Temperature

Eric W. Bryerton¹, Xiaobing Mei², Young-Min Kim², William Deal², Wayne Yoshida², Mike Lange², Jansen Uyeda², Matthew Morgan¹, and Richard Lai²



11/12/2023

Photon-counting detectors require sub-Kelvin cryogenic operation

Extremely Low-Noise Cryogenic Amplifiers for Radio Astronomy: Past, Present and Future

Marian W. Pospieszalski

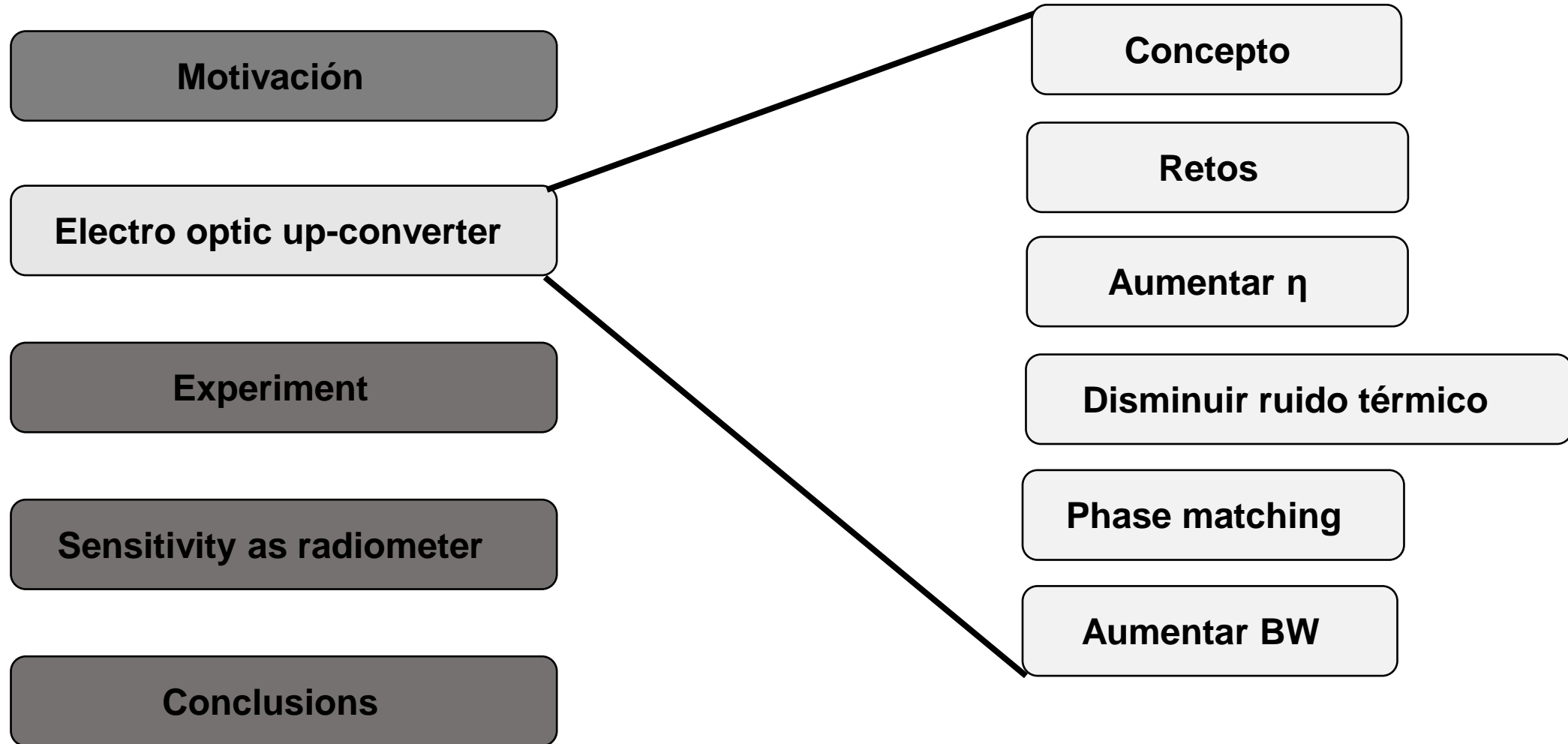
"I hope, after reading the paper, you will be convinced that there is a limit on the minimum noise temperature of FETs in general (based on their principle of operation) and for InP cryogenic HEMTs that limit is about 4-4.5 time quantum noise. We have practically reached it."

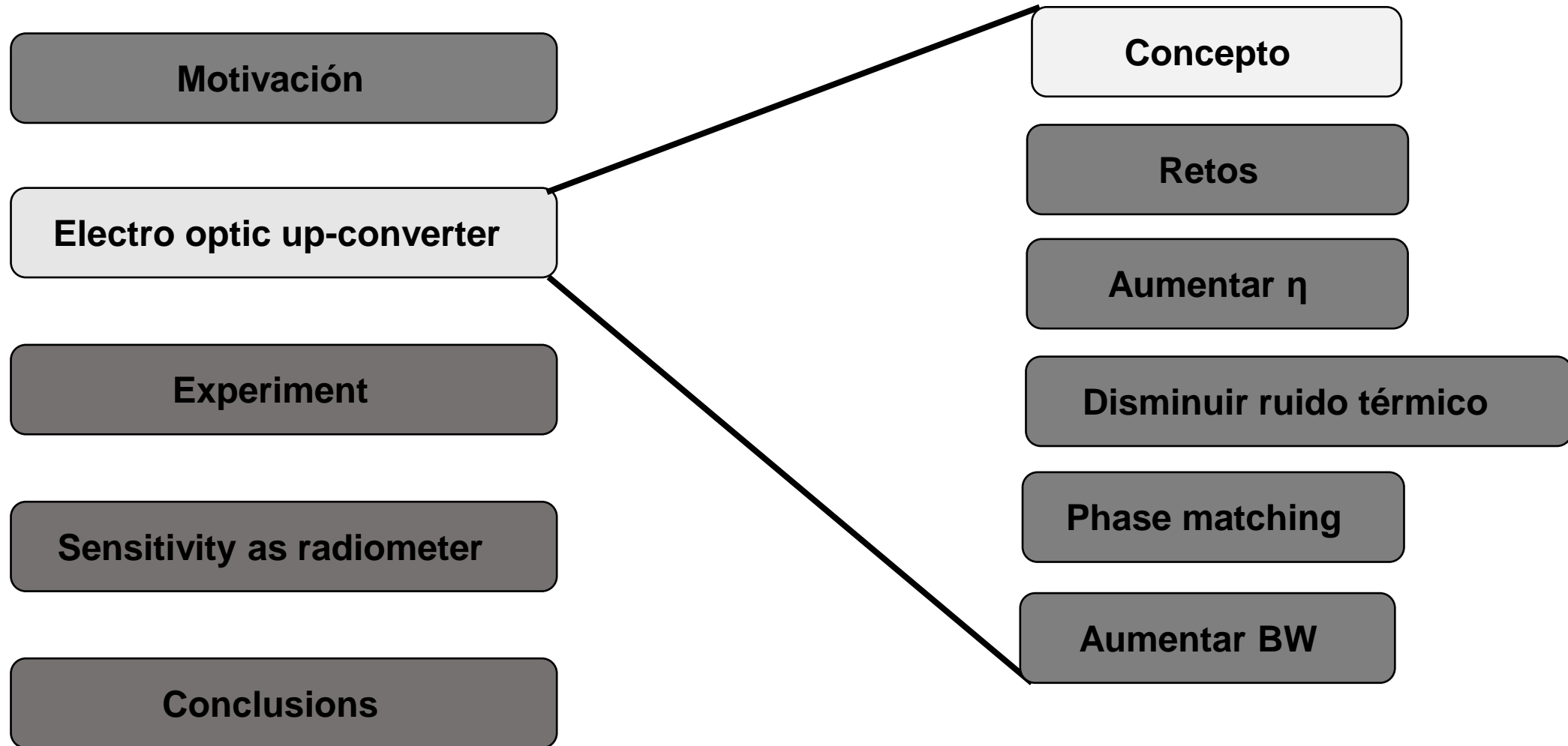


University of Colorado Boulder

Luis Enrique García Muñoz

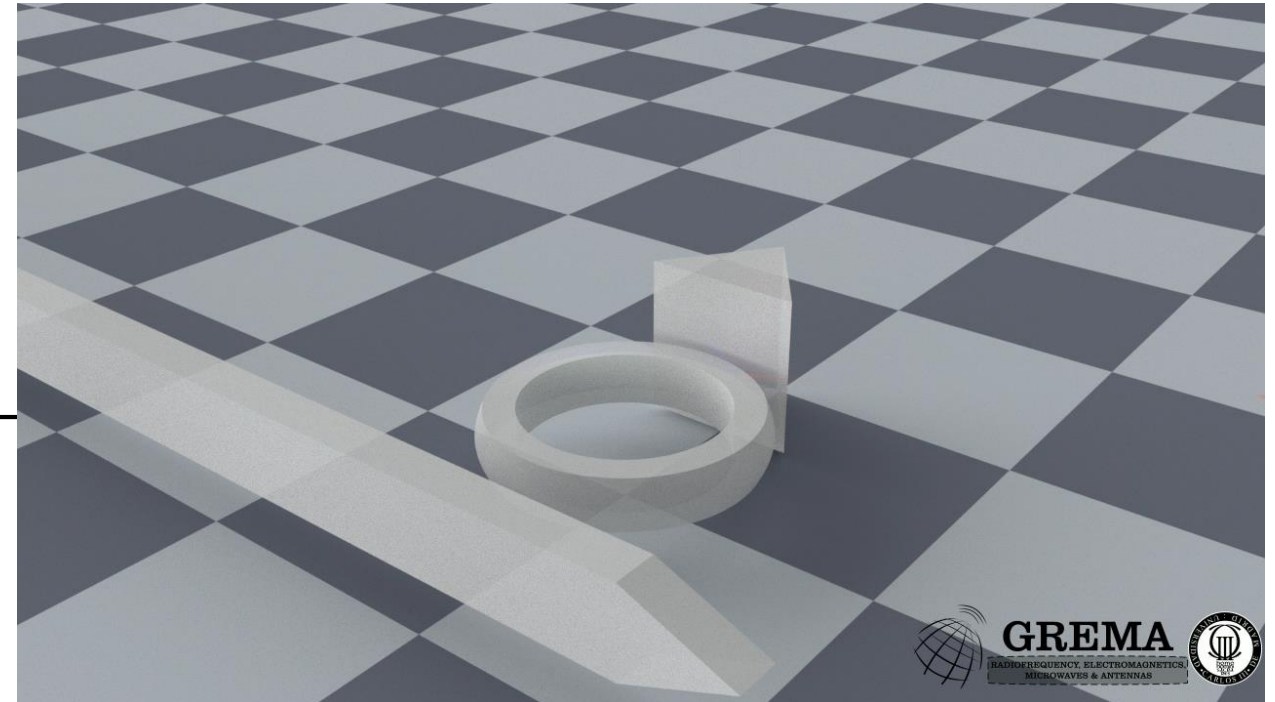
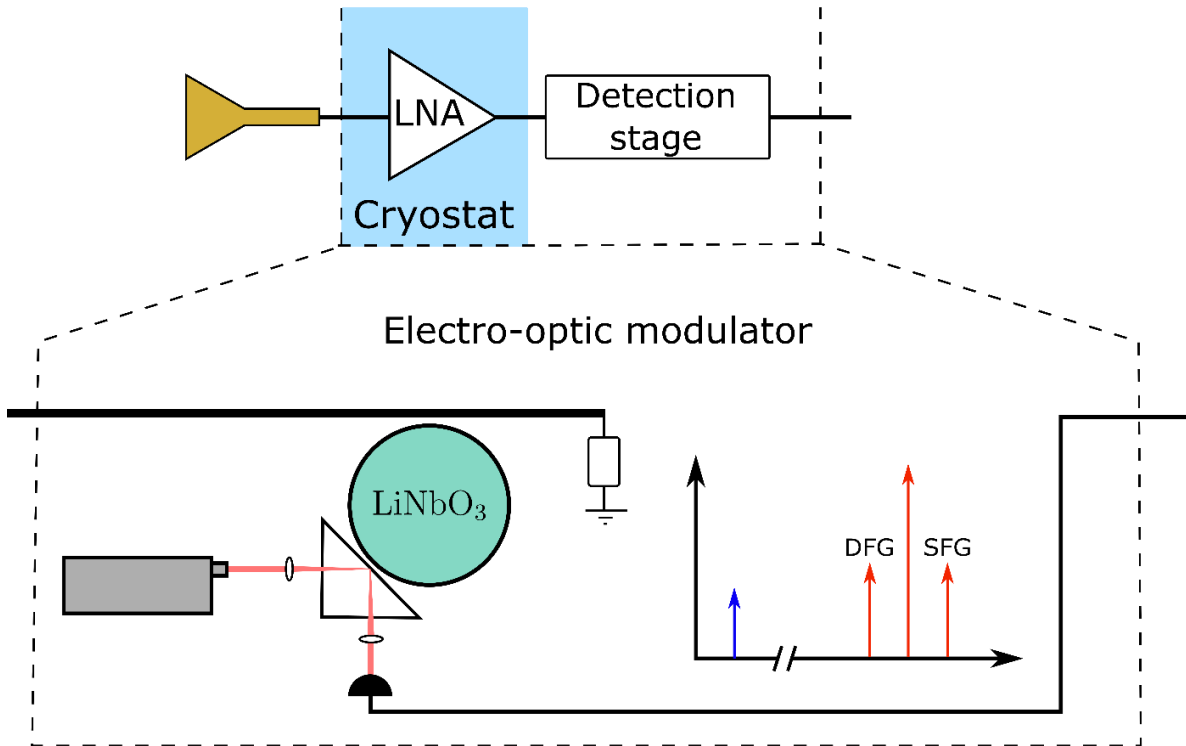


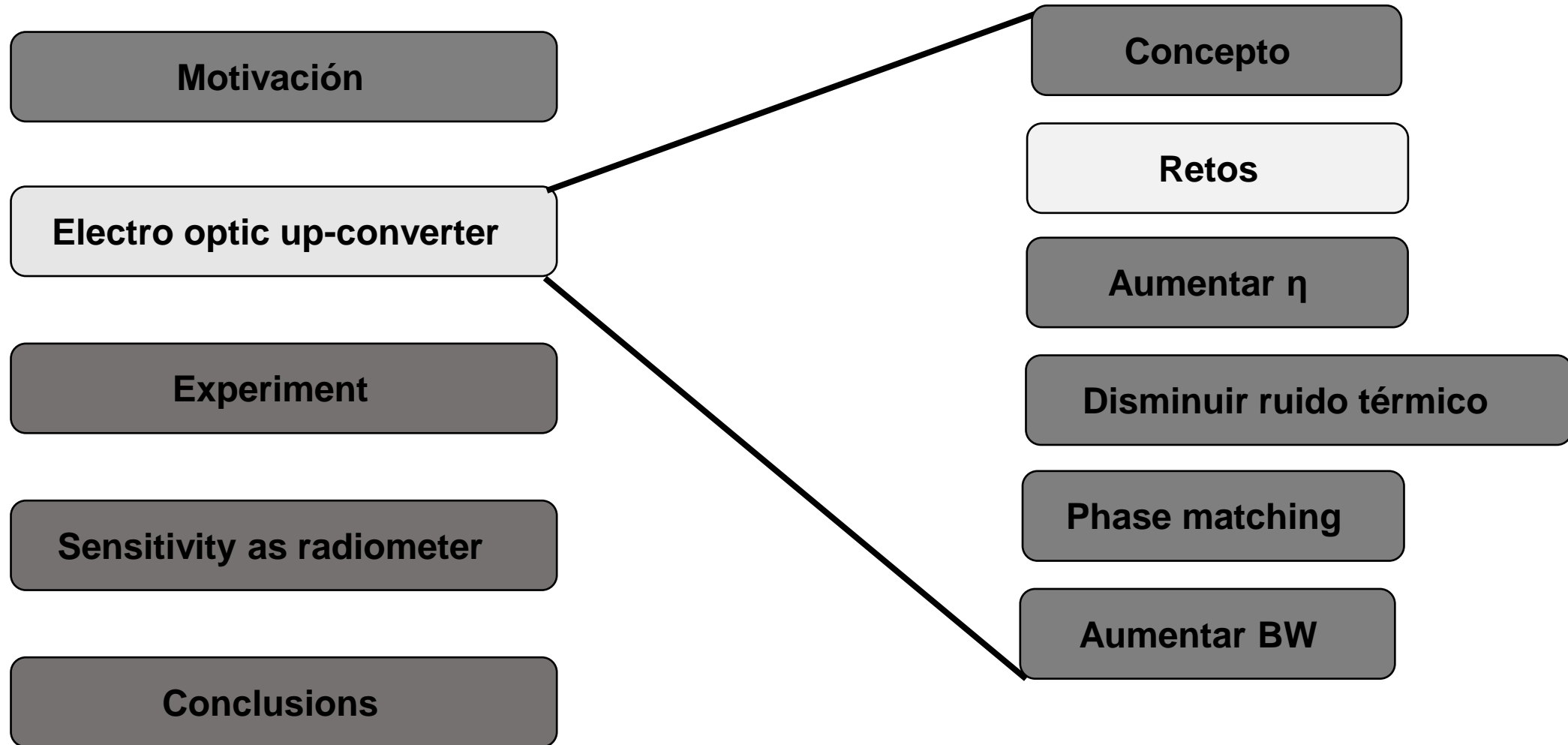




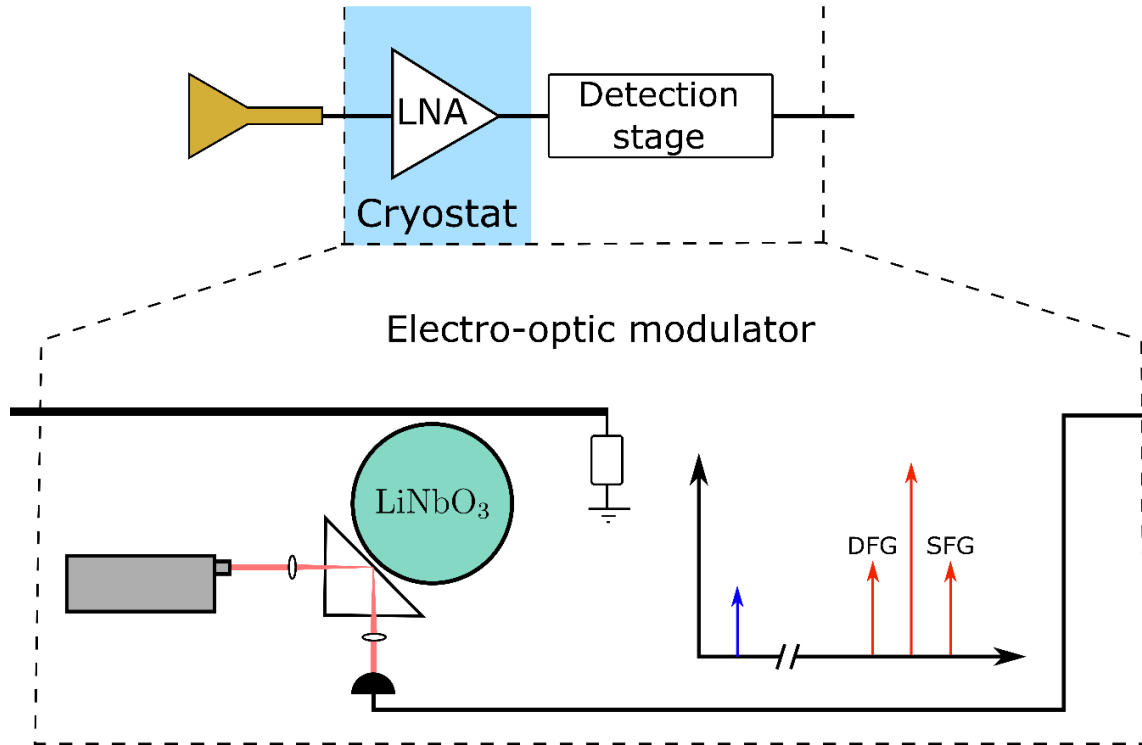
Electro-optic up-converter: concepto

Good candidate for low-noise detection with less strict cooling requirements





Electro-optic up-converter: challenges

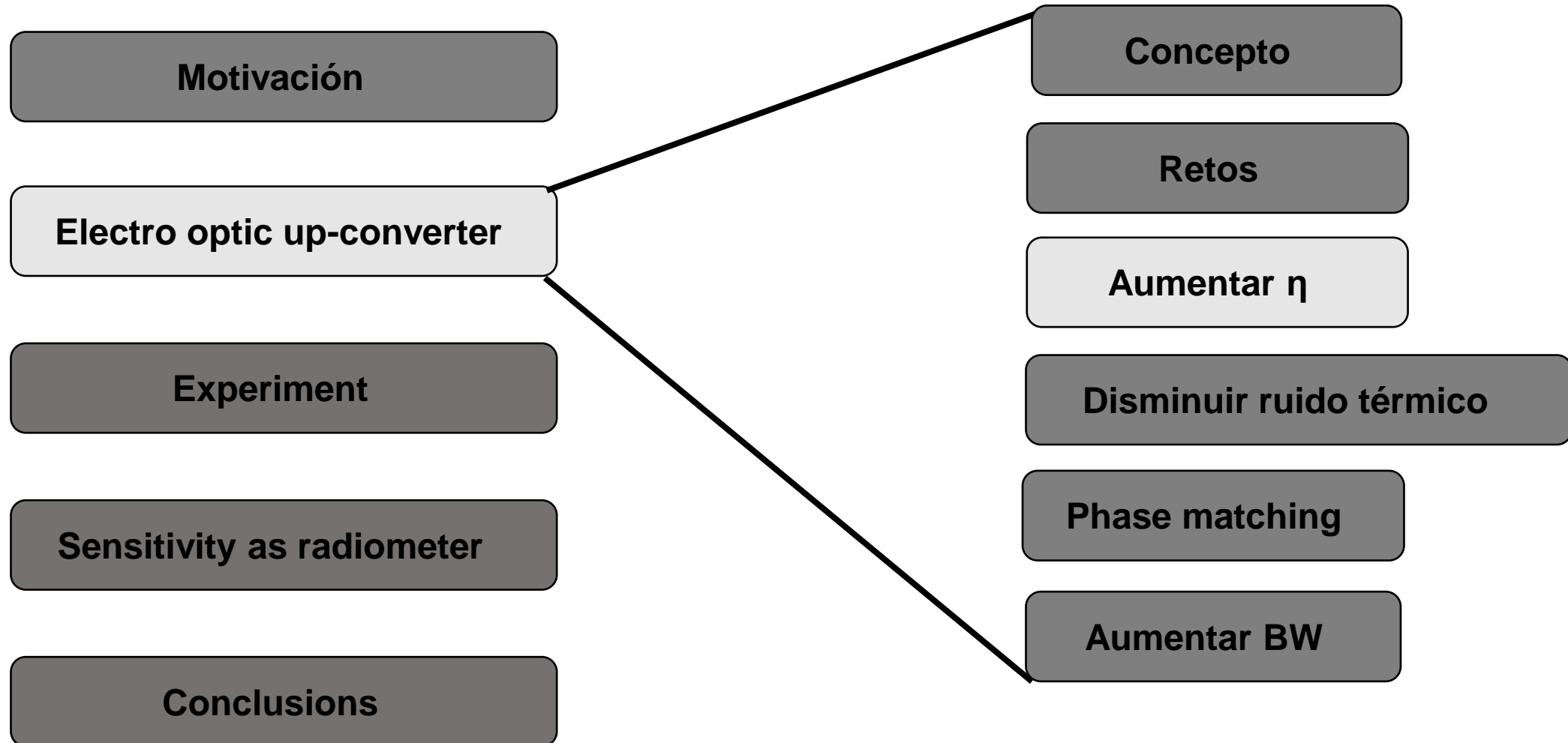


Challenges:

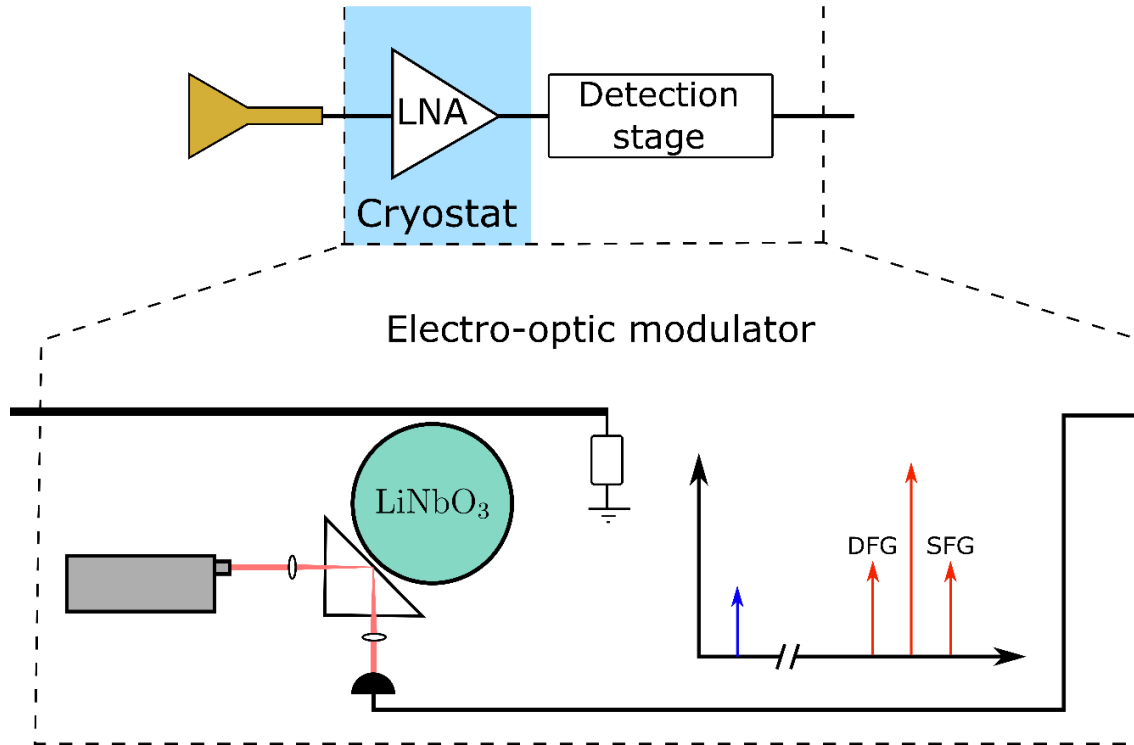
1. High conversion efficiency:

$$\eta = \frac{\# \text{ of upconverted photons}}{\# \text{ of input microwave photons}}$$

2. Avoid thermal noise being upconverted
3. Phase matching
4. High upconversion bandwidth



Electro-optic up-converter: challenges



Challenges:

1. High conversion efficiency:

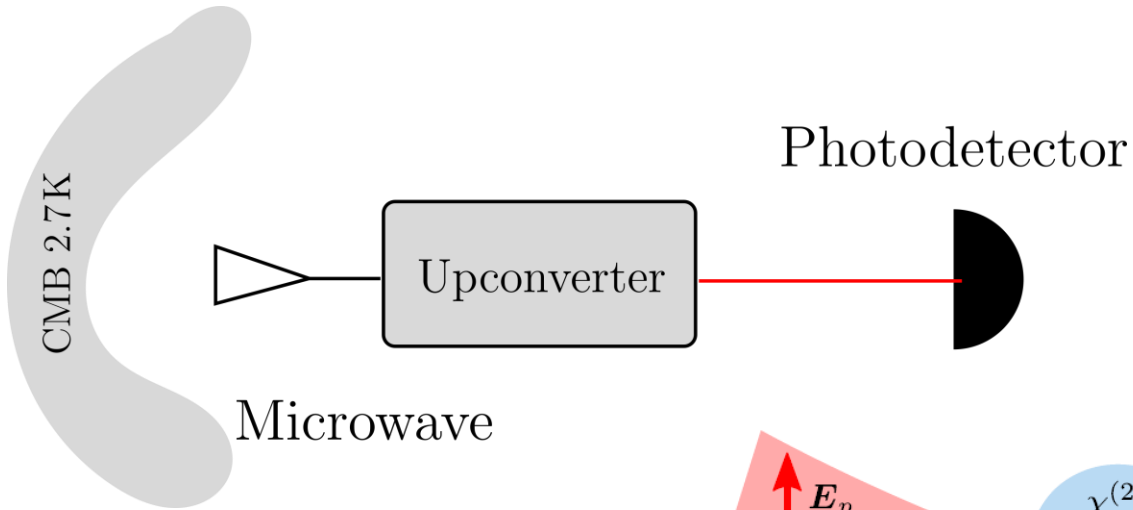
$$\eta = \frac{\# \text{ of upconverted photons}}{\# \text{ of input microwave photons}}$$

2. Avoid thermal noise being upconverted

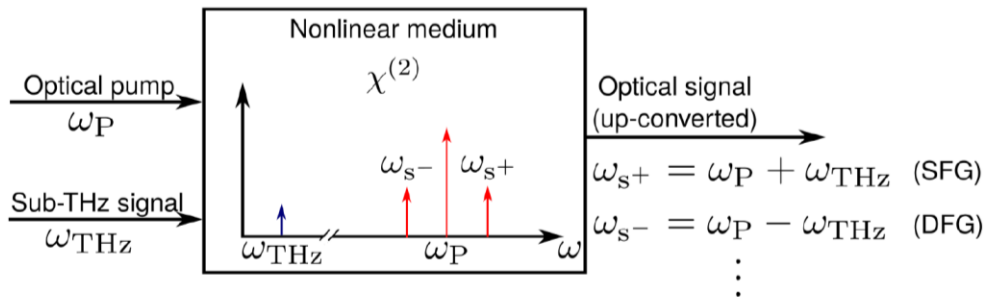
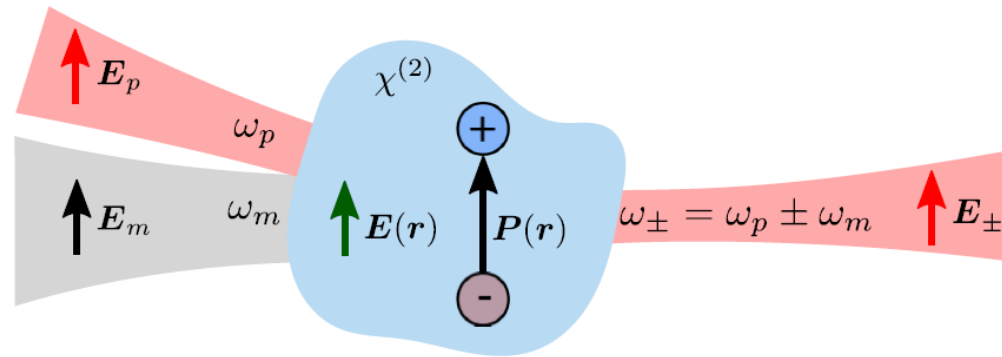
3. Phase matching

4. High upconversion bandwidth

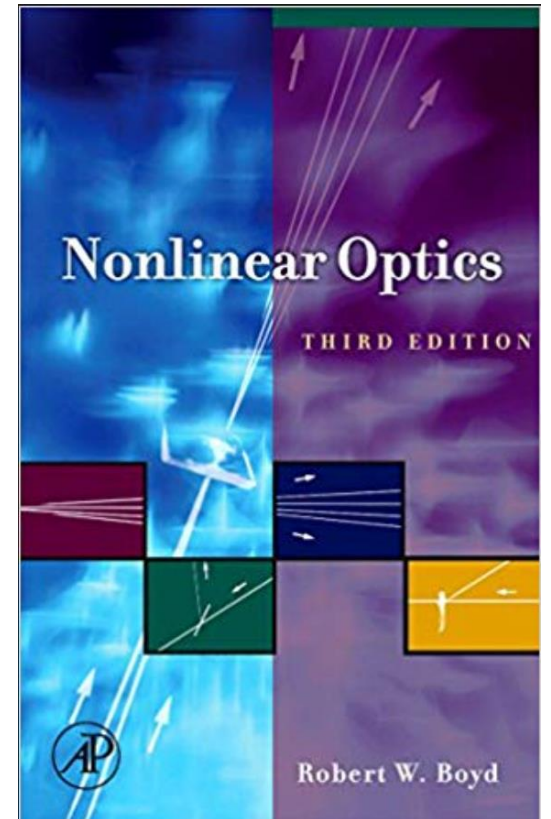
Electro-optic up-converter



The signal is up-converted into the optical domain where it is easier to detect with available high-sensitivity optical receivers.



$$P(r) = \epsilon_0 E(r) + \epsilon_0 \chi^{(2)} E^2(r)$$



Quantum Electronics **32**(5) 377–400 (2002)

©2002 Kvantovaya Elektronika and Turpion Ltd

REVIEW

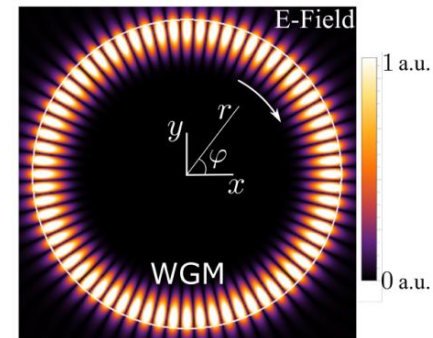
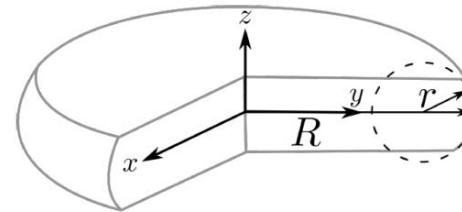
PACS numbers: 42.25.Bs; 42.25.Gy

DOI: 10.1070/QE2001v031n05ABEH002205

Whispering-gallery waves

A.N. Oraevsky

- Travelling-wave resonator
- The circulating power can result significantly higher than the incoming power
- The effective path of the interaction is increased in the WGM resonator
- Three WGMs are excited (optical pump, sub-THz signal, up-converted signal)

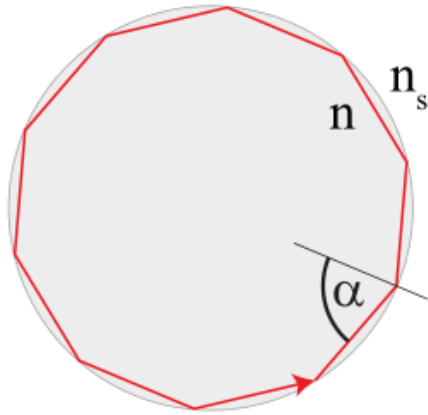


Electro-optic up-converter: WGM resonators

Q factors are only limited by host material

strong confinement of the light

→ great for nonlinear frequency mixing



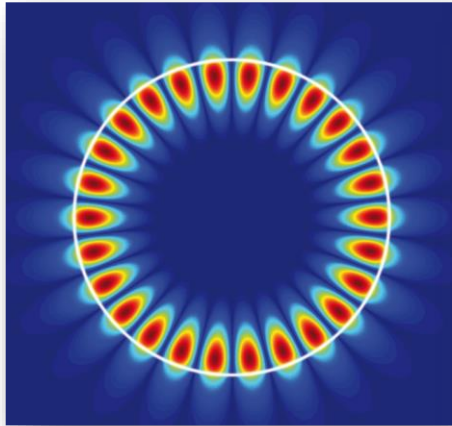
resonance condition:

$$2\pi Rn \approx m\lambda$$

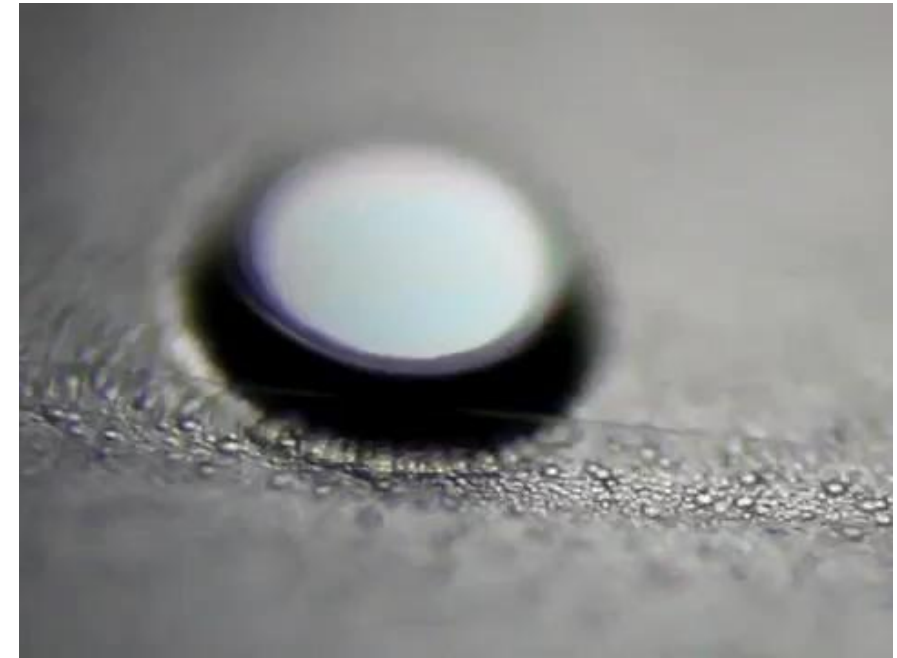
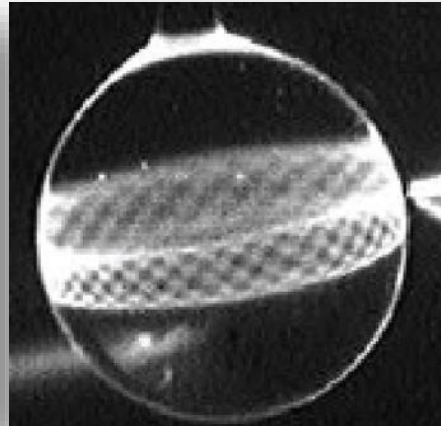
total internal reflection:

$$\sin \alpha \geq \frac{n_s}{n} \Rightarrow n > n_s$$

wave picture



actual picture



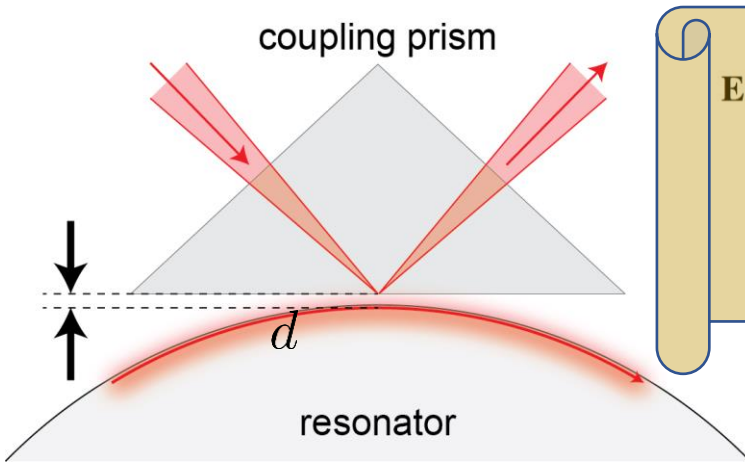
evanescent field

→ interaction with the environment

Gorodetsky et al,
Opt. Comm. 113, 133-143 (1994)

Electro-optic up-converter: how to couple light in a WGM resonator

Frustrating the TIR by another dielectric



Efficient and Coherent Conversion of 80 GHz Signals into the Optical Domain Using a Whispering Gallery Mode Resonator

Florian Sedlmeir^{1,2,5}, Alfredo Rueda^{1,2}, Sascha Preu³,
L. Enrique García-Muñoz⁴, Harald G.L. Schwefel⁵

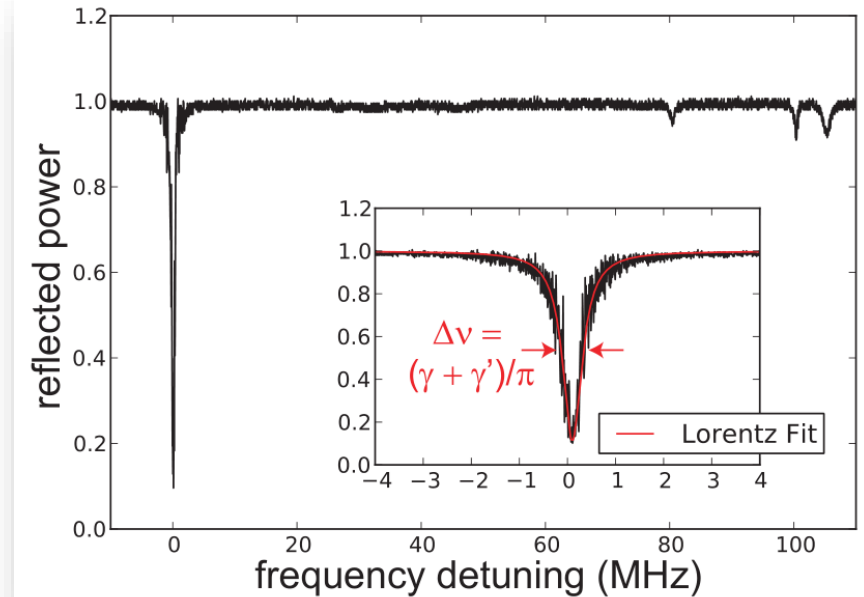
coupling condition

$$n_{\text{prism}} > n_{\text{resonator}}$$

tunable coupling rate: $\gamma \propto e^{-\kappa d}$

- tunable bandwidth
- optimize nonlinear experiments

Spectrum in reflection



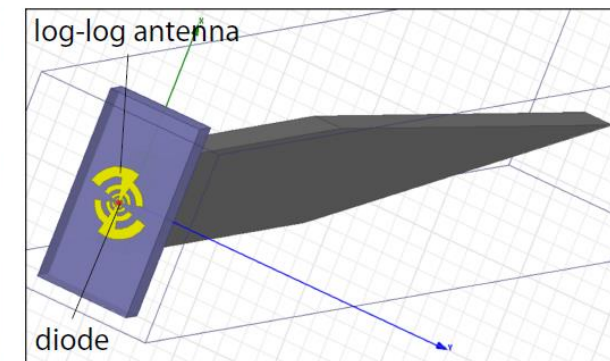
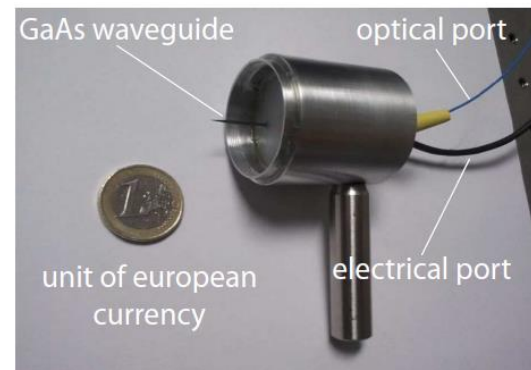
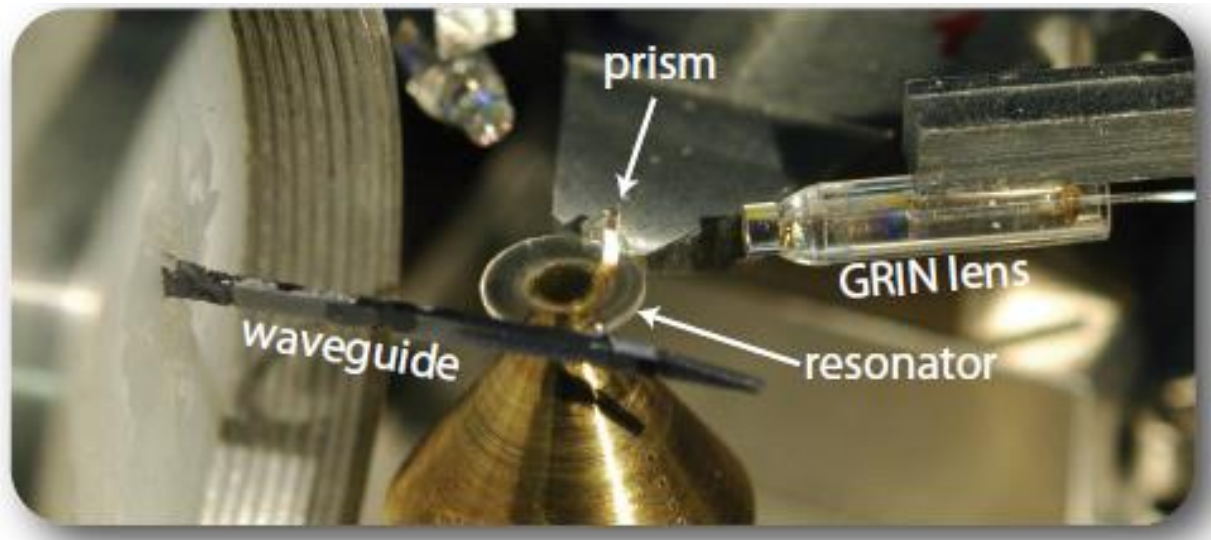
$$Q = \frac{\nu}{\Delta\nu}$$

typical values:

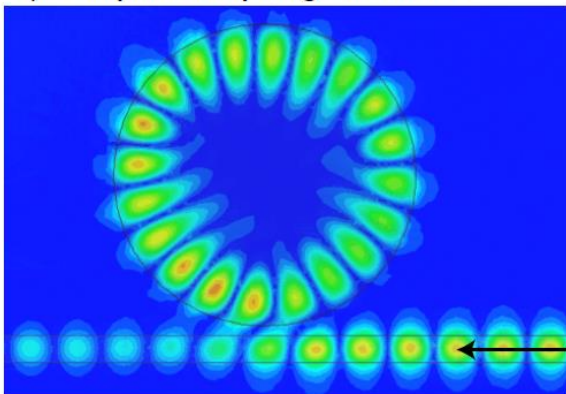
$$Q \approx 10^7 \dots 10^9$$



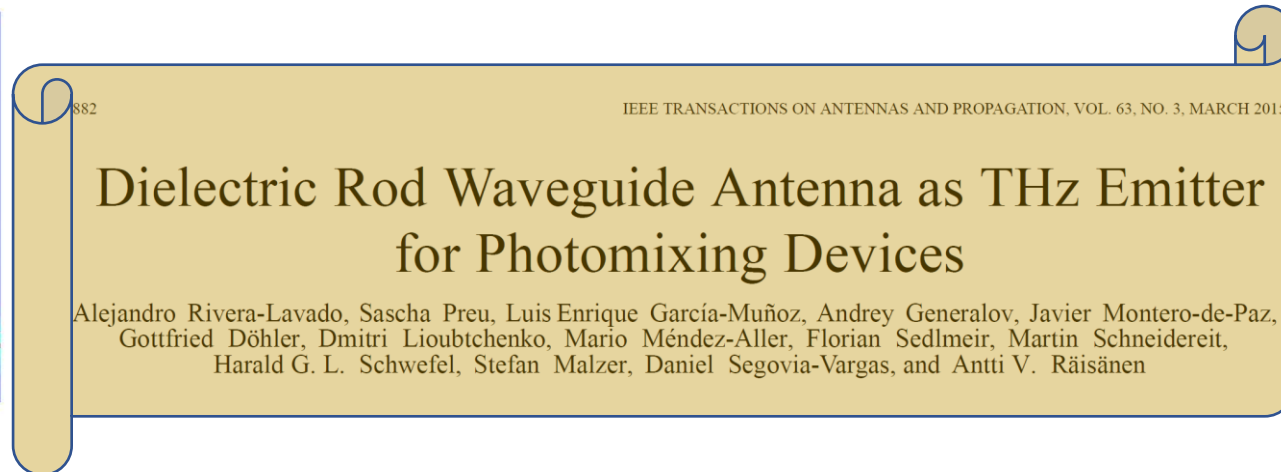
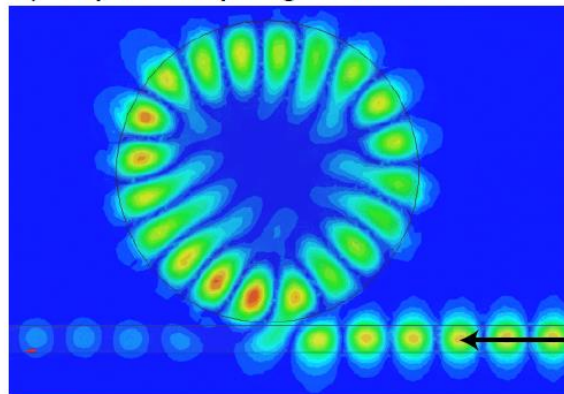
Electro-optic up-converter: how to couple mm-waves in a WGM resonator



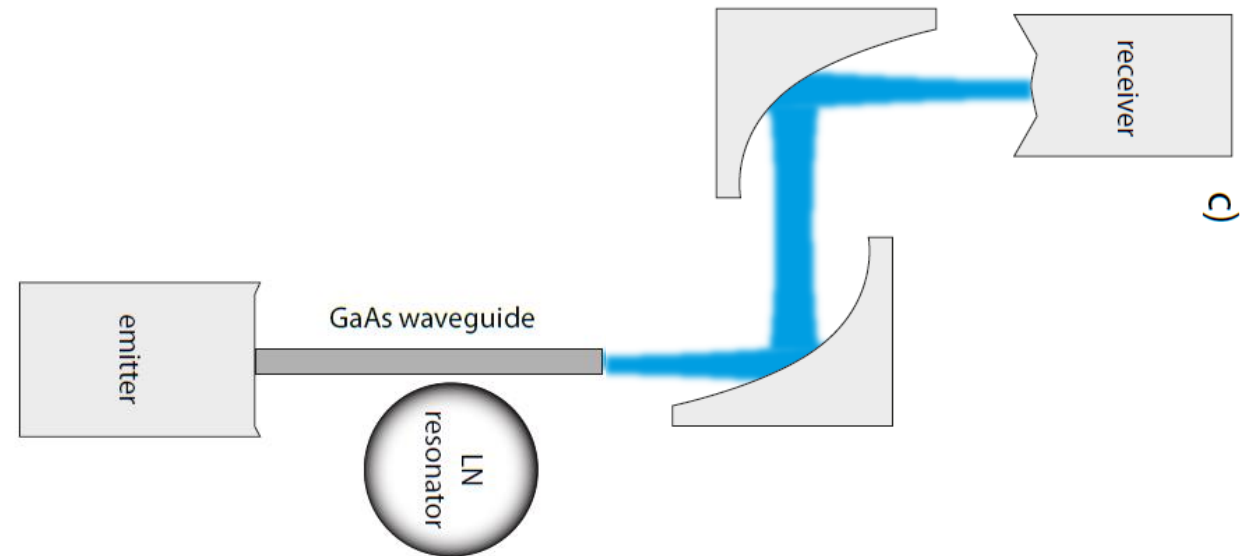
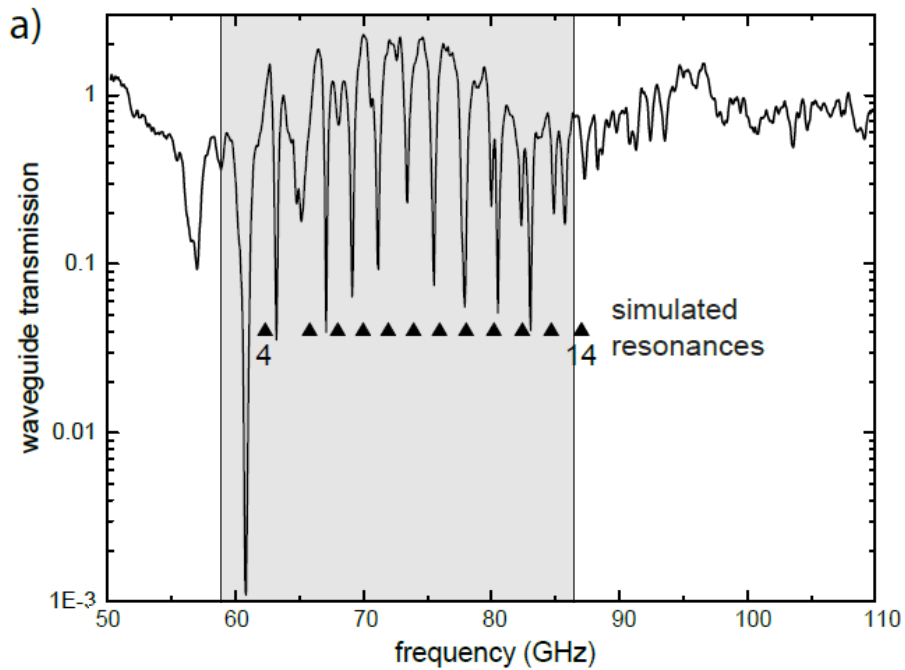
a) 200 μ m coupling distance



b) 20 μ m coupling distance



Electro-optic up-converter: how to couple mm-waves in a WGM resonator



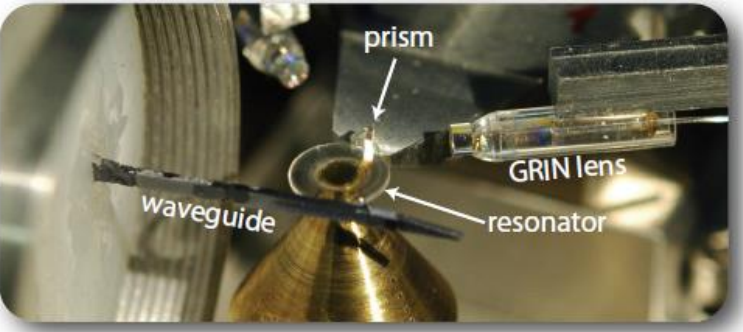
532

IEEE TRANSACTIONS ON TERAHERTZ SCIENCE AND TECHNOLOGY, VOL. 3, NO. 5, SEPTEMBER 2013

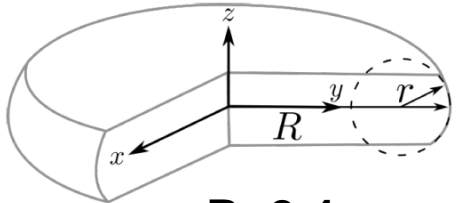
From Arrays of THz Antennas to Large-Area Emitters

Gottfried H. Döhler, Luis Enrique Garcia-Muñoz, Sascha Preu, Stefan Malzer, Sebastian Bauerschmidt, Javier Montero-de-Paz, Eduardo Ugarte-Muñoz, Alejandro Rivera-Lavado, Vicente Gonzalez-Posadas, and Daniel Segovia-Vargas, *Member, IEEE*

Electro-optic up-converter: experimento



$n_{\text{prism}}=2,42$
 $n_{\text{laser}}=2,14$
 $n_{\text{mw}}=5$

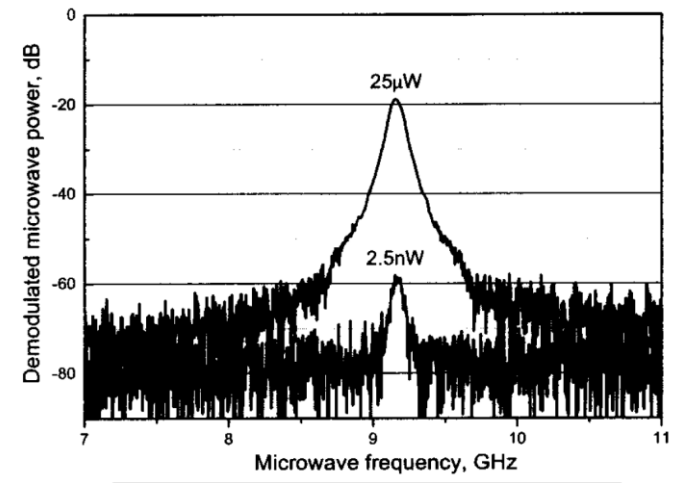
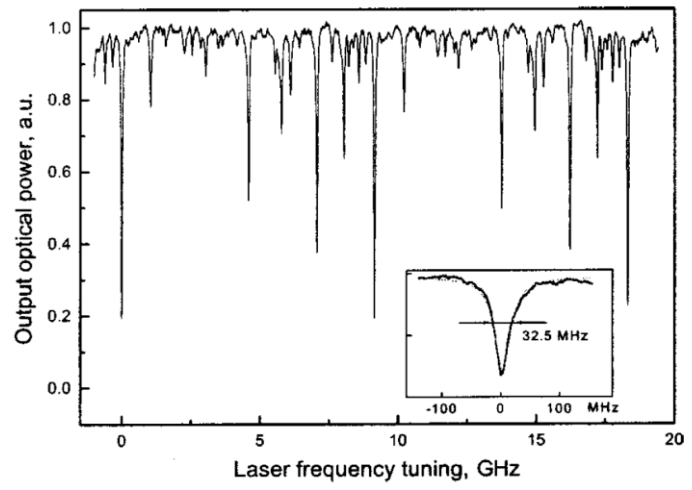


$Q_{\text{laser}}=5 \times 10^6$ Finesse=300
 $Q_{\text{mw}}=100$ BW=150 MHz

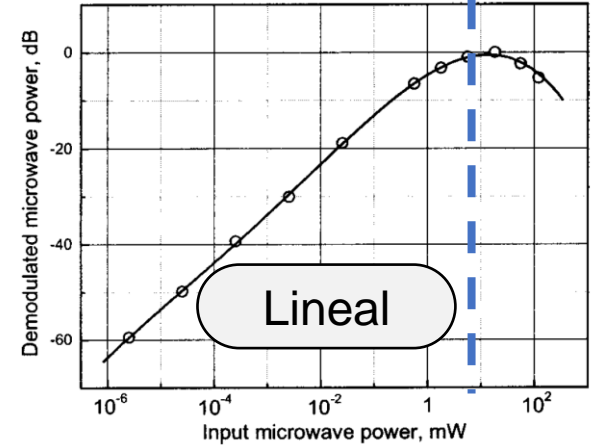
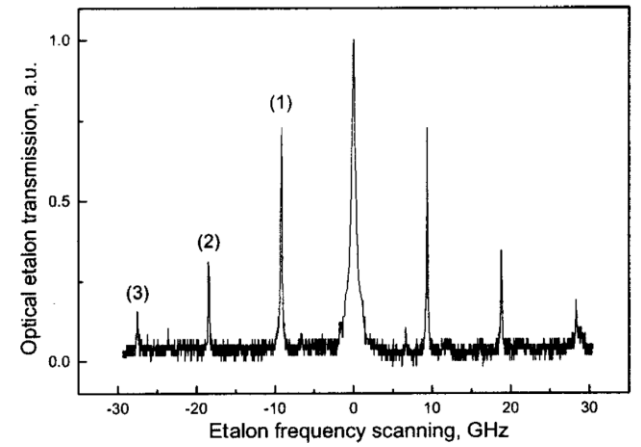
$R=2,4 \text{ mm}$ $r=150 \mu\text{m}$
 1550 nm laser power = 2...5 mW
 Optical output efficiency = 10 dB
 FSR=9,155GHz

Efficient and Coherent Conversion of 80 GHz Signals into the Optical Domain Using a Whispering Gallery Mode Resonator
 Florian Sedlmeir^{1,2,5}, Alfredo Rueda^{1,2}, Sascha Preu³, L. Enrique García-Muñoz⁴, Harald G.L. Schwefel⁵

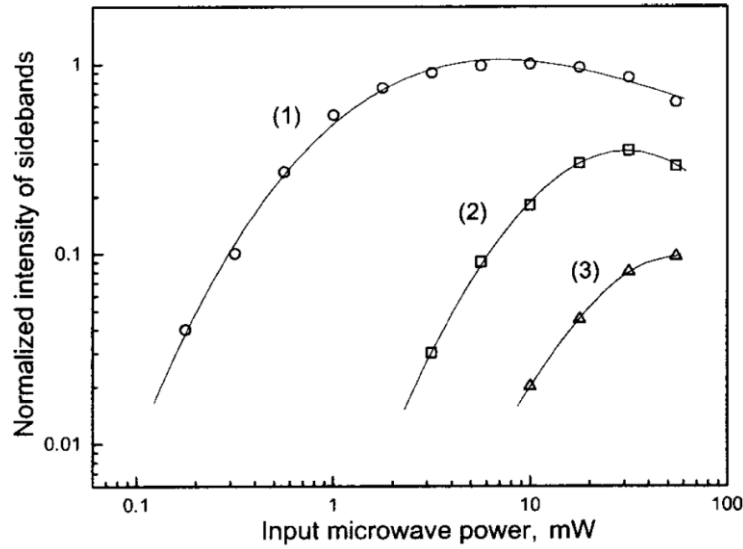
11/12/2023



$P_{\text{mw}} \text{ minimum} = 1 \text{ nW}$

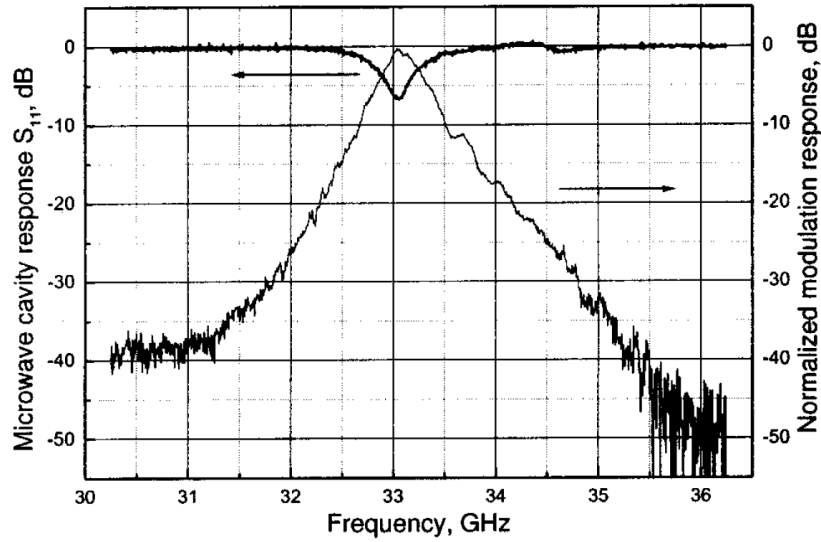


Electro-optic up-converter: experimento



Efficient and Coherent Conversion of 80 GHz Signals into the Optical Domain Using a Whispering Gallery Mode Resonator

Florian Sedlmeir^{1,2,5}, Alfredo Rueda^{1,2}, Sascha Preu³, L. Enrique García-Muñoz⁴, Harald G.L. Schwefel⁵

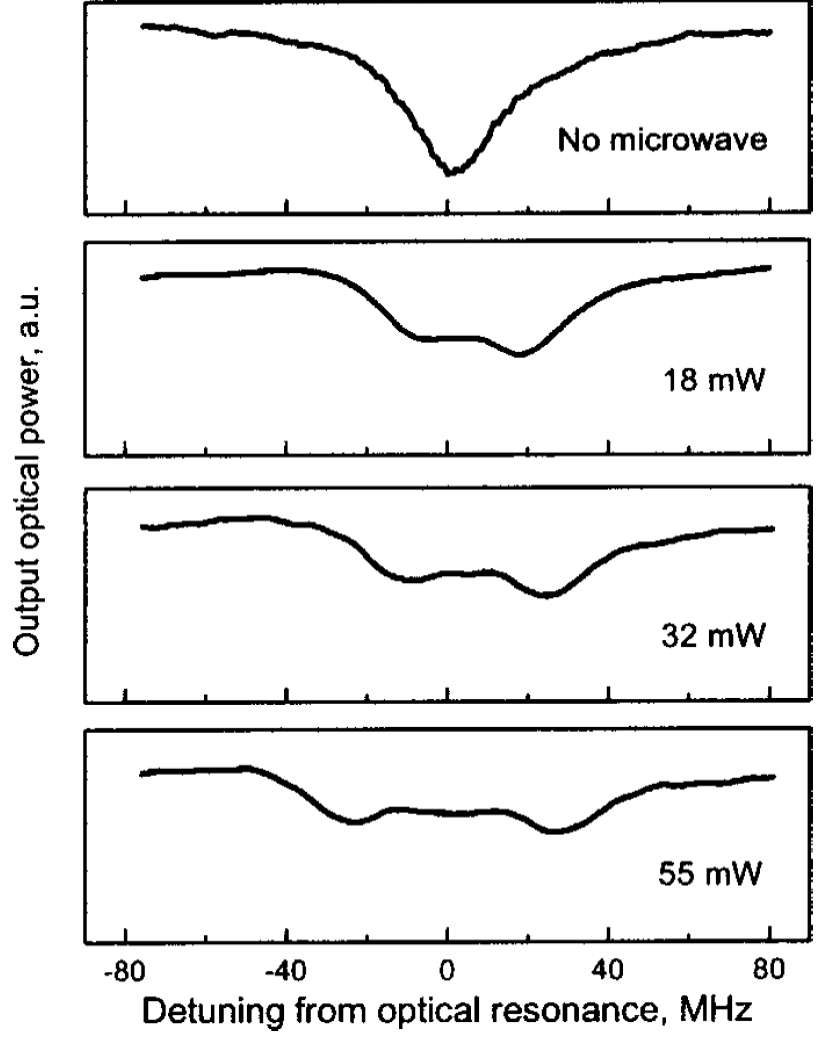


Research Article | Vol. 24, No. 23 | 14 Nov 2016 | OPTICS EXPRESS 26503

Optics EXPRESS

Maximization of the optical intra-cavity power of whispering-gallery mode resonators via coupling prism

G. A. SANTAMARÍA-BOTELLO,¹ L. E. GARCÍA MUÑOZ,^{1*} F. SEDLMEIR,² S. PREU,³ D. SEGOVIA-VARGAS,¹ K. ATIA ABDALMALAK,¹ S. LLORENTE ROMANO,¹ A. GARCÍA LAMPÉREZ,¹ S. MALZER,⁴ G. H. DÖHLER,⁴ H. G. L. SCHWEFEL,² AND H. B. WEBER⁴



$$\eta_{ph} = \frac{2P_p}{\epsilon_0 \omega_{\pm}} \frac{\chi^{(2)2} Q_p^2 Q_m}{n_p^4 n_m^2} \frac{E_m'^2(\mathbf{r}_p)}{V_m} (1 - S_{11}^2 - S_{21}^2)$$

Research Article

Vol. 24, No. 23 | 14 Nov 2016 | OPTICS EXPRESS 26503

Optics EXPRESS

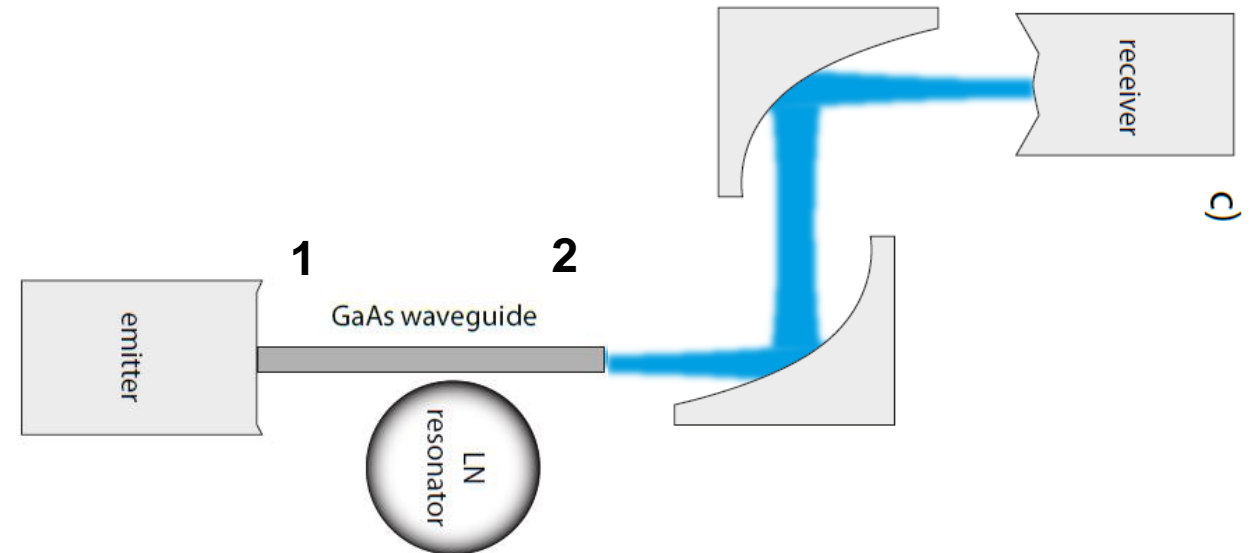
Maximization of the optical intra-cavity power of whispering-gallery mode resonators via coupling prism

G. A. SANTAMARÍA-BOTELLO,¹ L. E. GARCÍA MUÑOZ,^{1,*} F. SEDLMEIR,² S. PREU,³ D. SEGOVIA-VARGAS,¹ K. ATIA ABDALMALAK,¹ S. LLORENTE ROMANO,¹ A. GARCÍA LAMPÉREZ,¹ S. MALZER,⁴ G. H. DÖHLER,⁴ H. G. L. SCHWEFEL,² AND H. B. WEBER⁴

Topical Review

Nonlinear and Quantum Optics with Whispering Gallery Resonators

Dmitry V Strelakov^{1,2}, Christoph Marquardt^{2,3}, Andrey B Matsko⁴, Harald G L Schwefel^{2,3,5} and Gerd Leuchs^{2,3}



$$\eta_{ph} = \frac{2P_p}{\epsilon_0 \omega_{\pm}} \frac{\chi^{(2)^2} Q_p^2 Q_m}{n_p^4 n_m^2} \frac{E_m'^2(r_p)}{V_m} (1 - S_{11}^2 - S_{21}^2)$$

1

Limited to:

The application (frequency)

The maximum optical power
that the resonator can
handle

$$\eta_{ph} = \frac{2P_p}{\cancel{\epsilon_0 \omega_{\pm}}} \frac{\chi^{(2)2} Q_p^2 Q_m}{n_p^4 n_m^2} \frac{E_m'^2(r_p)}{V_m} (1 - S_{11}^2 - S_{21}^2)$$

1
↓

Limited to:

The application (frequency)

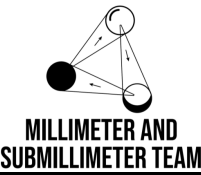
The maximum optical power
that the resonator can handle

$$\eta_{ph} = \frac{2P_p}{\varepsilon_0 \omega_{\pm}} \frac{\chi^{(2)2} Q_p^2 Q_m}{n_p^4 n_m^2} \frac{E_m'^2(r_p)}{V_m} (1 - S_{11}^2 - S_{21}^2)$$

2
↓

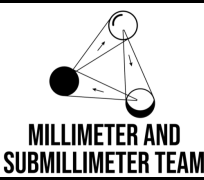
Depends on the selection of the material of the WGM resonator

Electro-optic up-converter: aumentar la eficiencia



Material	$\chi^{(2)}$ (pm/V)	n_p	n_m	Q_p	Q_m	$\frac{\chi^{(2)2} Q_p^2 Q_m}{n_p^4 n_m^2}$
Lithium tantalate (LiTaO ₃)	155	2.116	6.29	5.7×10^8	150	1.5×10^{-3}
Lithium Niobate (LiNbO ₃)	151	2.138	4.95	1×10^8	200	8.9×10^{-5}
Quartz (SiO ₂)	0.4	1.536	2.11	5×10^7	5000	8.1×10^{-8}
Aluminium nitride (AlN)	5	2.16	2.88	6×10^5	2000	1.0×10^{-10}
Gallium Arsenide (GaAs)	41.9	3.37	3.59	1×10^5	1000	1.1×10^{-11}
Indium Phosphide (InP)	40	3.165	3.514	1×10^5	1000	1.3×10^{-11}
Zinc selenide (ZnSe)	18	2.45	3.0158	5×10^4	525	1.3×10^{-12}
Zinc telluride (ZnTe)	56.3	2.733	3.1707	1.6×10^3	555	8.0×10^{-15}

Electro-optic up-converter: aumentar la eficiencia

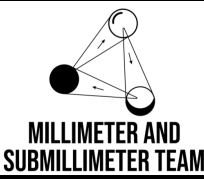


Material	$\chi^{(2)}$ (pm/V)	n_p	n_m	Q_p	Q_m	$\frac{\chi^{(2)2} Q_p^2 Q_m}{n_p^4 n_m^2}$
Lithium tantalite (LiTaO ₃)	155	2.116	6.29	5.7×10^8	150	1.5×10^{-3}
Lithium Niobate (LiNbO ₃)	151	2.138	4.95	1×10^8	200	8.9×10^{-5}
Quartz (SiO ₂)	0.4	1.536	2.11	5×10^7	5000	8.1×10^{-8}
Aluminium nitride (AlN)	5	2.16	2.88	6×10^5	2000	1.0×10^{-10}
Gallium Arsenide (GaAs)	41.9	3.37	3.59	1×10^5	1000	1.1×10^{-11}
Indium Phosphide (InP)	40	3.165	3.514	1×10^5	1000	1.3×10^{-11}
Zinc selenide (ZnSe)	18	2.45	3.0158	5×10^4	525	1.3×10^{-12}
Zinc telluride (ZnTe)	56.3	2.733	3.1707	1.6×10^3	555	8.0×10^{-15}

Electro-optic up-converter: aumentar la eficiencia

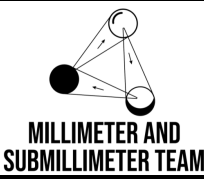
Material	$\chi^{(2)}$ (pm/V)	n_p	n_m	Q_p	Q_m	$\frac{\chi^{(2)2} Q_p^2 Q_m}{n_p^4 n_m^2}$
Lithium tantalite (LiTaO ₃)	155	2.116	6.29	5.7×10^8	150	1.5×10^{-3}
Lithium Niobate (LiNbO ₃)	151	2.138	4.95	1×10^8	200	8.9×10^{-5}
Quartz (SiO ₂)	0.4	1.536	2.11	5×10^7	5000	8.1×10^{-8}
Aluminium nitride (AlN)	5	2.16	2.88	6×10^5	2000	1.0×10^{-10}
Gallium Arsenide (GaAs)	41.9	3.37	3.59	1×10^5	1000	1.1×10^{-11}
Indium Phosphide (InP)	40	3.165	3.514	1×10^5	1000	1.3×10^{-11}
Zinc selenide (ZnSe)	18	2.45	3.0158	5×10^4	525	1.3×10^{-12}
Zinc telluride (ZnTe)	56.3	2.733	3.1707	1.6×10^3	555	8.0×10^{-15}

Electro-optic up-converter: aumentar la eficiencia



Material	$\chi^{(2)}$ (pm/V)	n_p	n_m	Q_p	Q_m	$\frac{\chi^{(2)2} Q_p^2 Q_m}{n_p^4 n_m^2}$
Lithium tantalite (LiTaO ₃)	155	2.116	6.29	5.7×10^8	150	1.5×10^{-3}
Lithium Niobate (LiNbO ₃)	151	2.138	4.95	1×10^8	200	8.9×10^{-5}
Quartz (SiO ₂)	0.4	1.536	2.11	5×10^7	5000	8.1×10^{-8}
Aluminium nitride (AlN)	5	2.16	2.88	6×10^5	2000	1.0×10^{-10}
Gallium Arsenide (GaAs)	41.9	3.37	3.59	1×10^5	1000	1.1×10^{-11}
Indium Phosphide (InP)	40	3.165	3.514	1×10^5	1000	1.3×10^{-11}
Zinc selenide (ZnSe)	18	2.45	3.0158	5×10^4	525	1.3×10^{-12}
Zinc telluride (ZnTe)	56.3	2.733	3.1707	1.6×10^3	555	8.0×10^{-15}

Electro-optic up-converter: aumentar la eficiencia



$$\eta_{ph} = \frac{2P_p}{\epsilon_0 \omega_{\pm}} \frac{\chi^{(2)2} Q_p^2 Q_m}{n_p^4 n_m^2} \frac{E_m'^2(\mathbf{r}_p)}{V_m} (1 - S_{11}^2 - S_{21}^2)$$

3
↓

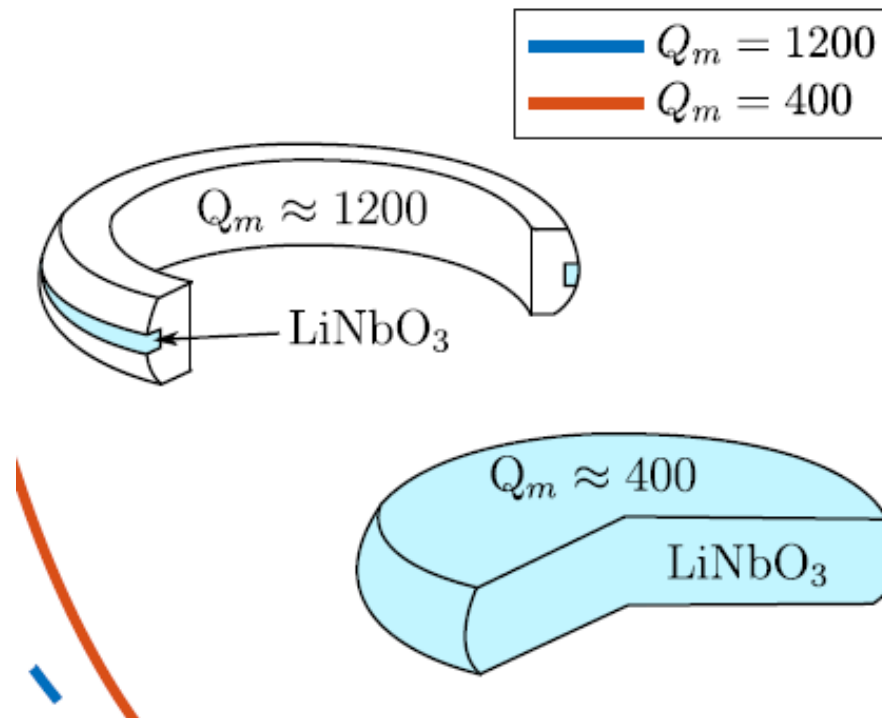
Depends on the geometry of the resonator, the overlap between both input signals needs to be maximized by:

Pushing the microwave mode's maximum intensity towards the rim of the resonator

Decreasing the mode volume of the microwave signal

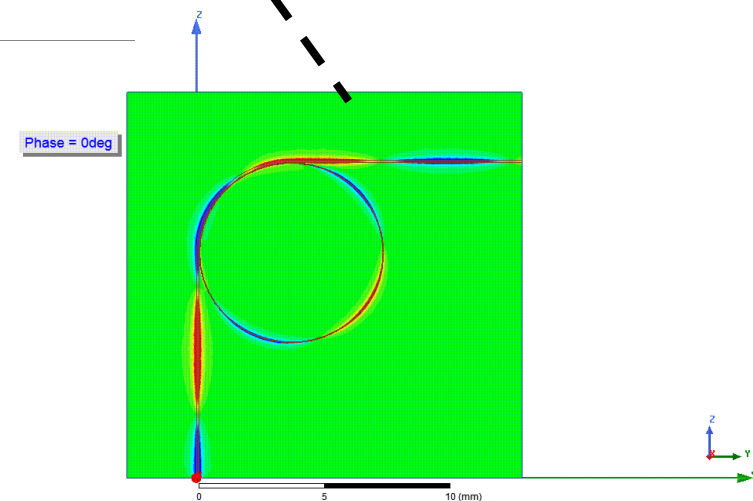
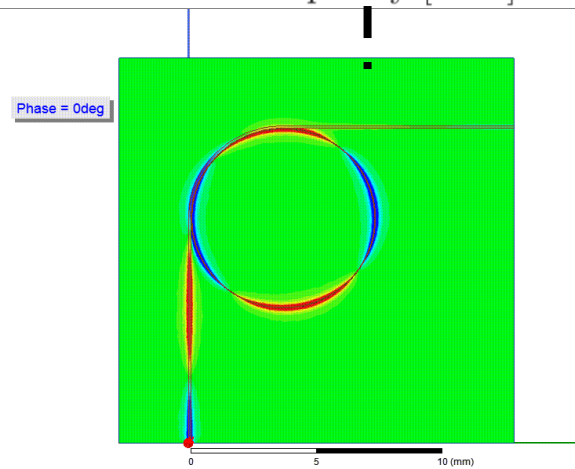
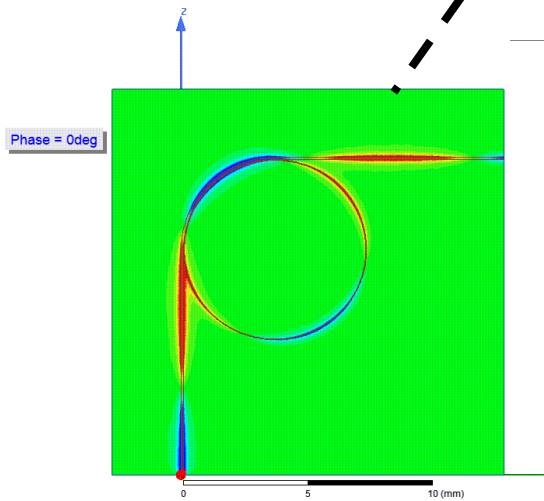
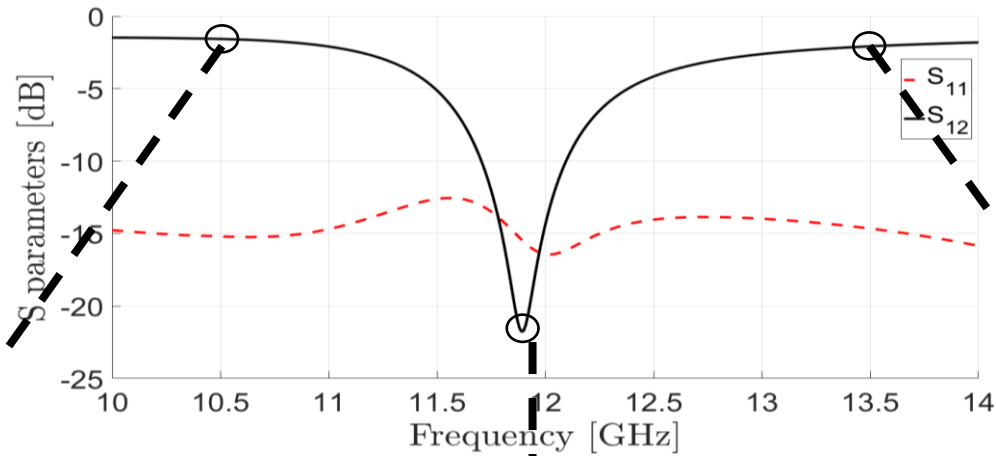
Electro-optic up-converter: aumentar la eficiencia

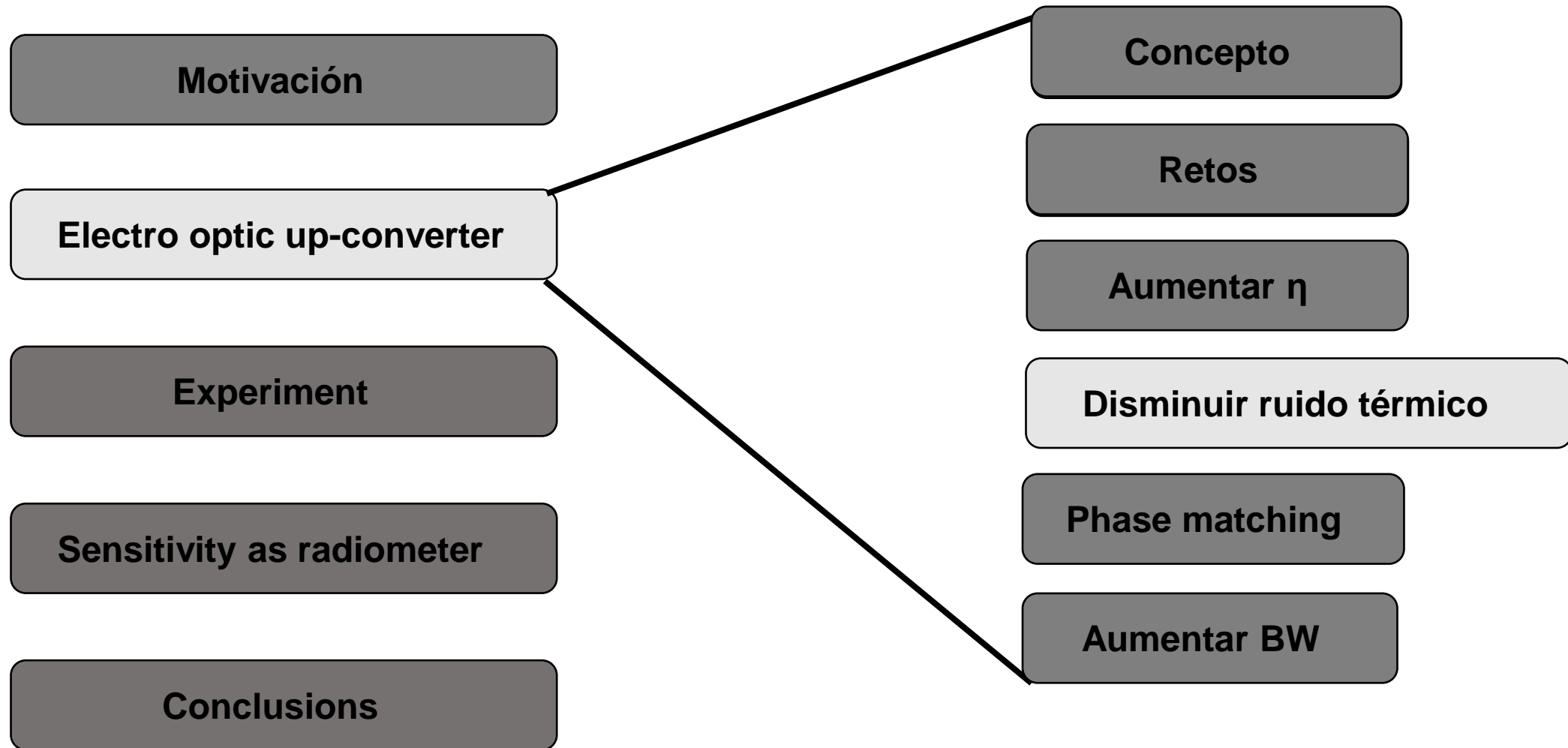
$$\eta_{ph} = \frac{2P_p}{\epsilon_0 \omega_{\pm}} \frac{\chi^{(2)2} Q_p^2 Q_m}{n_p^4 n_m^2} \frac{E_m'^2(\mathbf{r}_p)}{V_m} (1 - S_{11}^2 - S_{21}^2)$$



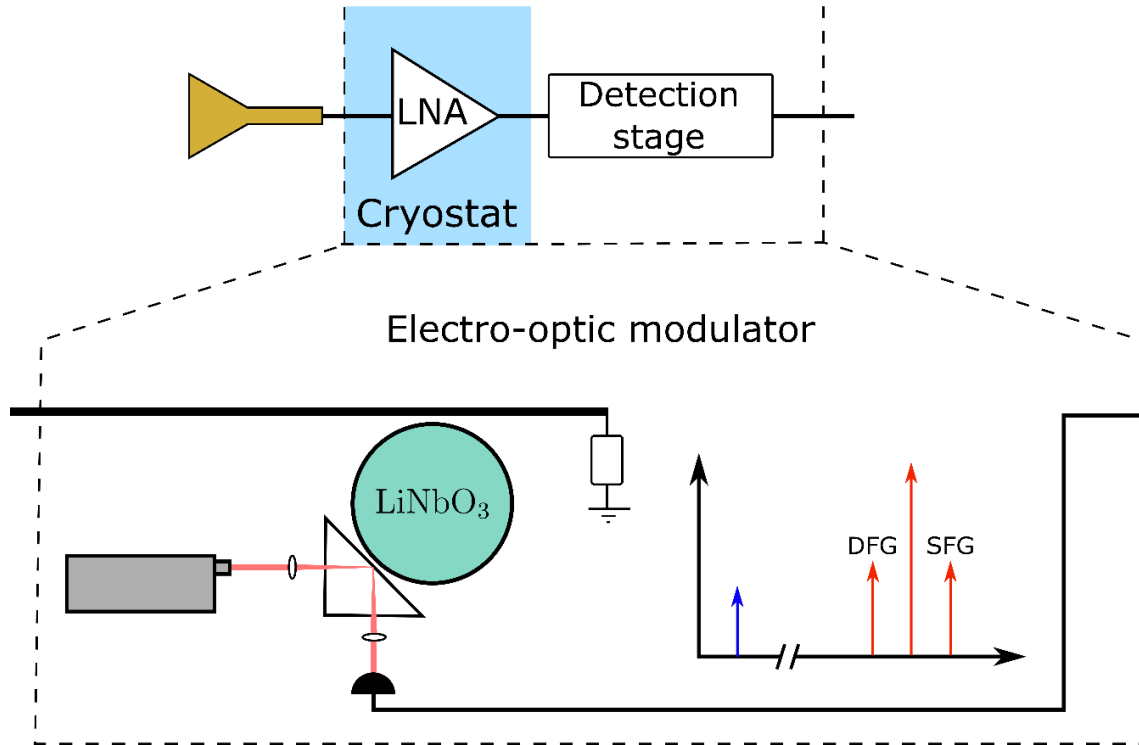
Electro-optic up-converter: aumentar la eficiencia

$$\eta_{ph} = \frac{2P_p}{\epsilon_0 \omega_{\pm}} \frac{\chi^{(2)2} Q_p^2 Q_m}{n_p^4 n_m^2} \frac{E_m'^2(\mathbf{r}_p)}{V_m} (1 - S_{11}^2 - S_{21}^2)$$





Electro-optic up-converter: challenges



Challenges:

1. High conversion efficiency:

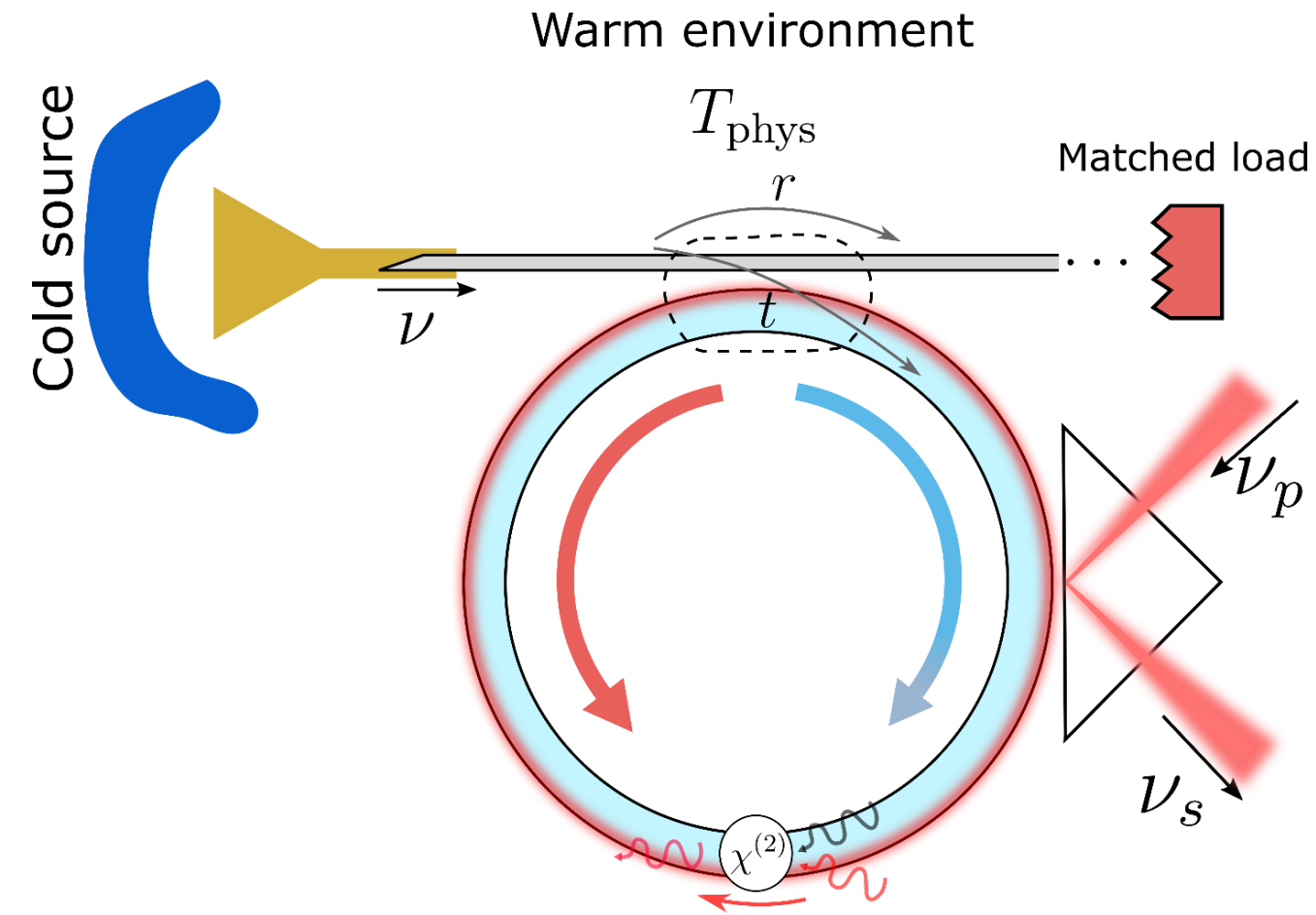
$$\eta = \frac{\# \text{ of upconverted photons}}{\# \text{ of input microwave photons}}$$

2. **Avoid thermal noise being upconverted**

3. Phase matching

4. High upconversion bandwidth

Electro-optic up-converter: ocupación térmica



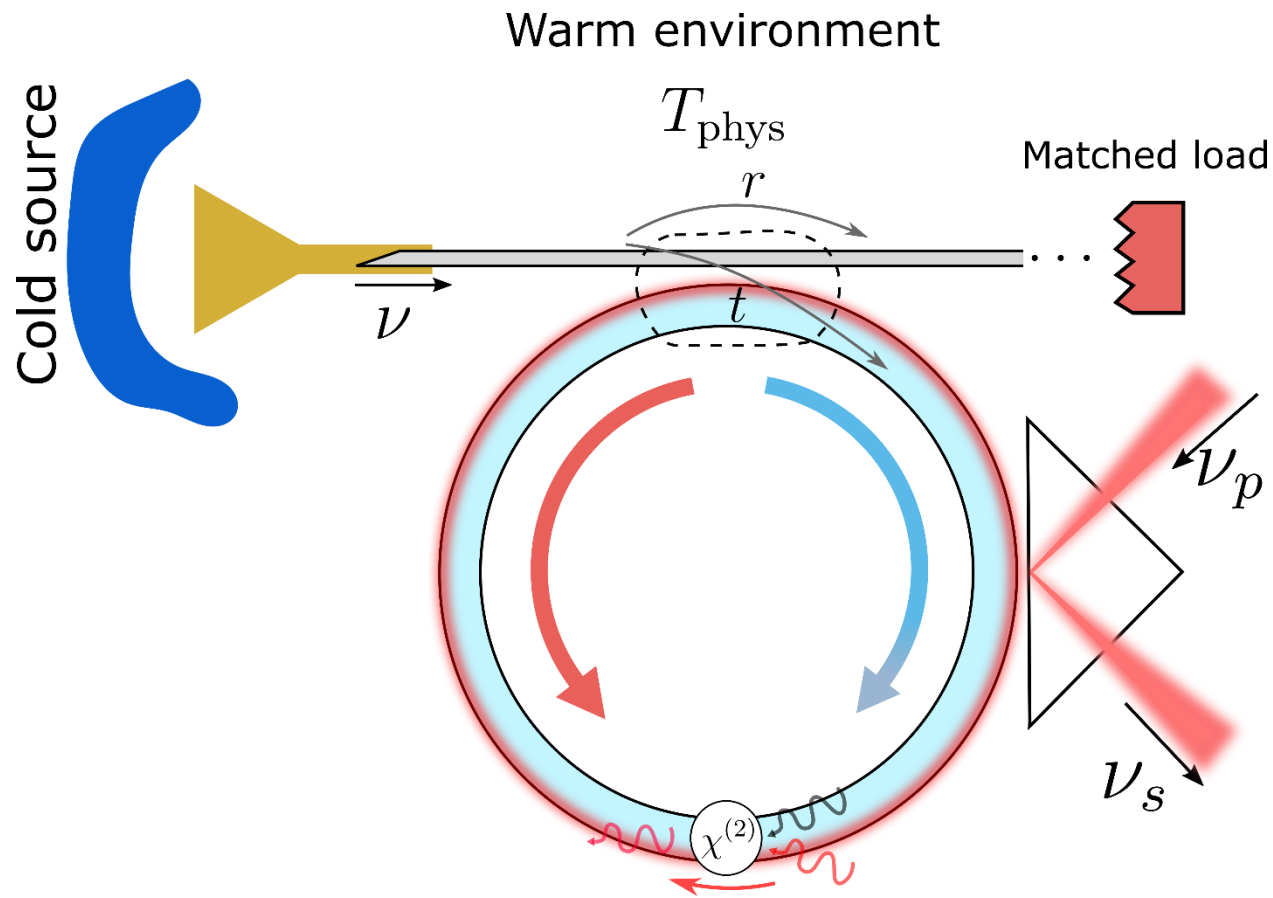
Hot matched load

Thermal noise from thermic bath

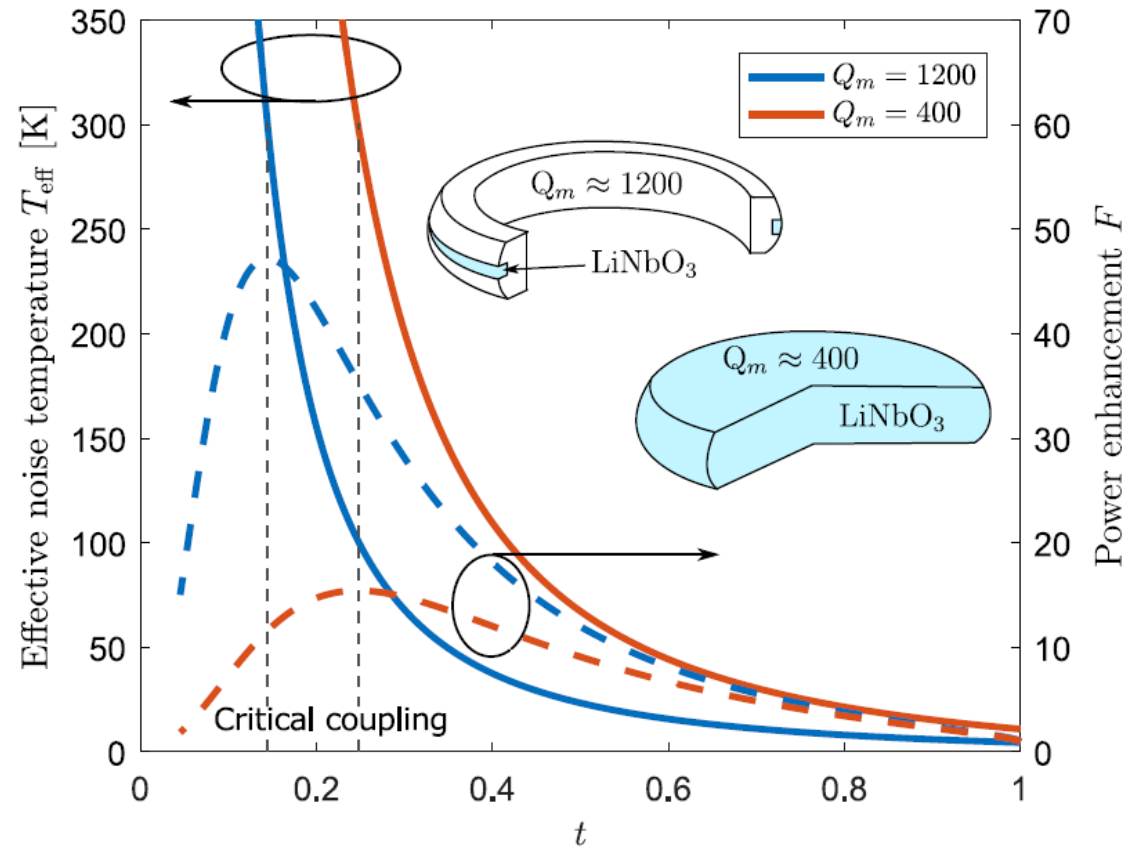
Thermal noise from horn+waveguide

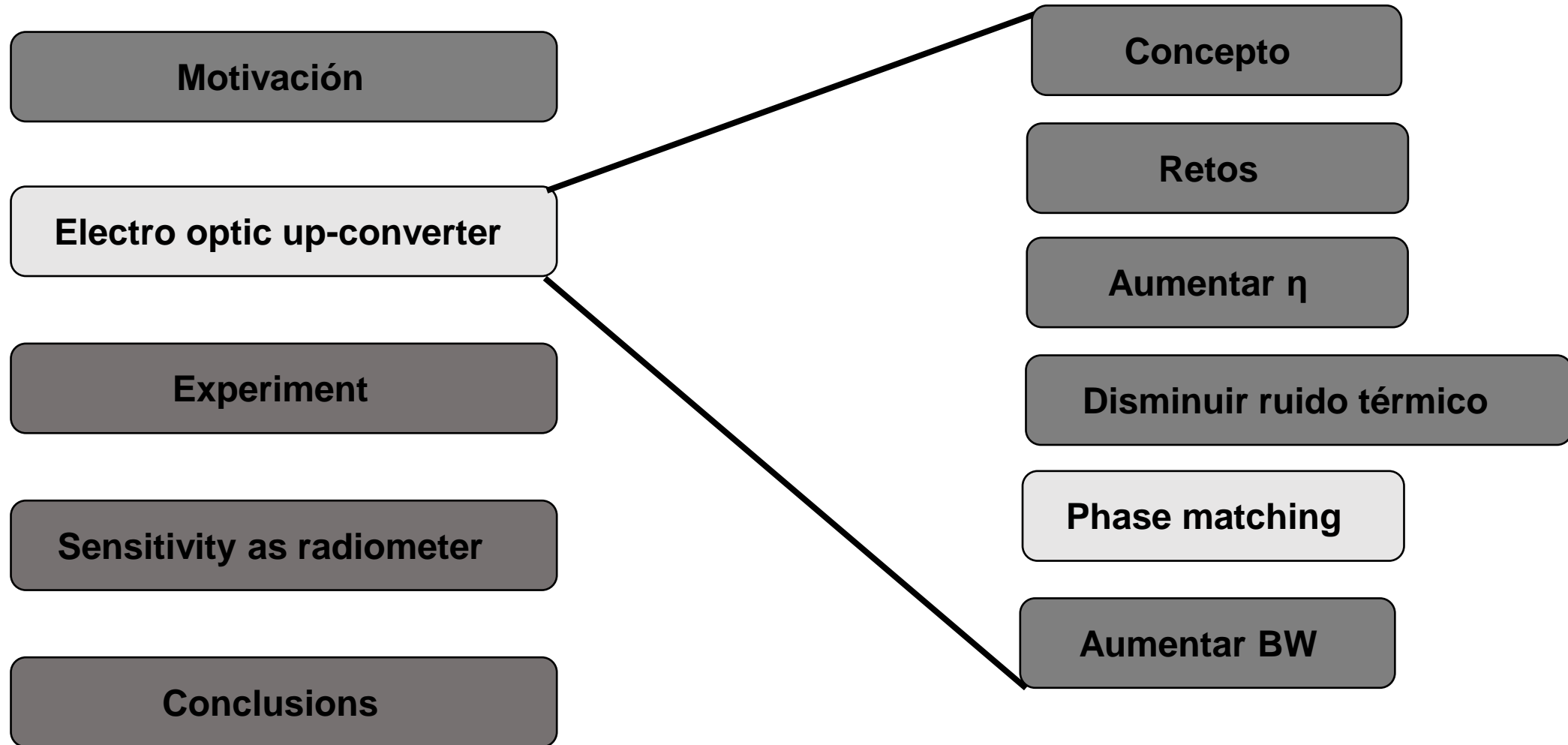
Thermal noise from the resonator

Electro-optic up-converter: ruido inherente al resonador

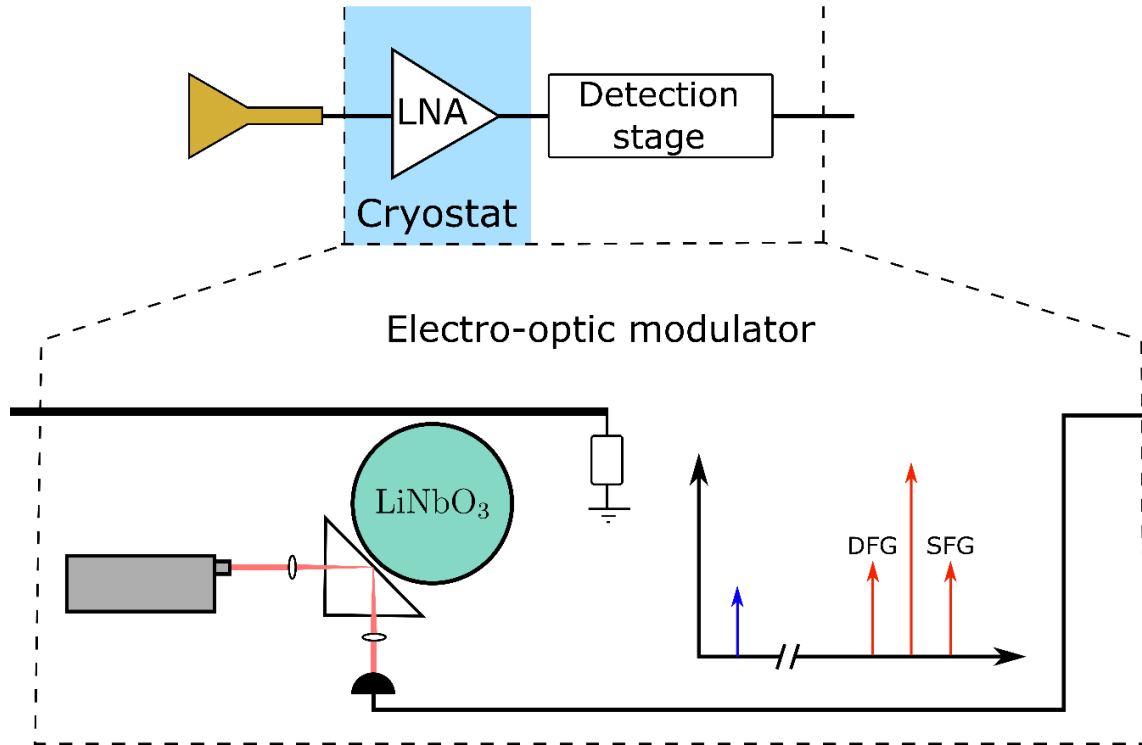


$$T_{\text{eff}} = \left[\frac{(1 - a^2 |r|^2) \ln(a^{-2})}{(1 - a^2)(1 - |r|^2)} - 1 \right] T_{\text{phys}}$$





Electro-optic up-converter: challenges



Challenges:

1. High conversion efficiency:

$$\eta = \frac{\# \text{ of upconverted photons}}{\# \text{ of input microwave photons}}$$

2. Avoid thermal noise being upconverted

3. **Phase matching**

4. High upconversion bandwidth

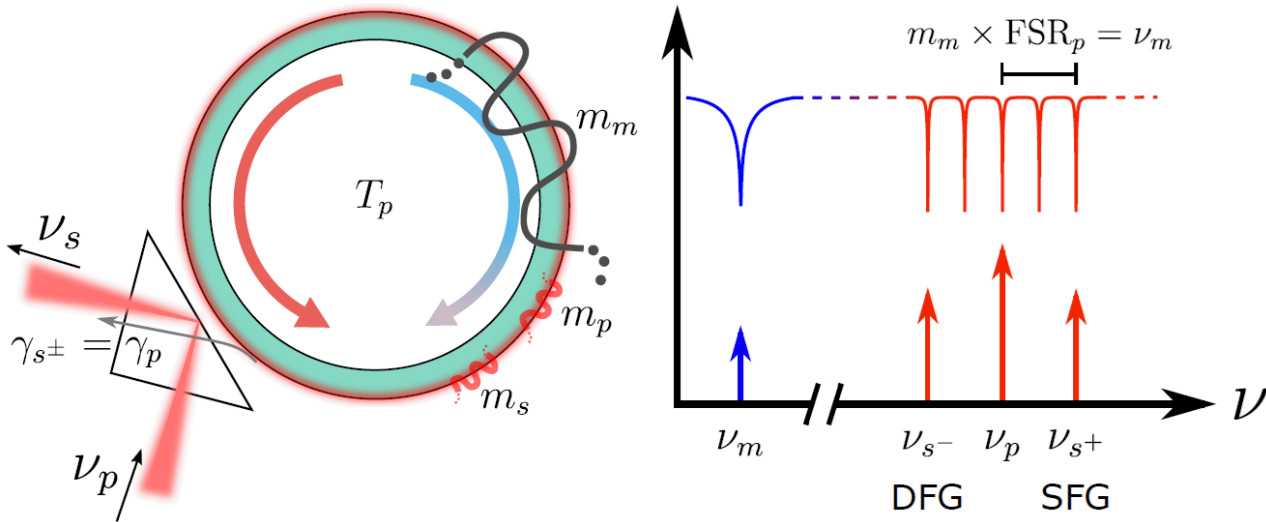
Electro-optic up-converter: realizing phase matching

Momentum conservation constrains mode azimuthal numbers to fulfill the relation:

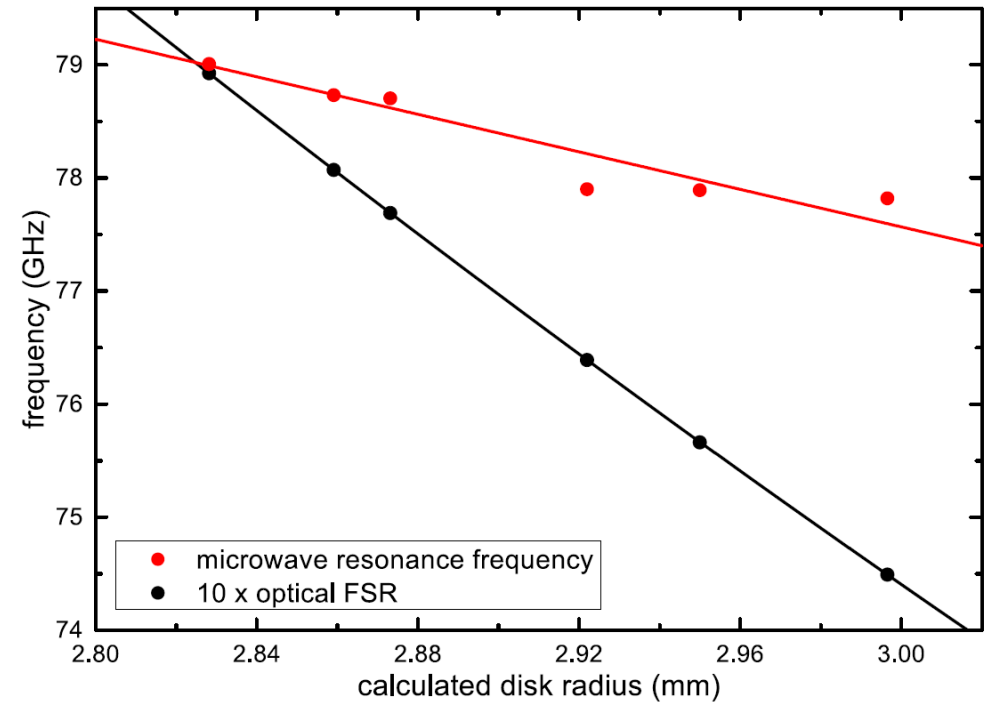
$$m_s = m_p \pm m_m$$

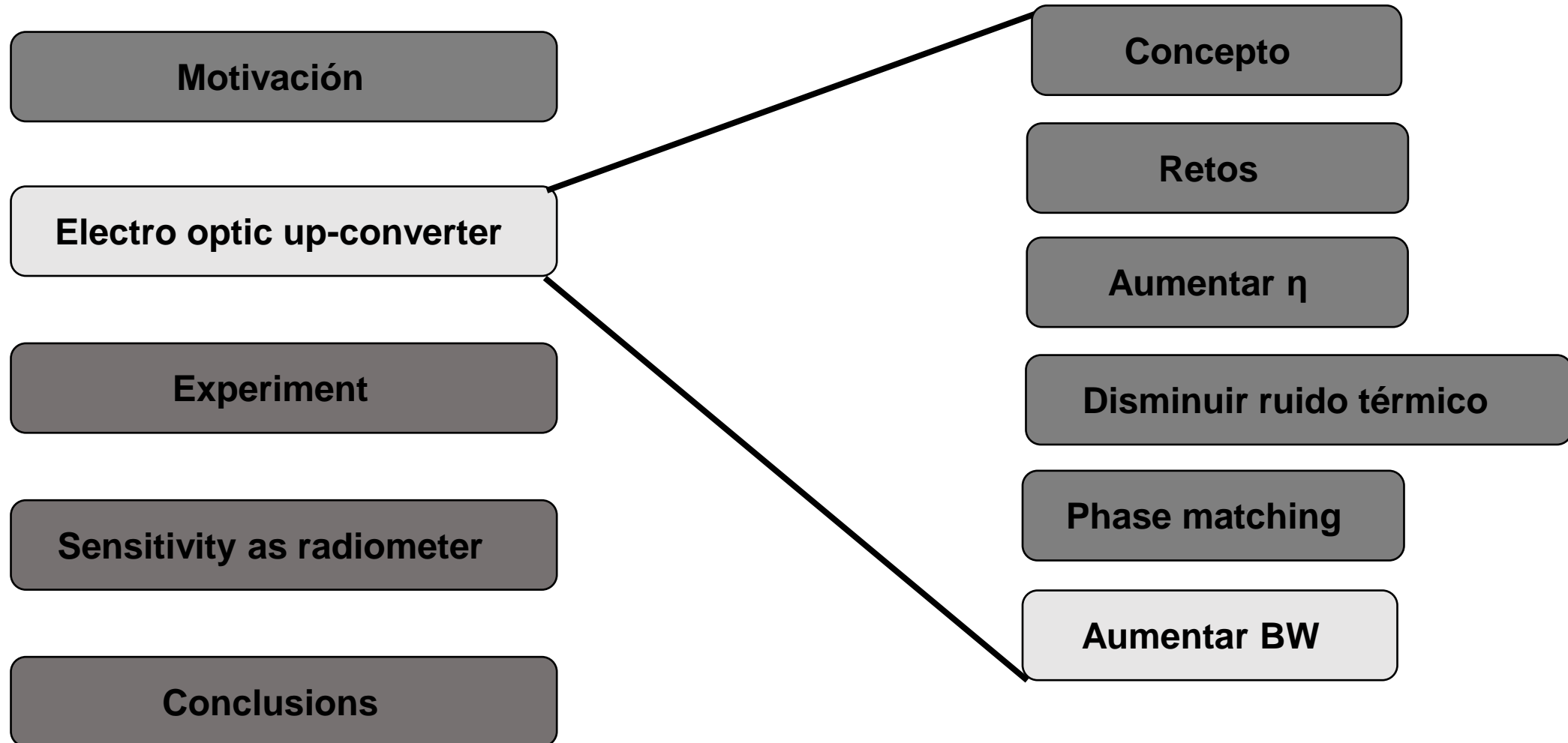
Energy conservation constrains the frequency to fulfill the relation

$$f_s = f_p \pm f_m$$

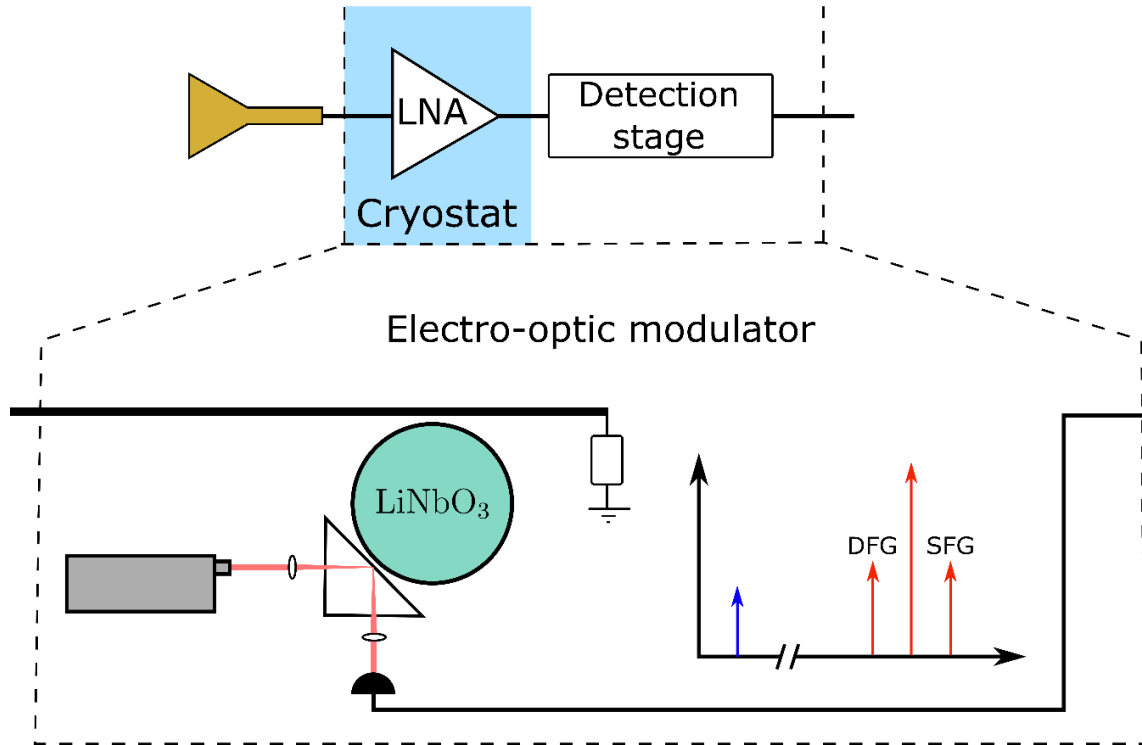


Since the prism couples both optical modes with the same rate, the sideband must also be resonant. Narrowband up-conversion! ≈ 2 MHz for 1550 nm light and $Q \approx 10^8$ cavity





Electro-optic up-converter: challenges



Challenges:

1. High conversion efficiency:

$$\eta = \frac{\# \text{ of upconverted photons}}{\# \text{ of input microwave photons}}$$

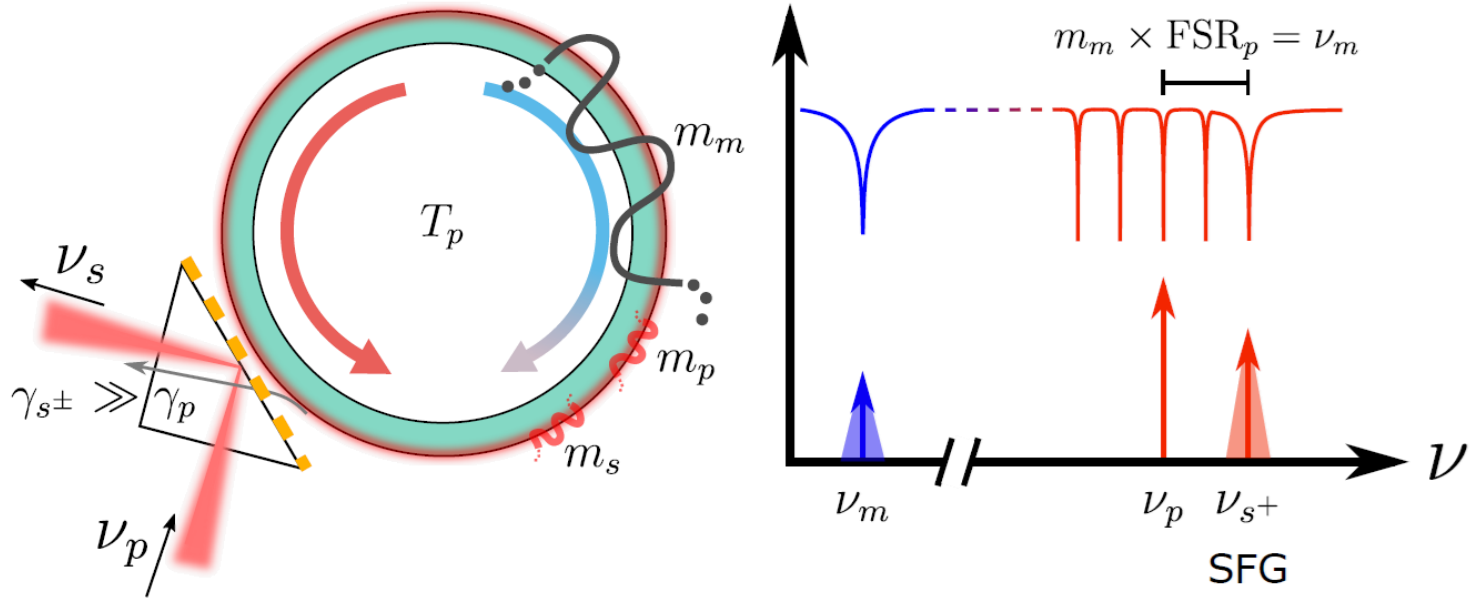
2. Avoid thermal noise being upconverted

3. Phase matching

4. **High upconversion bandwidth**

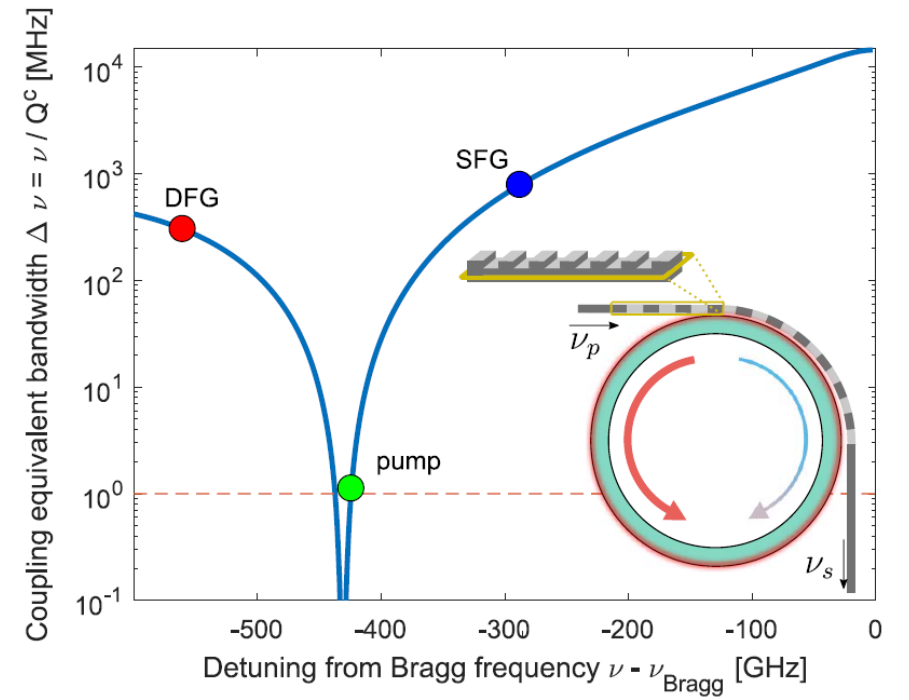
Electro-optic up-converter: increasing bandwidth

Finding a strong mode selective coupler

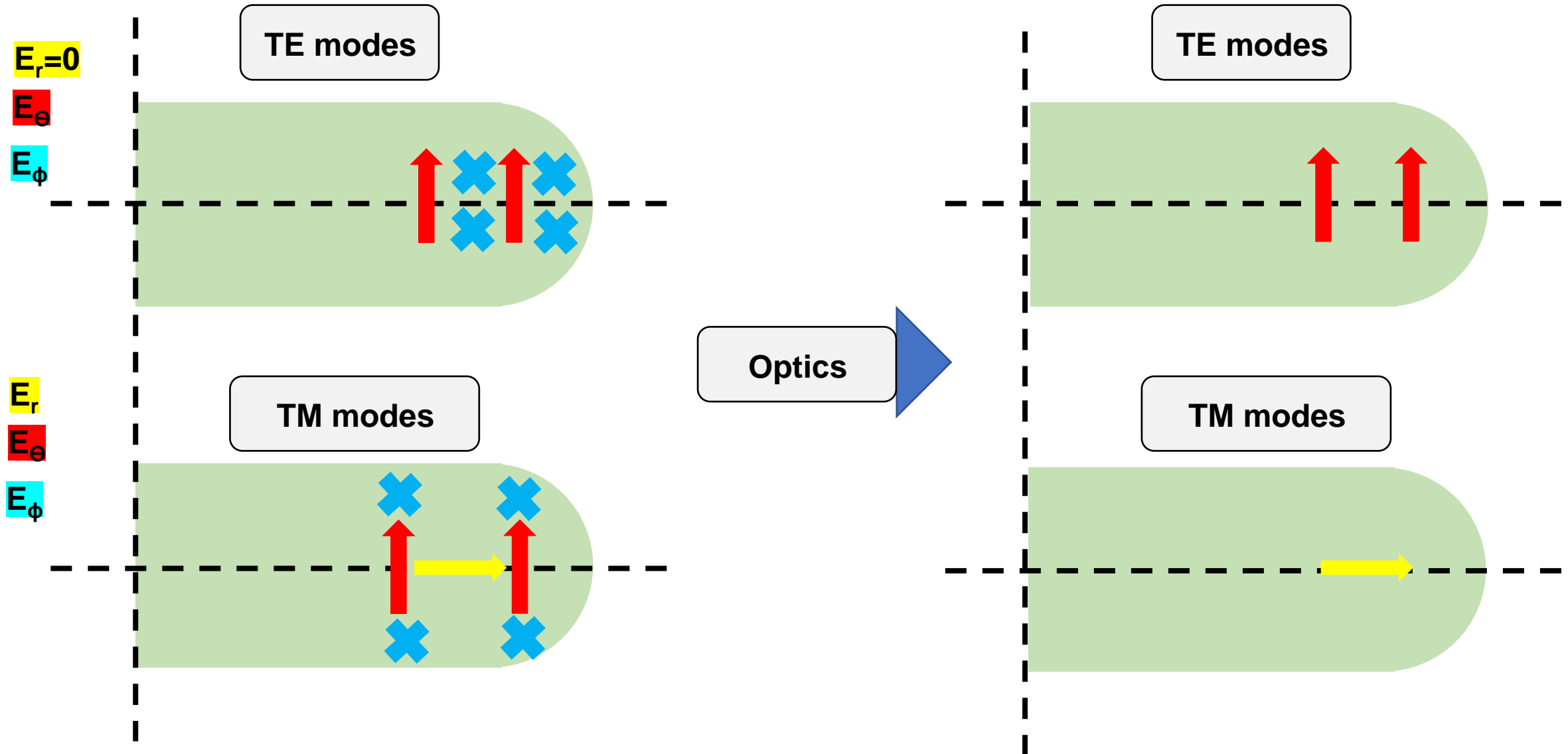


Grating etched in optical silicon coupling waveguide.

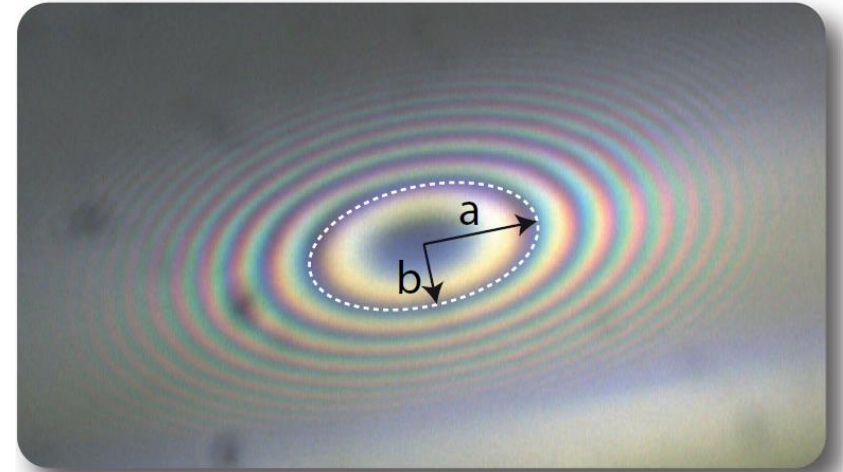
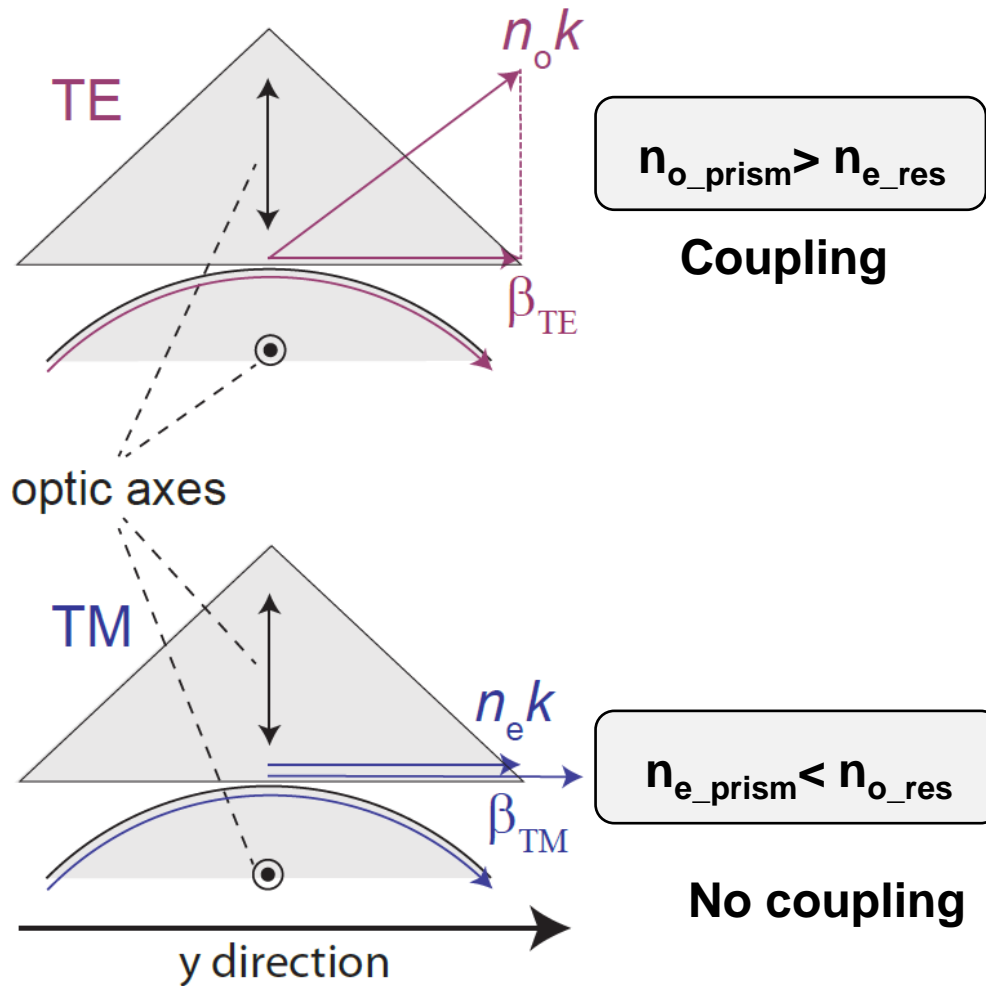
Preliminary theoretical study with coupled-mode theory shows 800 MHz upconversion bandwidth of 130 GHz signals.



Electro-optic up-converter: increasing bandwidth



Electro-optic up-converter: increasing bandwidth



Research Article

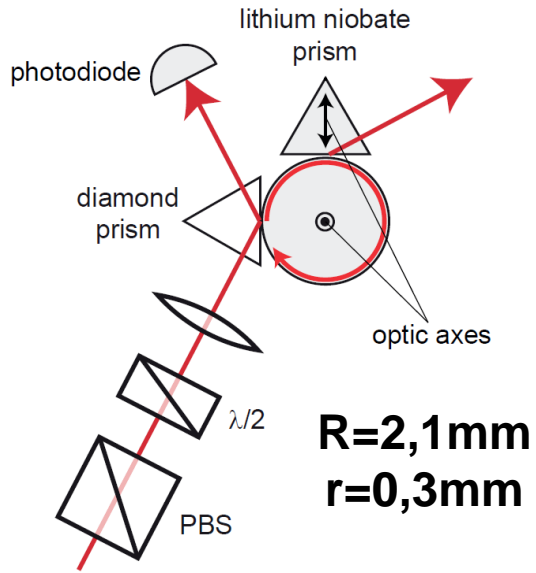
Vol. 24, No. 23 | 14 Nov 2016 | OPTICS EXPRESS 26503

Optics EXPRESS

Maximization of the optical intra-cavity power of whispering-gallery mode resonators via coupling prism

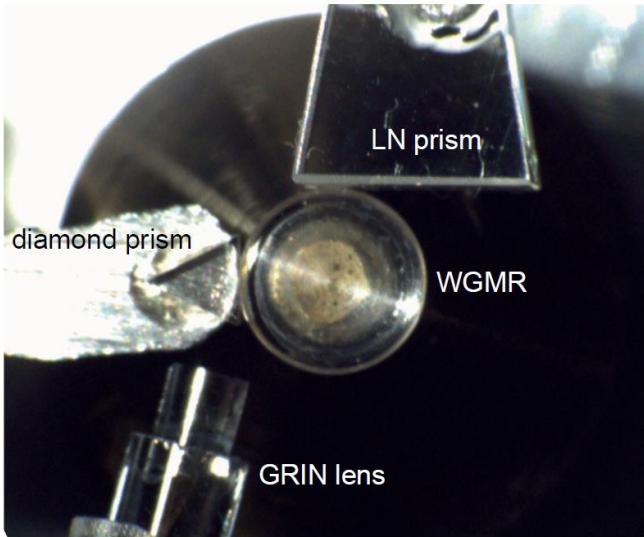
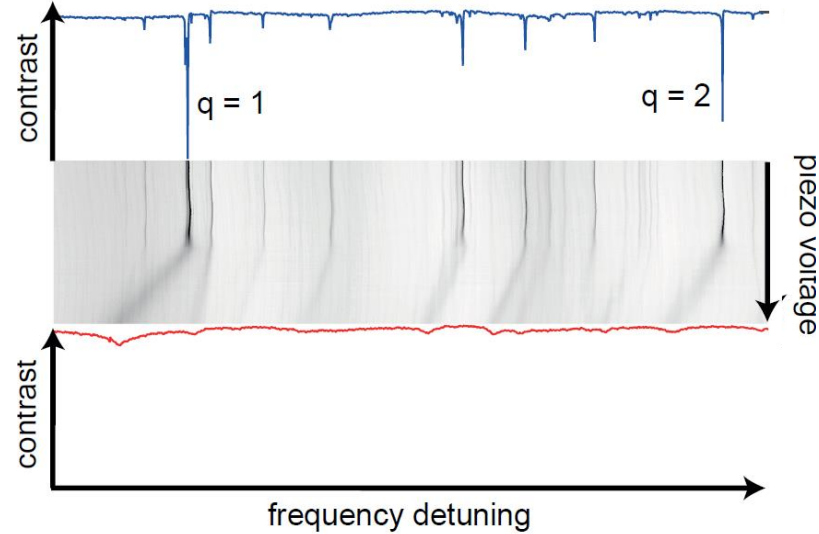
G. A. SANTAMARÍA-BOTELLO,¹ L. E. GARCÍA MUÑOZ,^{1,*} F. SEDLMEIR,² S. PREU,³ D. SEGOVIA-VARGAS,¹ K. ATIA ABDALMALAK,¹ S. LLORENTE ROMANO,¹ A. GARCÍA LAMPÉREZ,¹ S. MALZER,⁴ G. H. DÖHLER,⁴ H. G. L. SCHWEFEL,² AND H. B. WEBER⁴

Electro-optic up-converter: experiment for increasing bandwidth



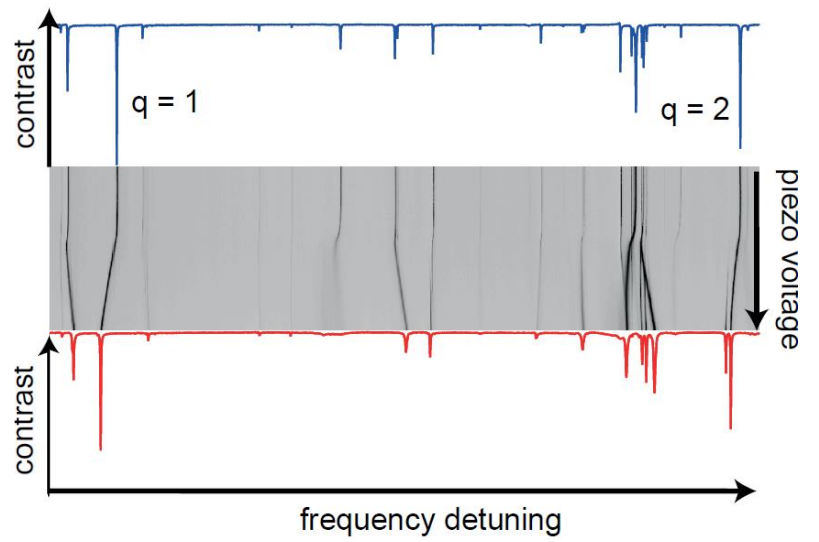
Coupling to the LN prism

TE modes $\left\{ \begin{array}{l} n_{e_res} \\ n_{o_prism} \end{array} \right.$
 $Q=8,8 \times 10^7$
 $\Delta v_{TE}=2,2 \text{ MHz}$



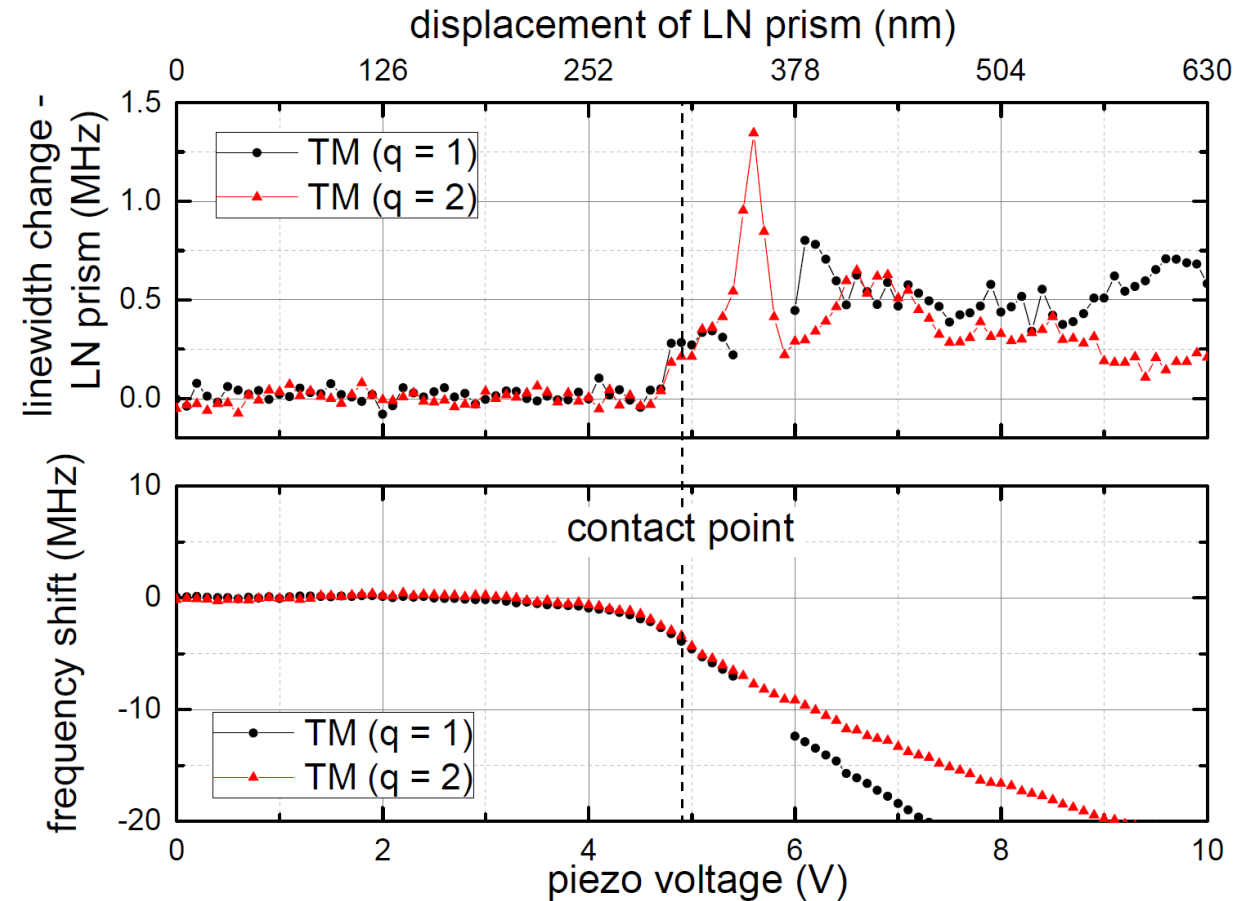
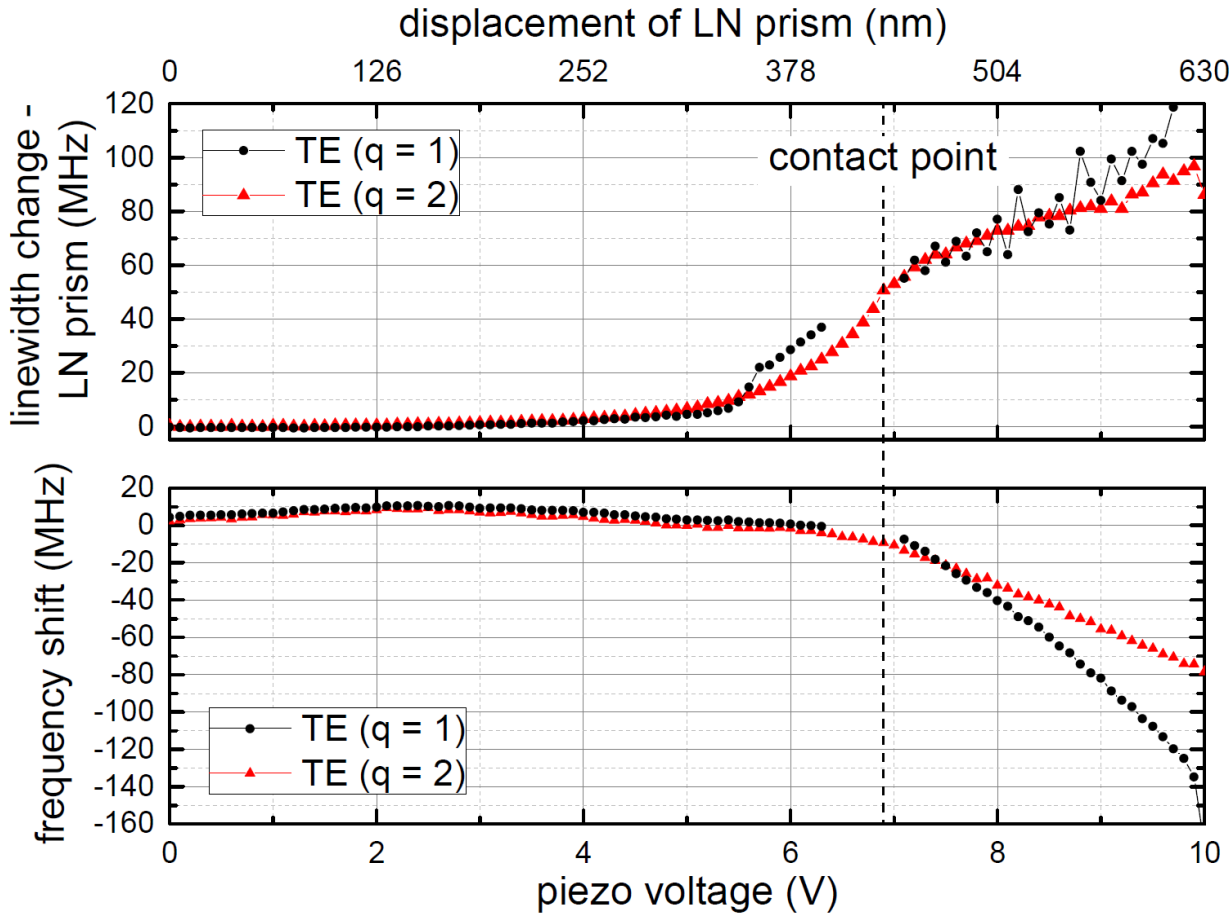
No coupling to the LN prism

TM modes $\left\{ \begin{array}{l} n_{o_res} \\ n_{e_prism} \end{array} \right.$
 $Q=1,9 \times 10^8$
 $\Delta v_{TE}=1 \text{ MHz}$

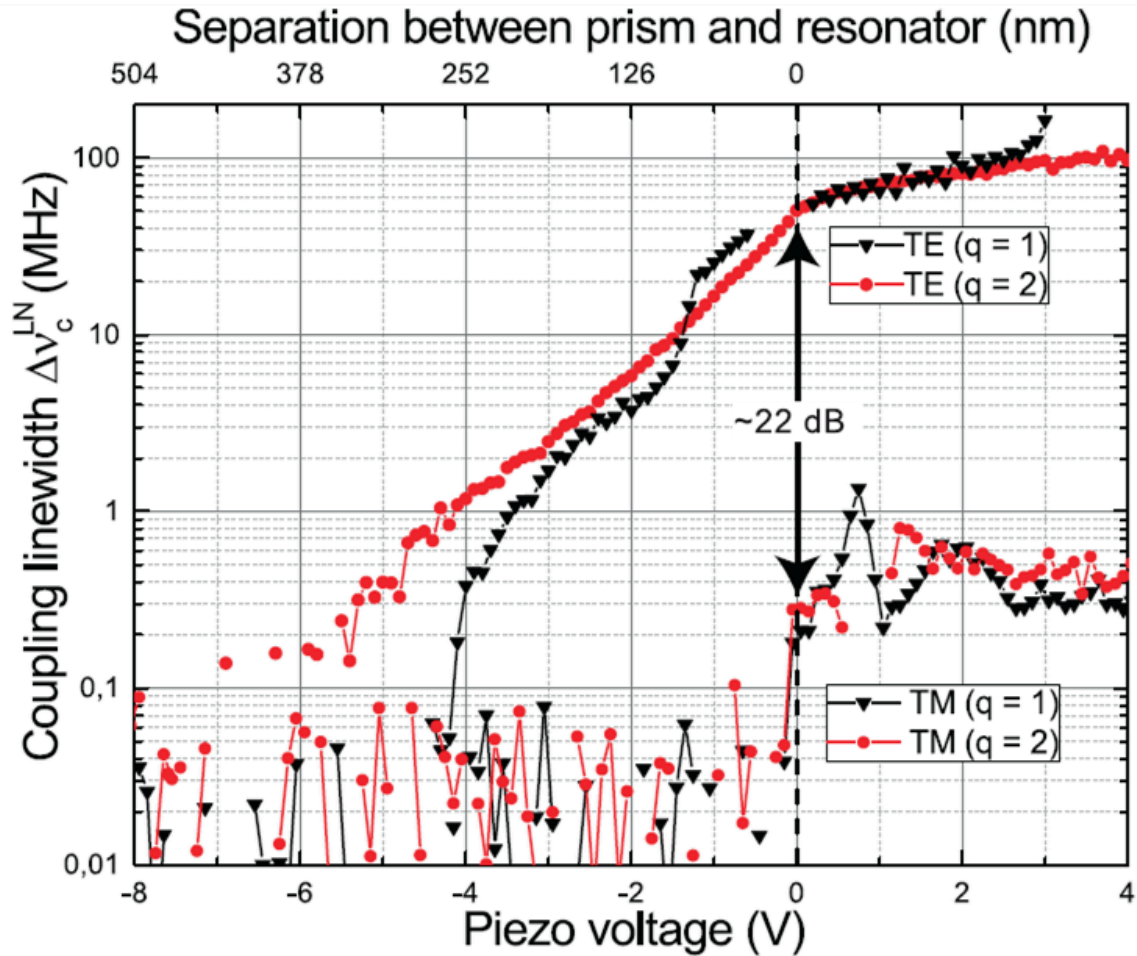


Electro-optic up-converter: experiment for increasing bandwidth

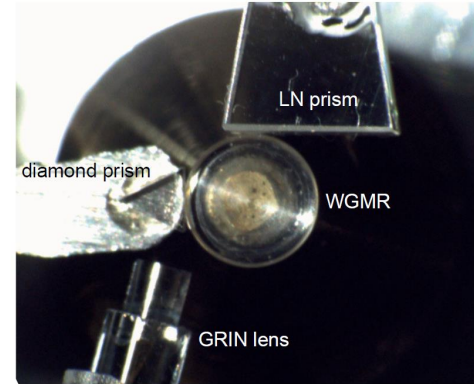
Piezo 0,1V=6,3nm



Electro-optic up-converter: experiment for increasing bandwidth



Up to 100 MHz coupling
bandwidth difference
between TE and TM
modes



Research Article

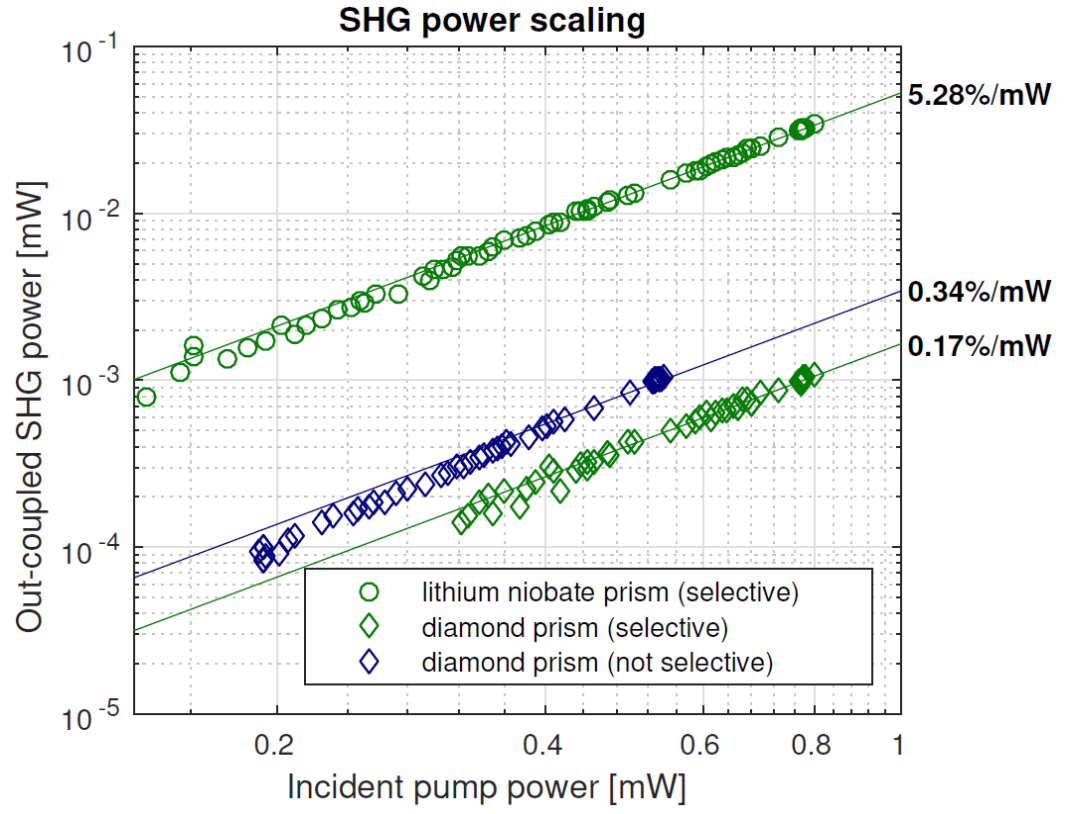
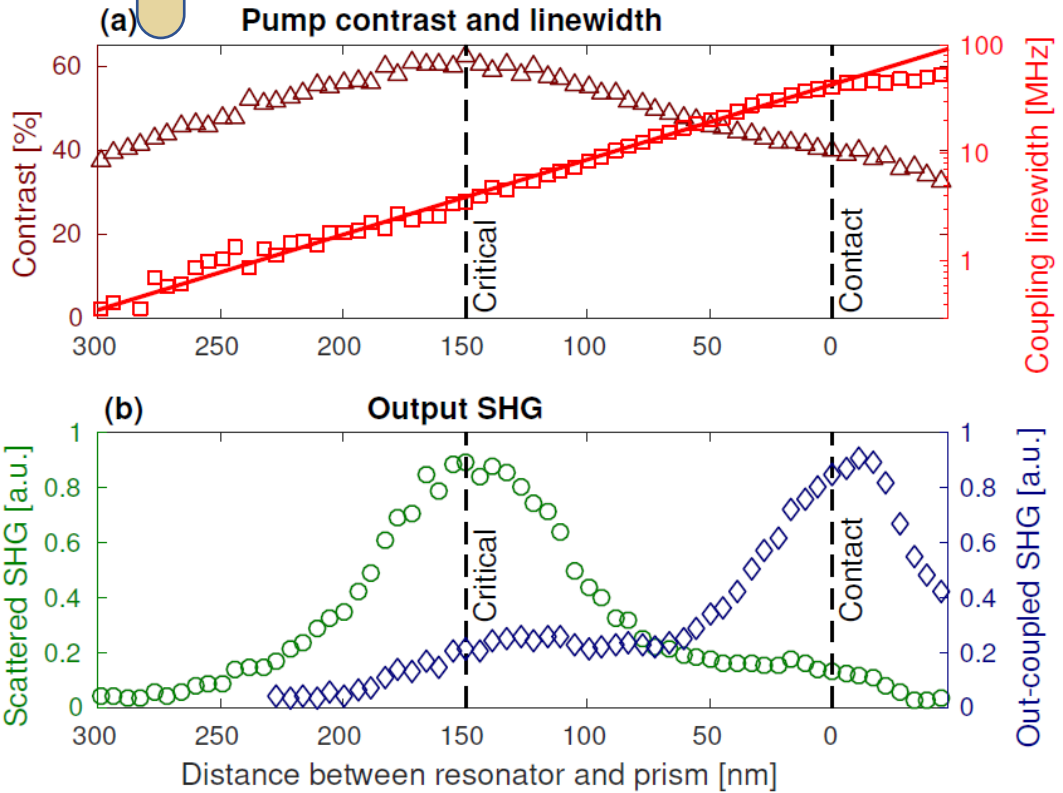
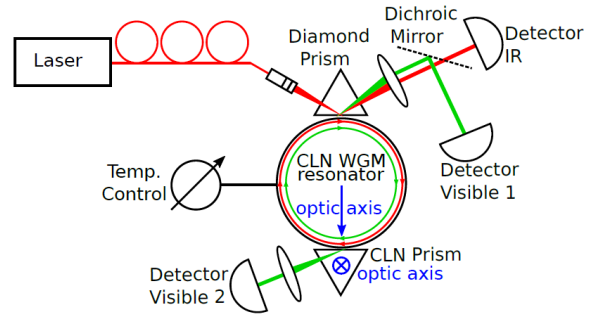
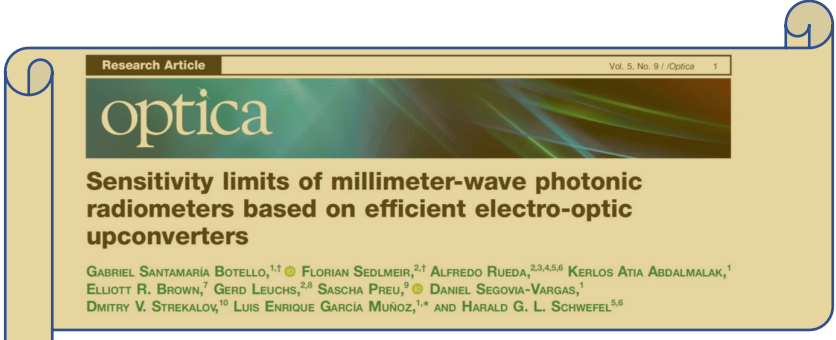
Vol. 24, No. 23 | 14 Nov 2016 | OPTICS EXPRESS 26503

Optics EXPRESS

Maximization of the optical intra-cavity power of
whispering-gallery mode resonators via
coupling prism

G. A. SANTAMARÍA-BOTELLO,¹ L. E. GARCÍA MUÑOZ,^{1,*} F. SEDLMEIR,² S. PREU,³ D. SEGOVIA-VARGAS,¹ K. ATIA ABDALMALAK,¹ S. LLORENTE ROMANO,¹ A. GARCÍA LAMPÉREZ,¹ S. MALZER,⁴ G. H. DÖHLER,⁴ H. G. L. SCHWEFEL,² AND H. B. WEBER⁴

Electro-optic up-converter: increasing bandwidth, SHG experiment



Motivación

Electro optic up-converter

Experiment

Sensitivity as radiometer

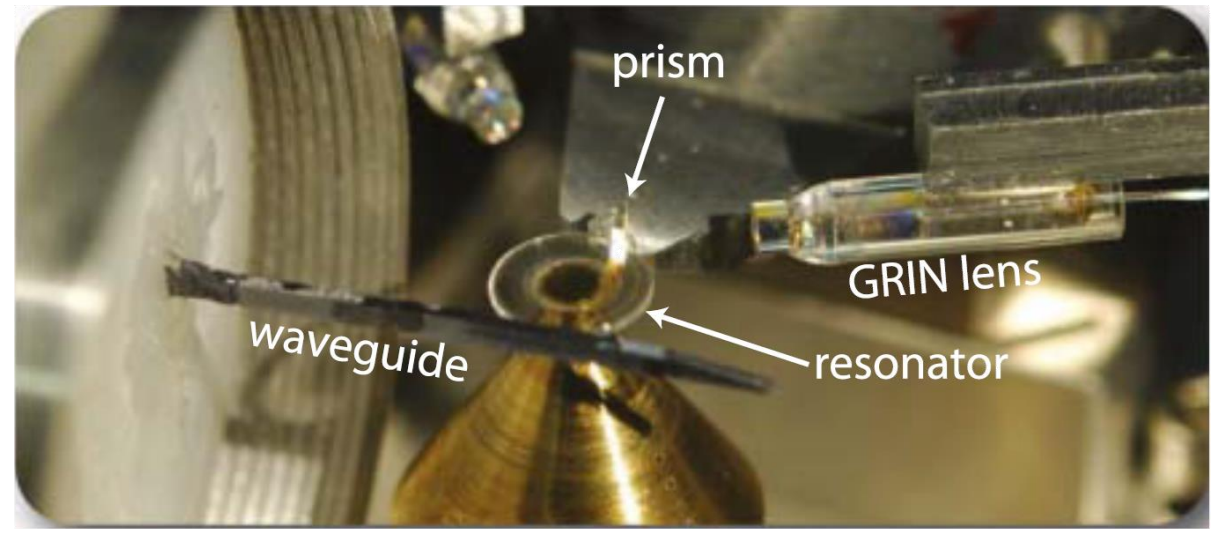
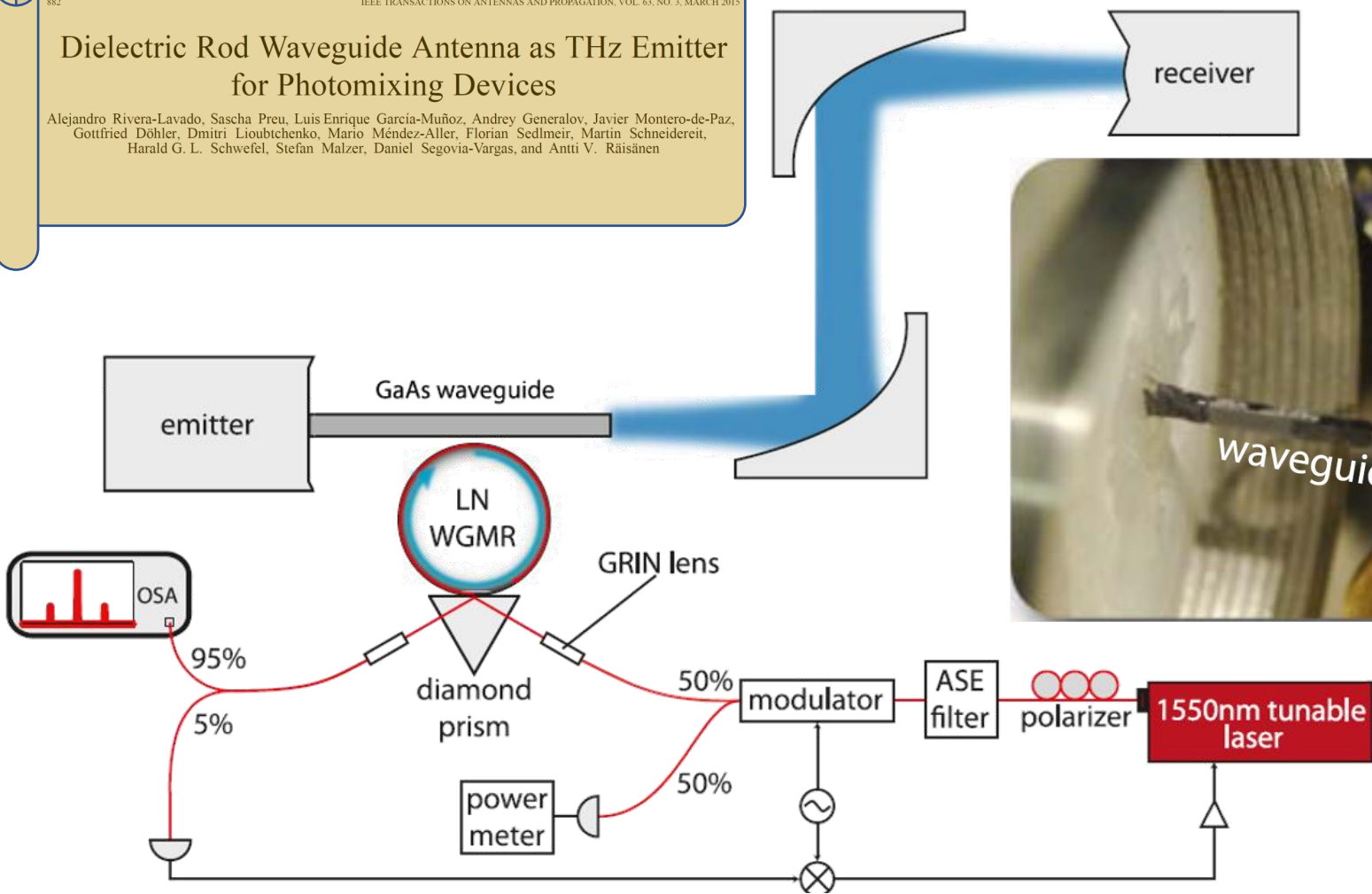
Conclusions

Electro-optic up-converter: Experimental proof of concept

882 IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 63, NO. 3, MARCH 2015

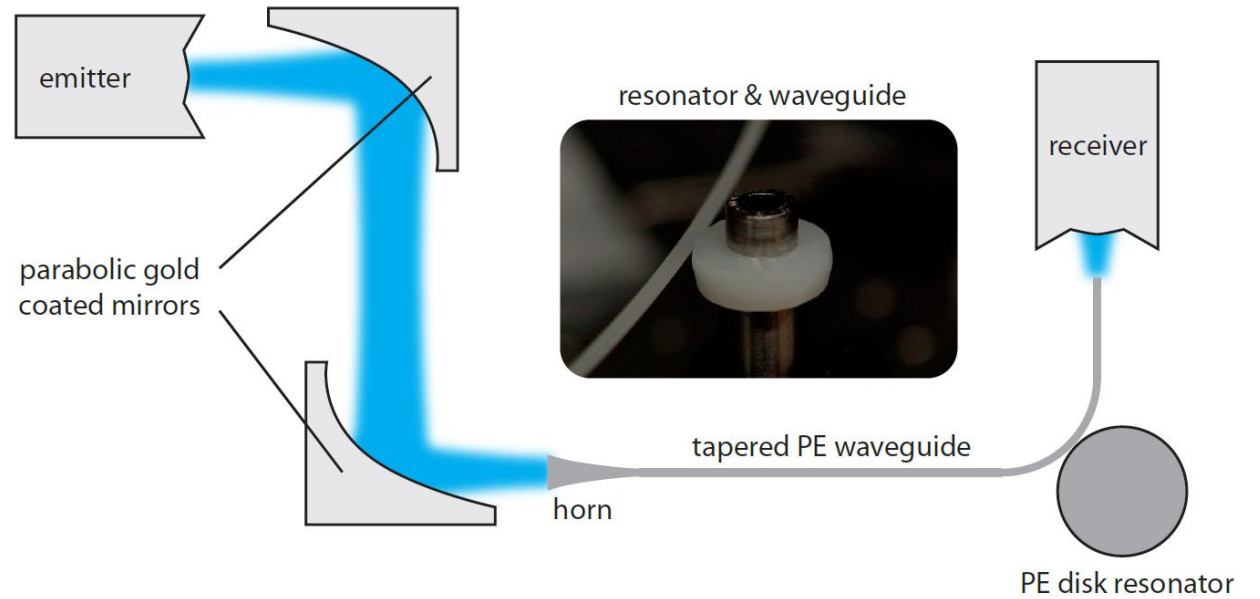
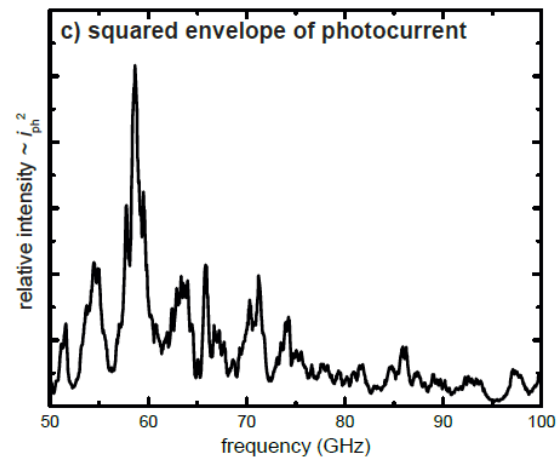
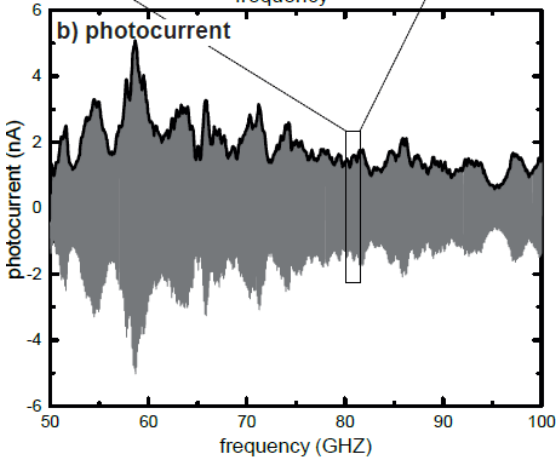
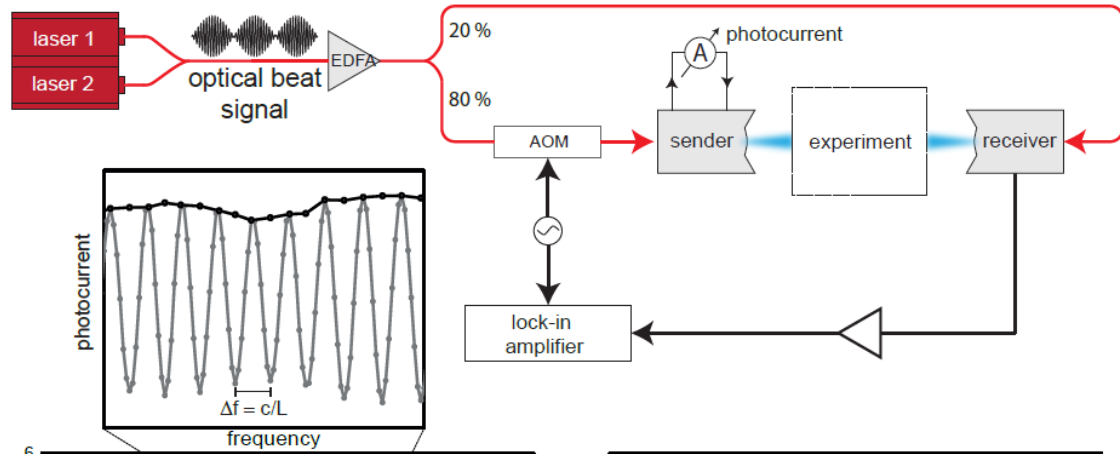
Dielectric Rod Waveguide Antenna as THz Emitter for Photomixing Devices

Alejandro Rivera-Lavado, Sascha Preu, Luis Enrique García-Muñoz, Andrey Generalov, Javier Montero-de-Paz, Gottfried Döhler, Dmitri Lioubtchenko, Mario Méndez-Aller, Florian Sedlmeir, Martin Schneidreith, Harald G. L. Schwefel, Stefan Malzer, Daniel Segovia-Vargas, and Antti V. Räsänen



Electro-optic up-converter: Experimental proof of concept

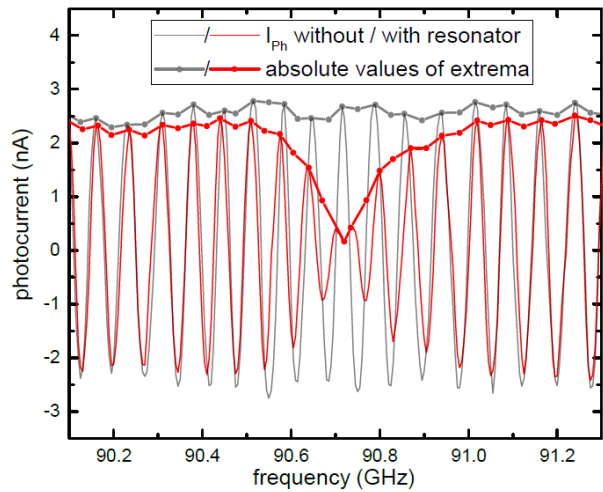
a) schematic of the photomixing setup



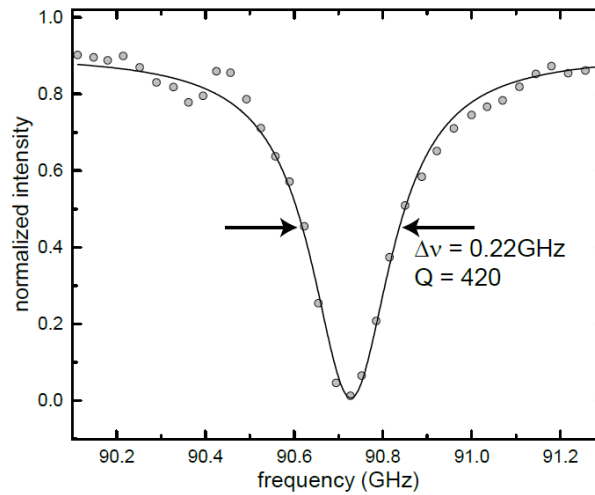
This schematic shows the setup used to couple to a PE resonator ($R = 10$ mm): The microwave from a photomixer emitting to free space is collimated and refocused with two parabolic mirrors into a tapered PE waveguide. The waveguide is bent to improve coupling to the resonator.

Electro-optic up-converter: Experimental proof of concept

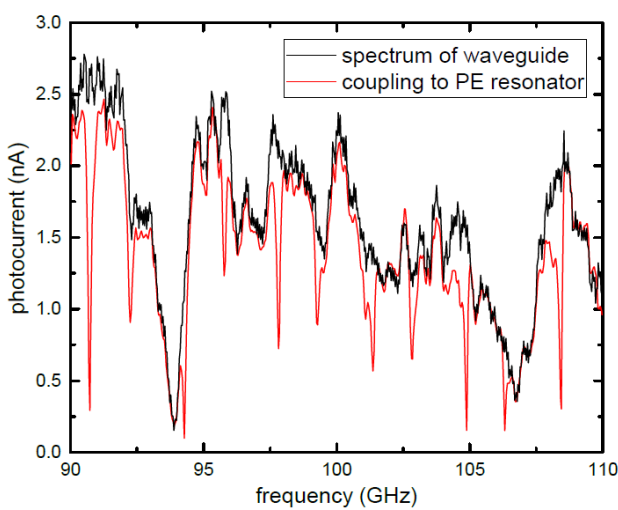
a) WGM resonance, photocurrent



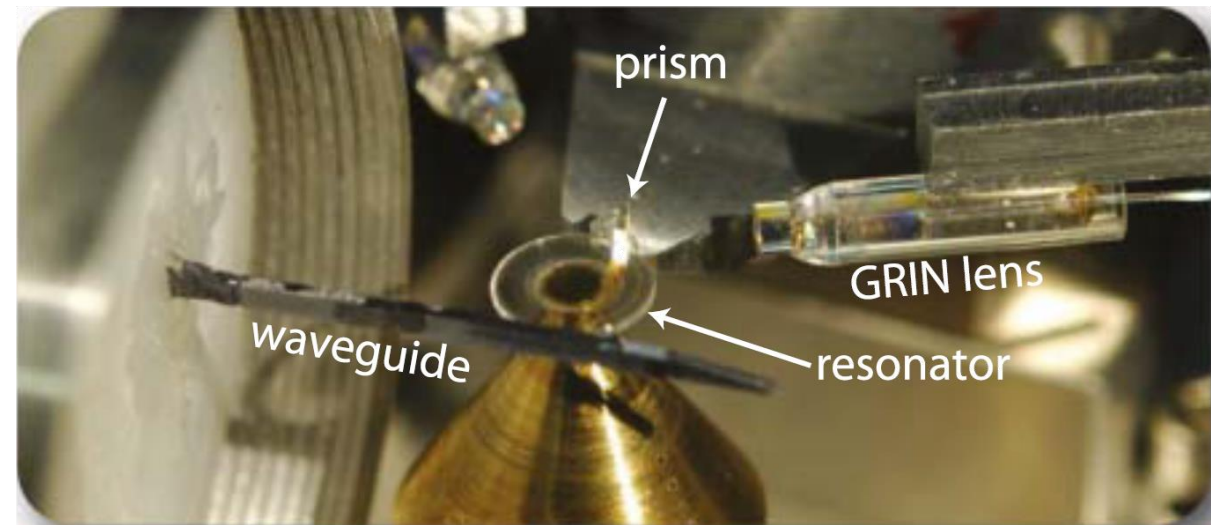
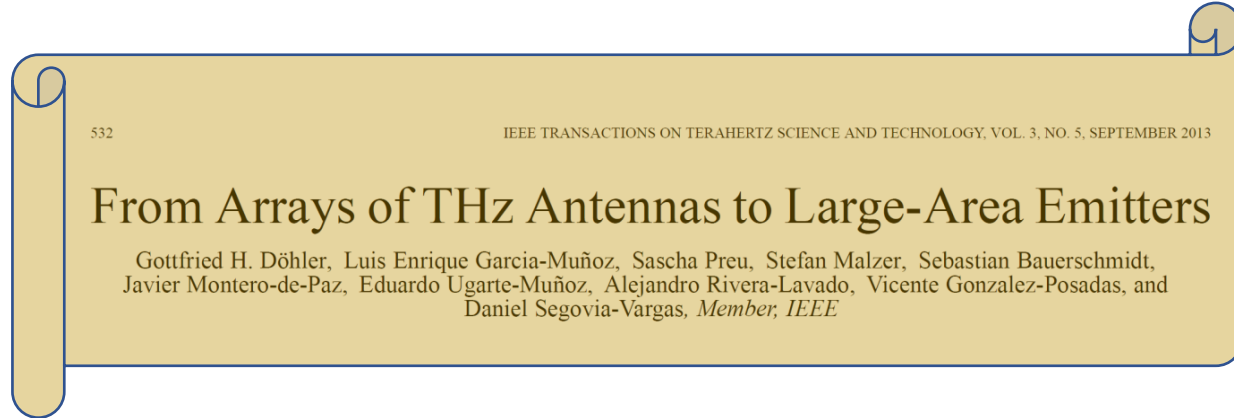
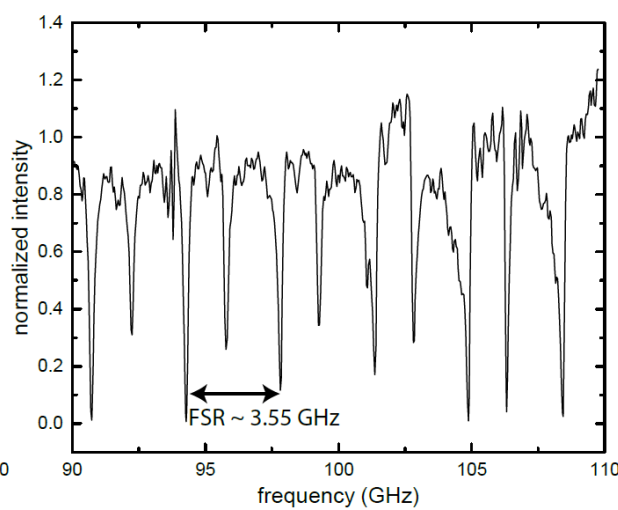
b) WGM resonance, intensity



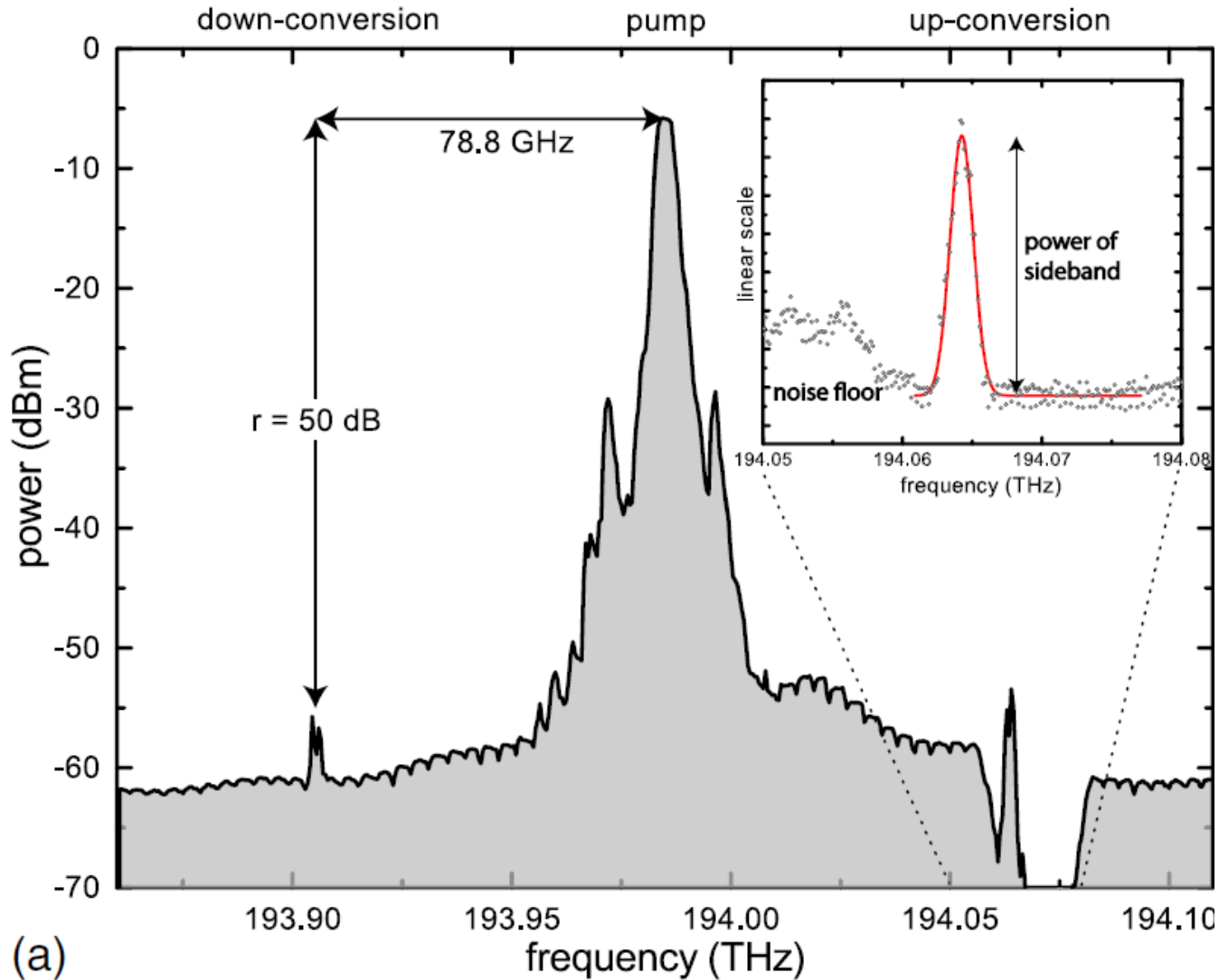
c) envelope of full spectrum



d) normalized full spectrum



Electro-optic up-converter: Experimental proof of concept



Record efficiency $\eta = 2.5 \times 10^{-5}$ per mW pump power

Geometry optimizations from full-wave simulations show about 2 orders of magnitude increase in efficiency

Research Article

Vol. 5, No. 9 / Optica 1

optica

Sensitivity limits of millimeter-wave photonic radiometers based on efficient electro-optic upconverters

GABRIEL SANTAMARÍA BOTELLO,^{1,†} FLORIAN SEDLMEIR,^{2,†} ALFREDO RUEDA,^{2,3,4,5,6} KERLOS ATIA ABDALMALAK,¹ ELLIOTT R. BROWN,⁷ GERD LEUCHS,^{2,8} SASCHA PREU,⁹ DANIEL SEGOVIA-VARGAS,¹ DMITRY V. STREKALOV,¹⁰ LUIS ENRIQUE GARCÍA MUÑOZ,^{1,*} AND HARALD G. L. SCHWEFEL^{5,6}

Electro-optic up-converter: Experimental proof of concept

Research Article Vol. 3, No. 6 / June 2016 / Optica 597

optica

Efficient microwave to optical photon conversion: an electro-optical realization

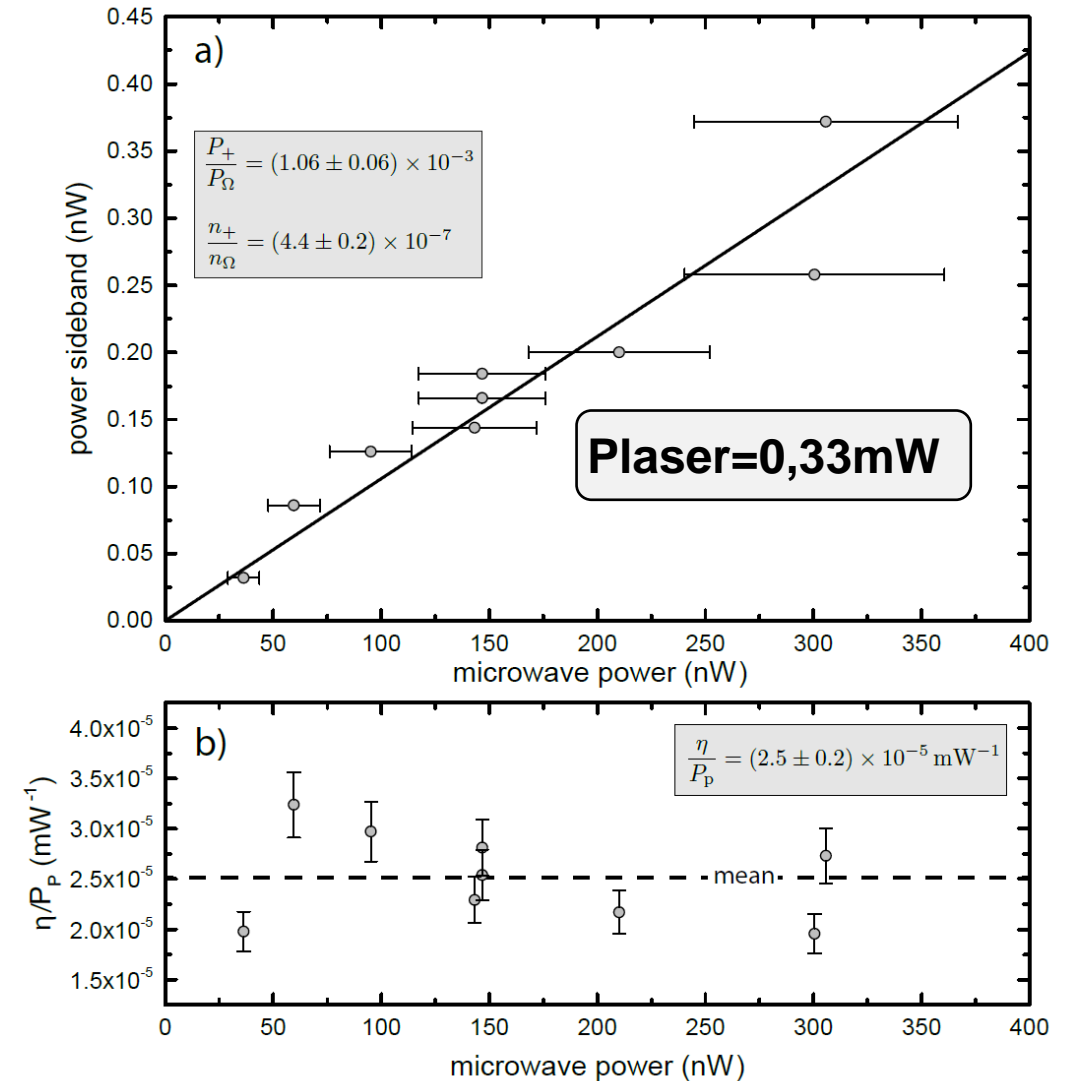
ALFREDO RUEDA,^{1,2,3,†} FLORIAN SEDLMEIR,^{1,2,3,5,†} MICHELE C. COLLODO,^{1,2,4,5} ULRICH VOGL,^{1,2} BIRGIT STILLER,^{1,2,6} GERHARD SCHUNK,^{1,2,3} DMITRY V. STREKALOV,¹ CHRISTOPH MARQUARDT,^{1,2} JOHANNES M. FINK,^{4,7} OSKAR PAINTER,⁴ GERD LEUCHS,^{1,2} AND HARALD G. L. SCHWEFEL^{5,*}

Research Article Vol. 5, No. 9 / Optica 1

optica

Sensitivity limits of millimeter-wave photonic radiometers based on efficient electro-optic upconverters

GABRIEL SANTAMARÍA BOTELLO,^{1,†} FLORIAN SEDLMEIR,^{2,†} ALFREDO RUEDA,^{2,3,4,5,6} KERLOS ATIA ABDALMALAK,¹ ELLIOTT R. BROWN,⁷ GERD LEUCHS,^{2,8} SASCHA PREU,⁹ DANIEL SEGOVIA-VARGAS,¹ DMITRY V. STREKALOV,¹⁰ LUIS ENRIQUE GARCÍA MUÑOZ,^{1,*} AND HARALD G. L. SCHWEFEL^{5,6}



Motivación

Electro optic up-converter

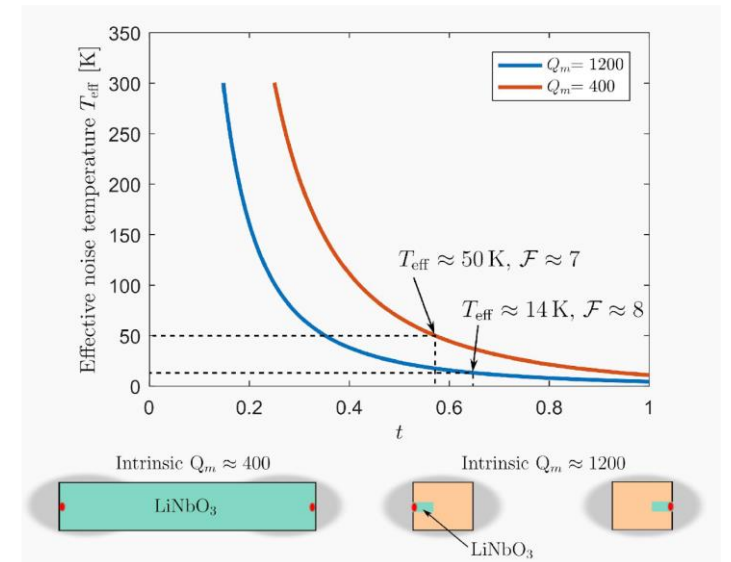
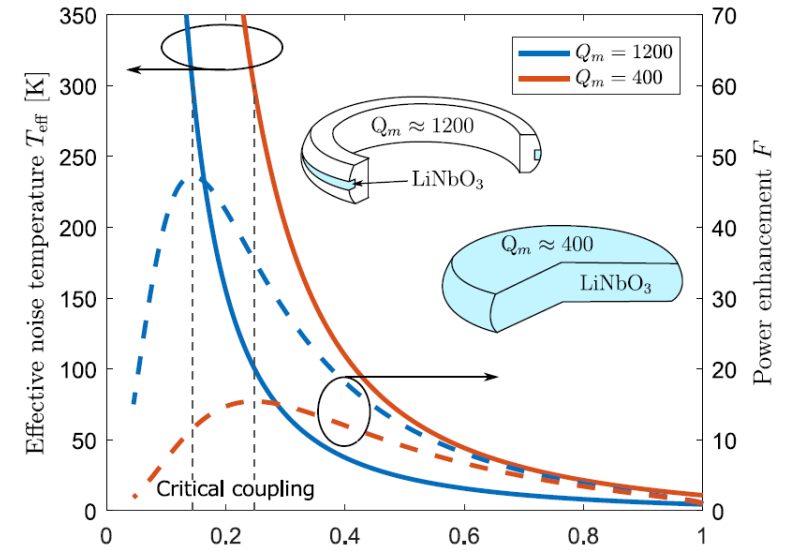
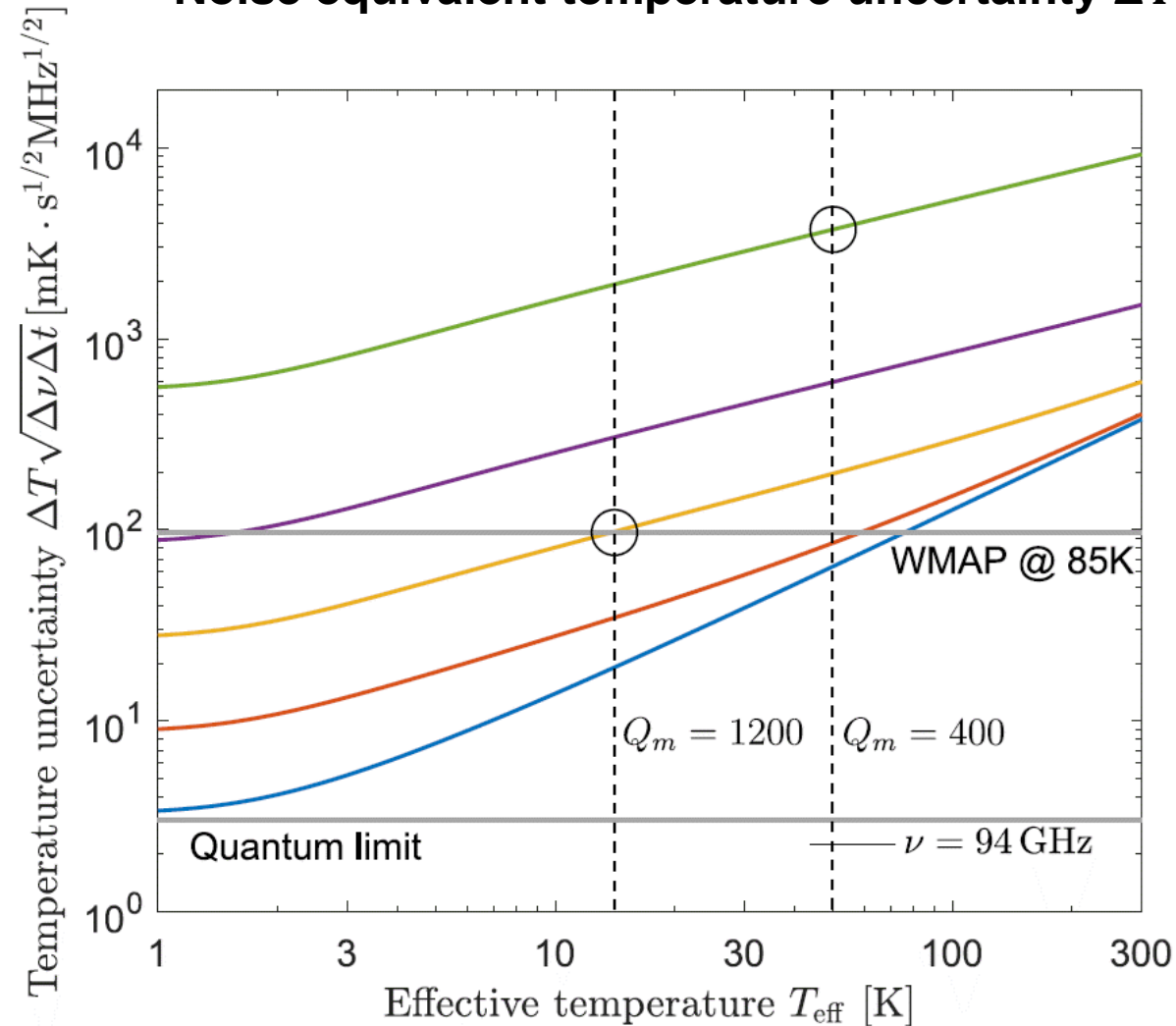
Experiment

Sensitivity as radiometer

Conclusions

Sensitivity as a radiometer

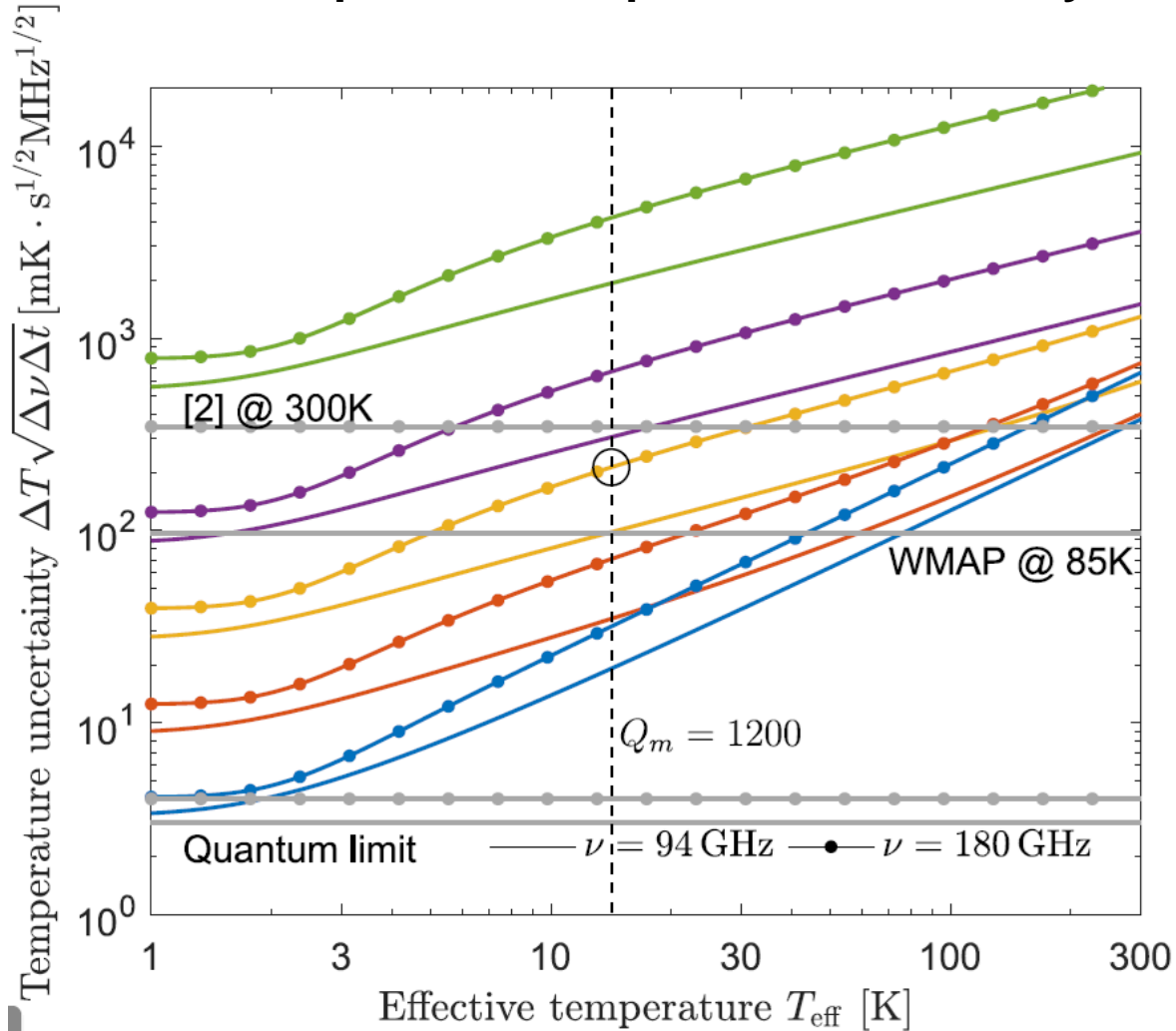
Noise equivalent temperature uncertainty ΔT (normalized)



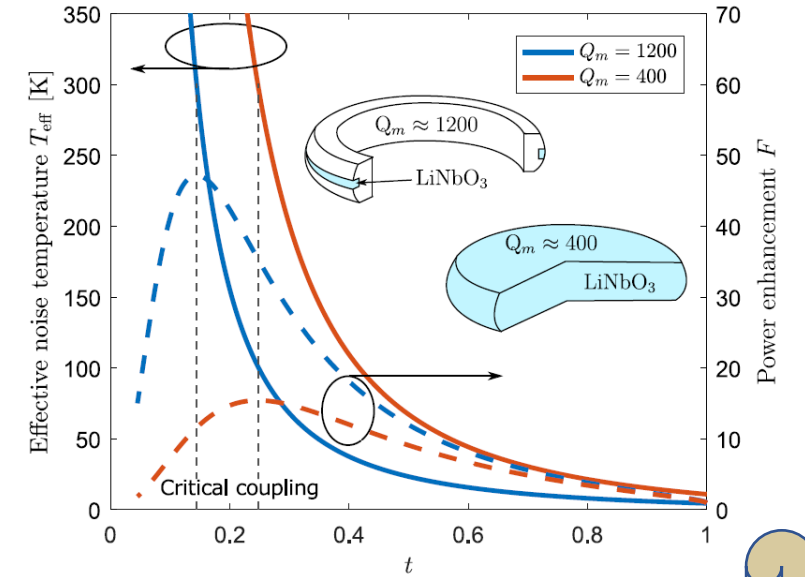
Sensitivity as a radiometer



Noise equivalent temperature uncertainty ΔT (normalized)



- $\eta = 1$
- $\eta = 10^{-1}$
- $\eta = 10^{-2}$
- $\eta = 10^{-3}$
- $\eta = 2.5 \times 10^{-5}$



Research Article Vol. 3, No. 6 / June 2016 / Optica 597

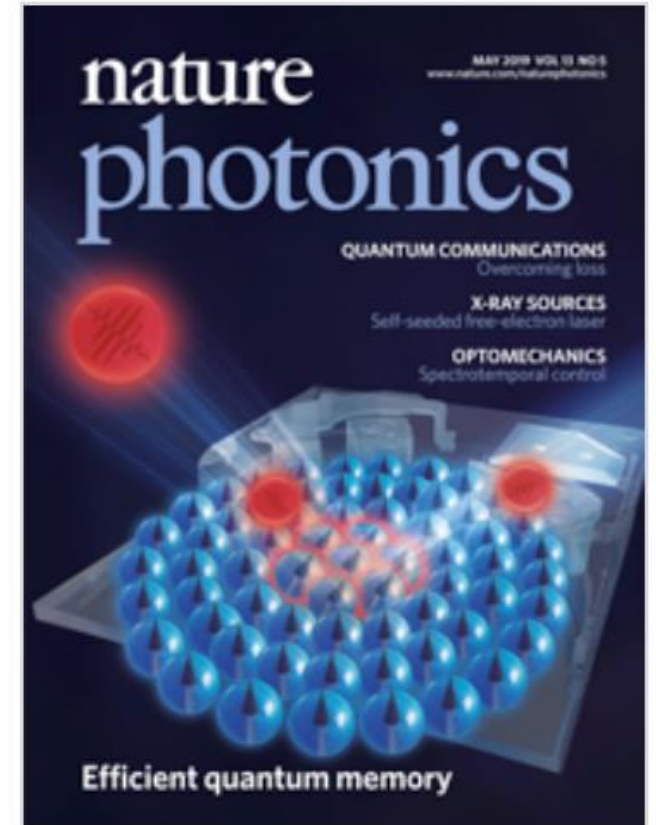
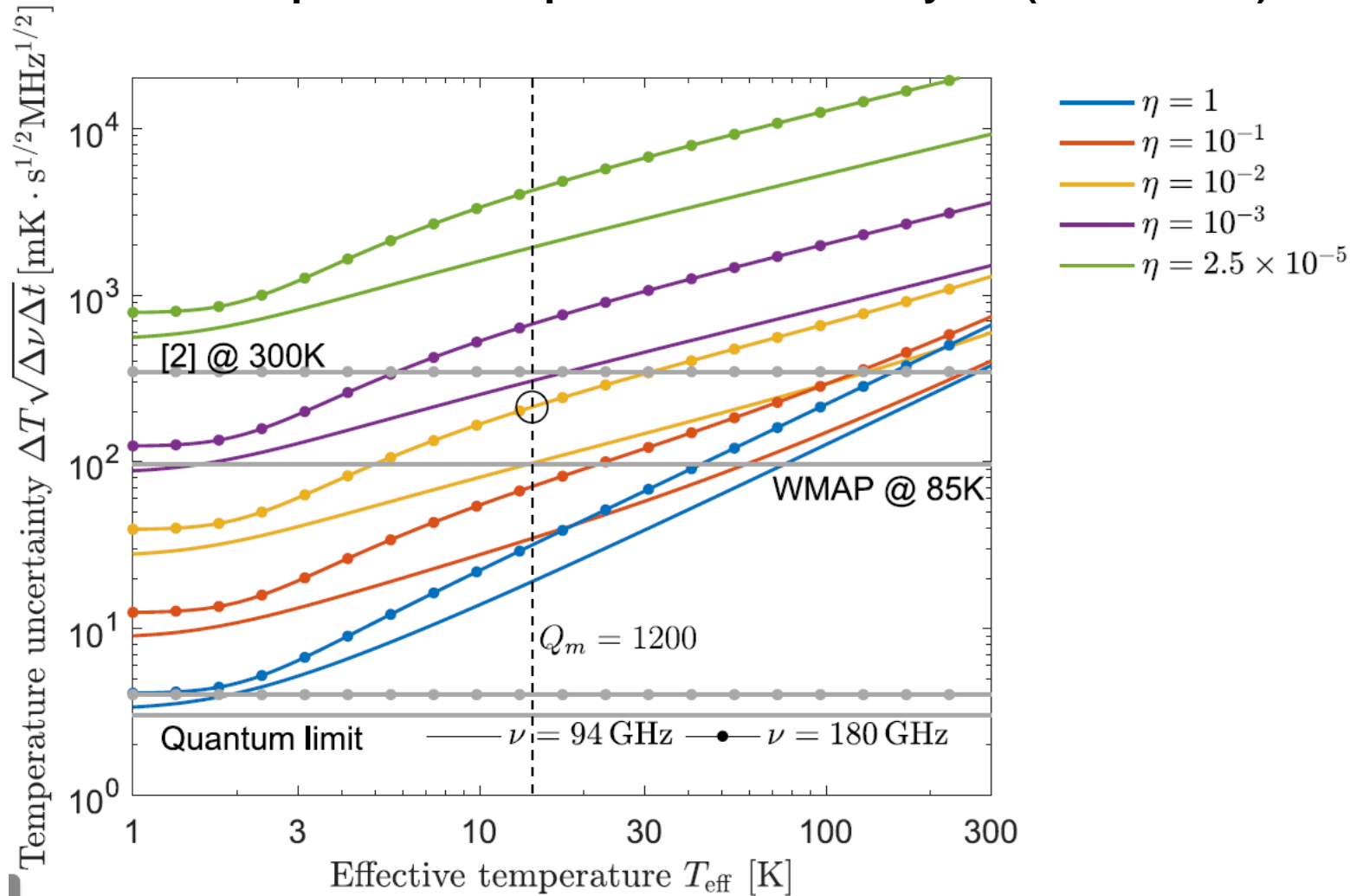
optica

Efficient microwave to optical photon conversion: an electro-optical realization

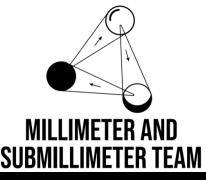
ALFREDO RUEDA,^{1,2,3,†} FLORIAN SEDLMEIR,^{1,2,3,5,†} MICHELE C. COLLODO,^{1,2,4,5} ULRICH VOGL,^{1,2} BIRGIT STILLER,^{1,2,6}
 GERHARD SCHUNK,^{1,2,3} DMITRY V. STREKALOV,¹ CHRISTOPH MARQUARDT,^{1,2} JOHANNES M. FINK,^{4,7}
 OSKAR PAINTER,⁴ GERD LEUCHS,^{1,2} AND HARALD G. L. SCHWEFEL^{5,*}

Sensitivity as a radiometer

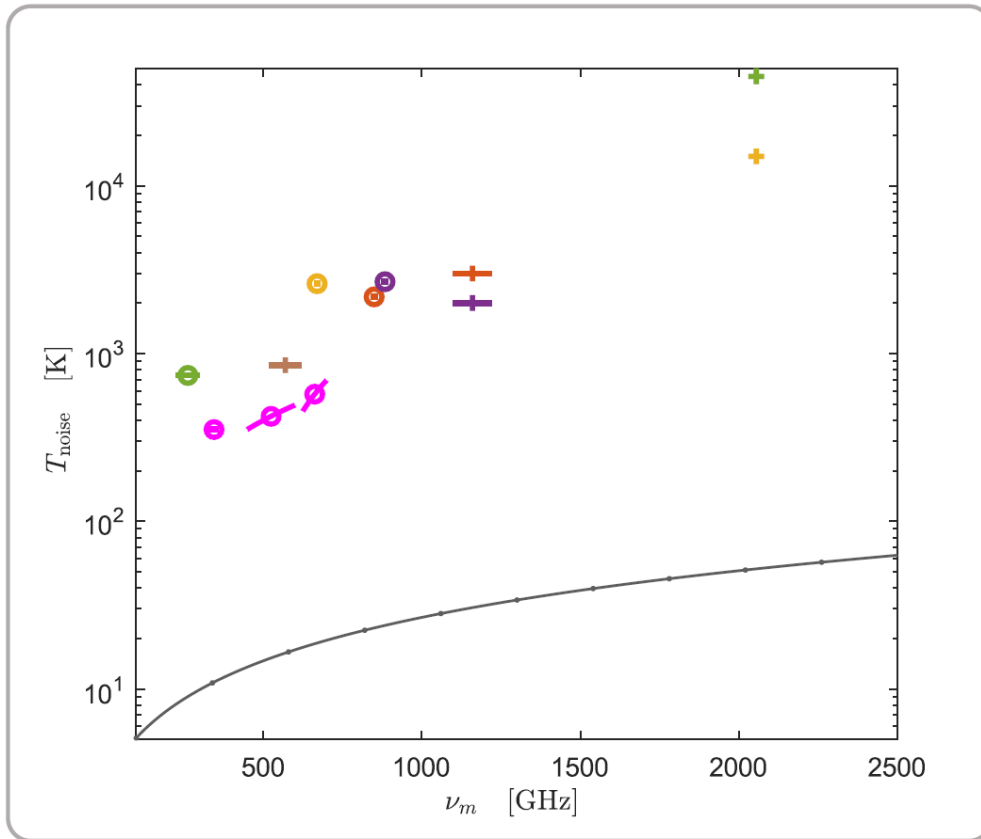
Noise equivalent temperature uncertainty ΔT (normalized)



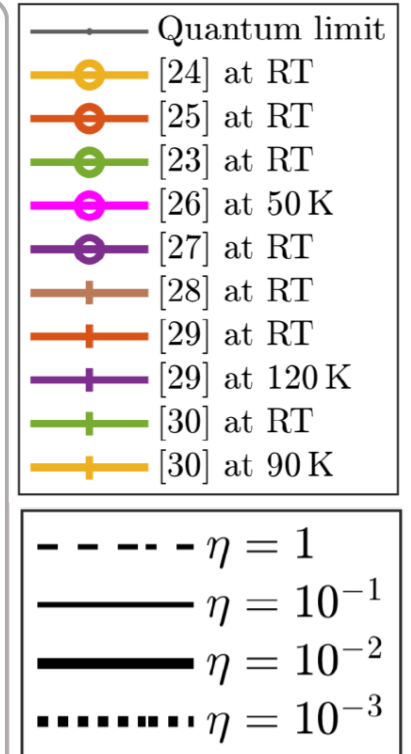
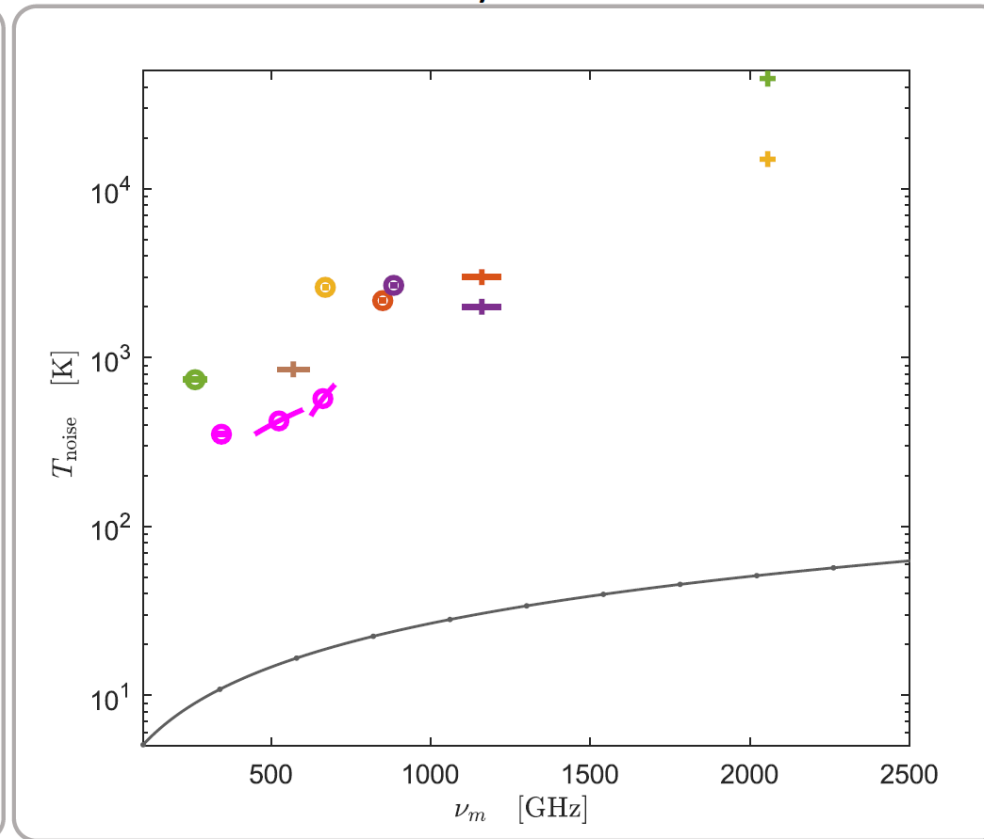
Sensitivity as a radiometer



Direct detection

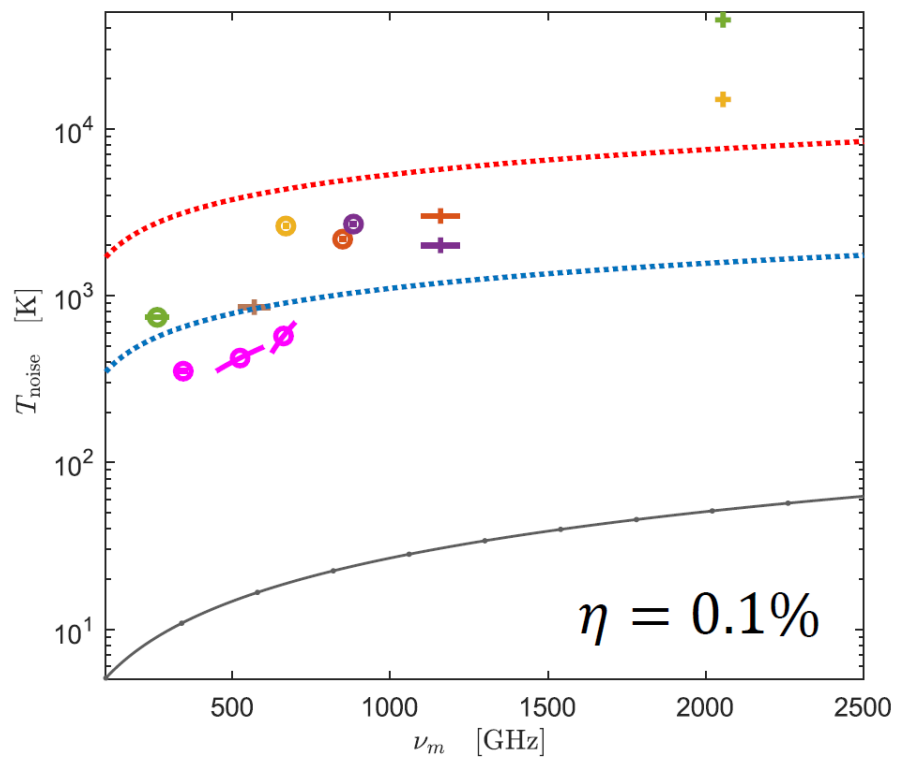


Heterodyne detection

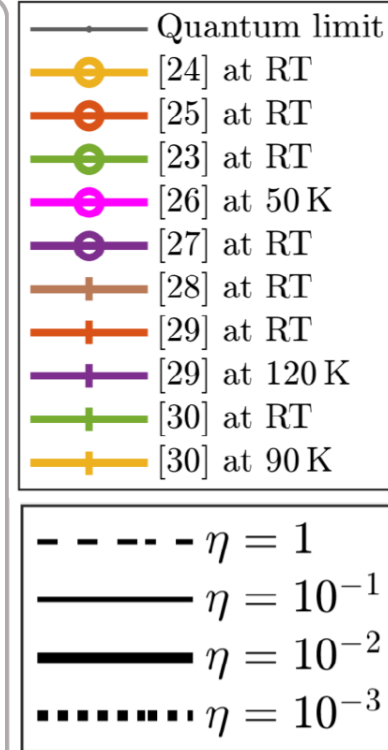
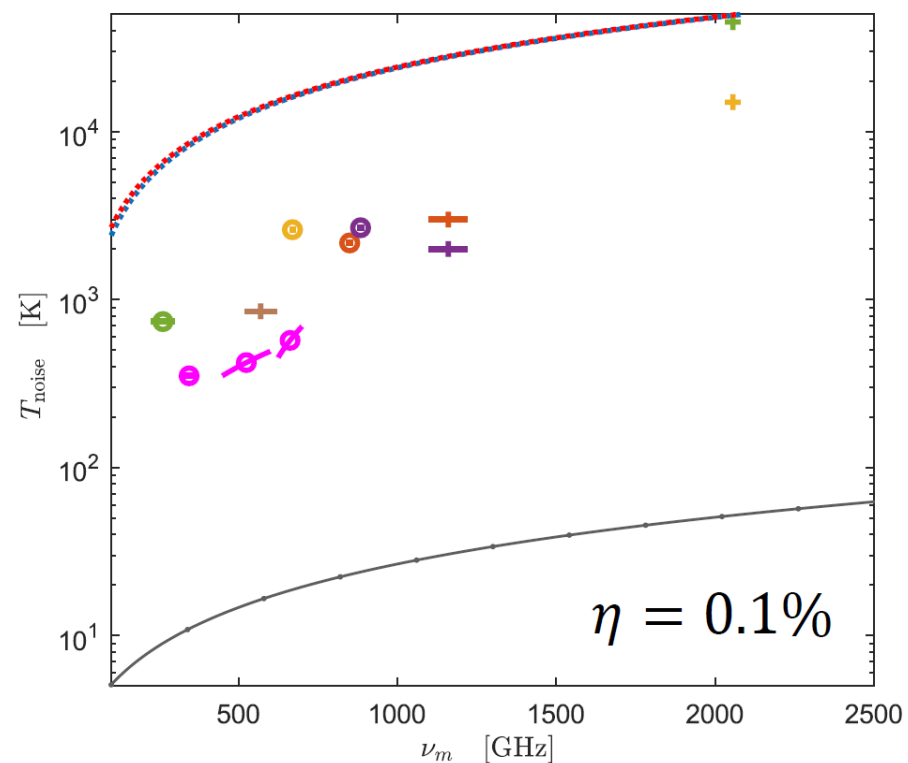


Sensitivity as a radiometer

Direct detection



Heterodyne detection

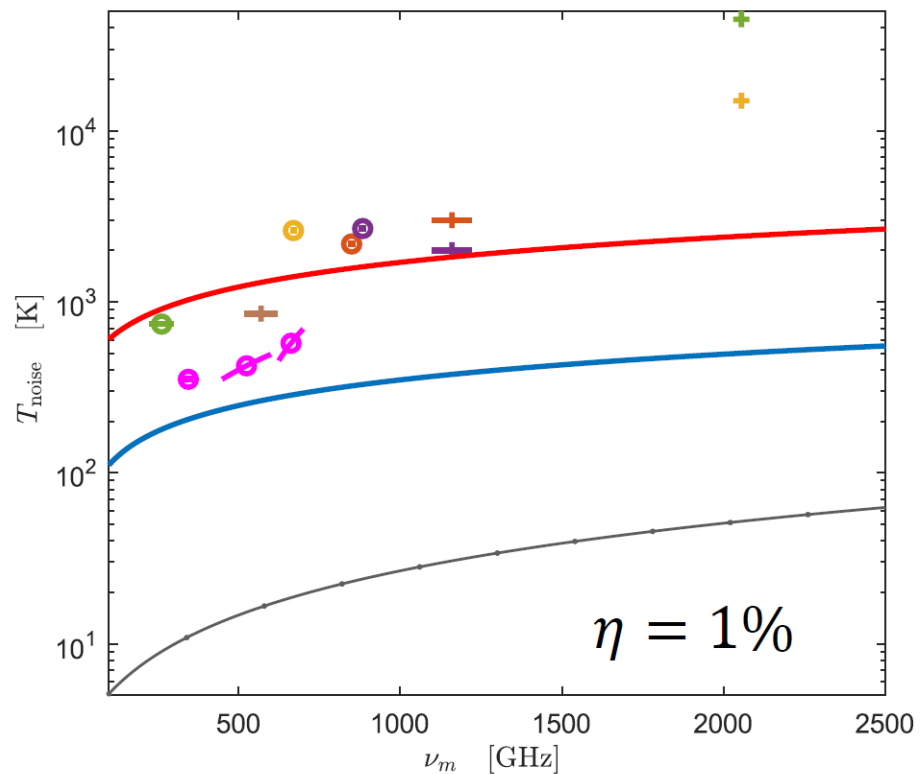


— $T_e = 10 \text{ K} ; Q_{\text{THZ}} \gtrsim 1000$

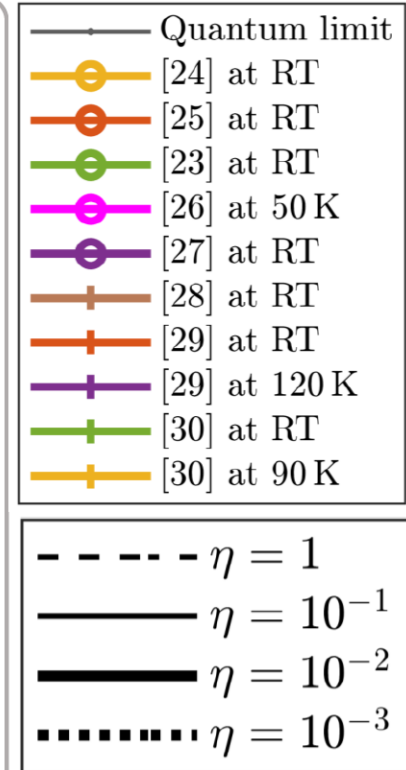
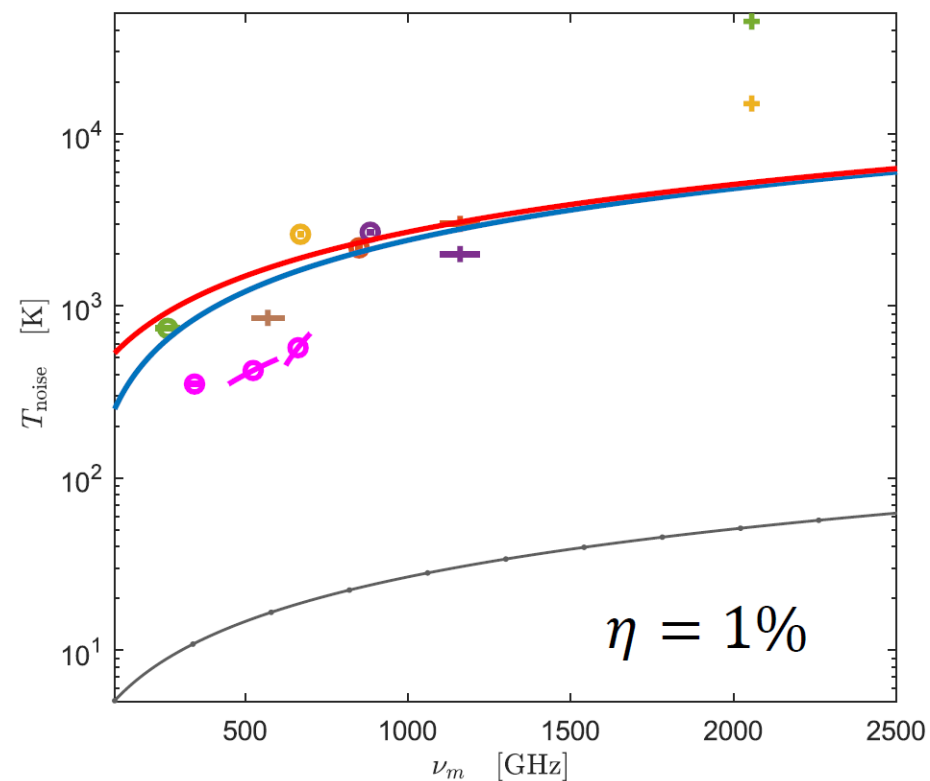
... $T_e = 290 \text{ K} ; Q_{\text{THZ}} < 100$

Sensitivity as a radiometer

Direct detection



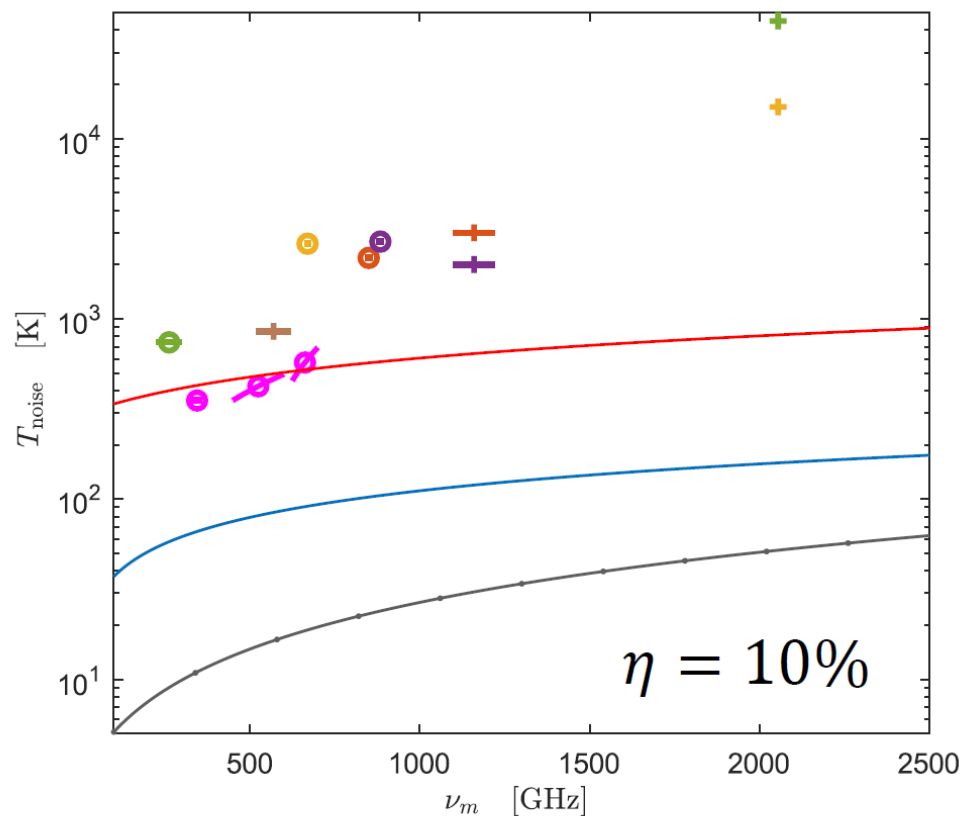
Heterodyne detection



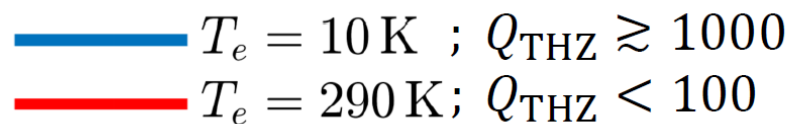
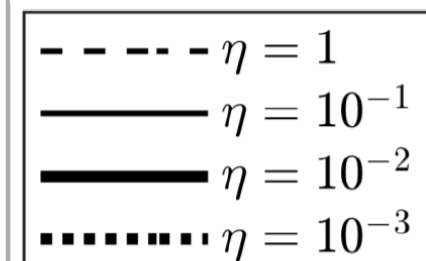
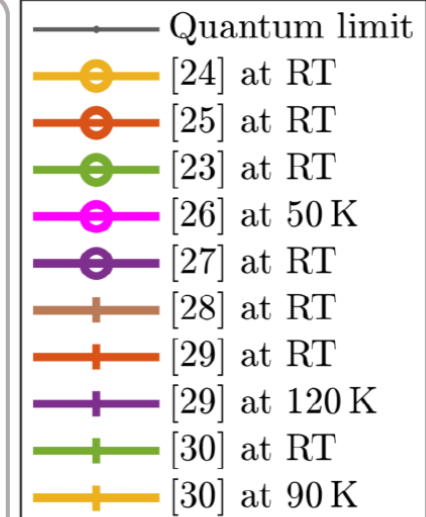
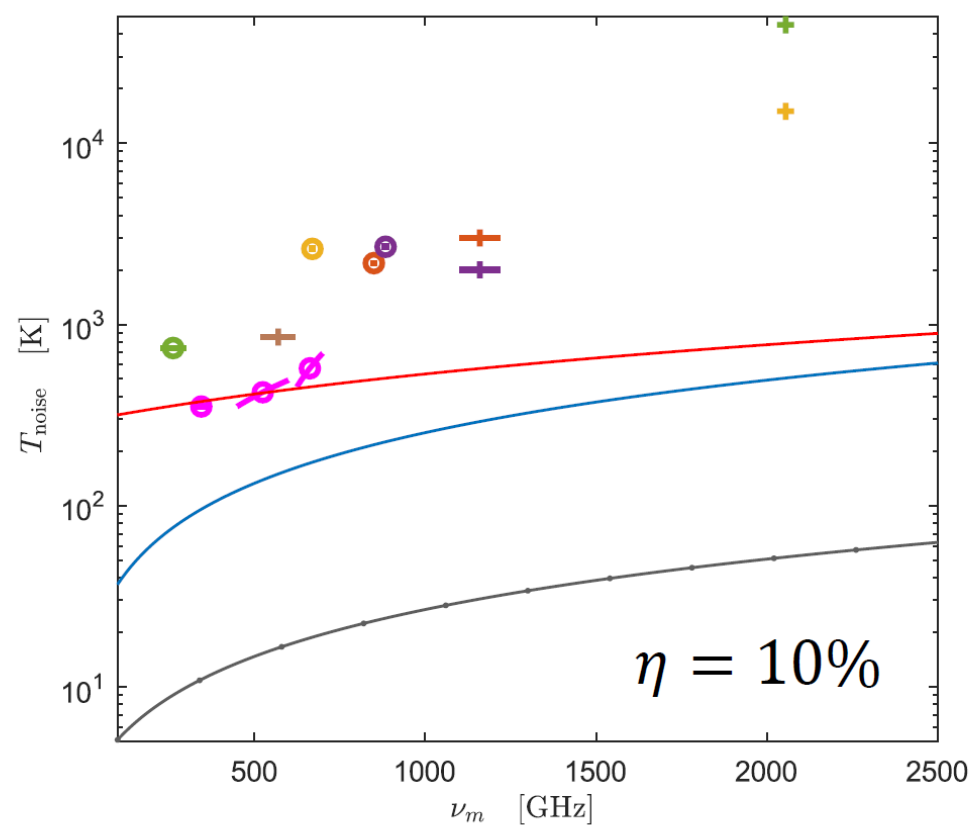
— $T_e = 10 \text{ K} ; Q_{\text{THZ}} \gtrsim 1000$
— $T_e = 290 \text{ K} ; Q_{\text{THZ}} < 100$

Sensitivity as a radiometer

Direct detection

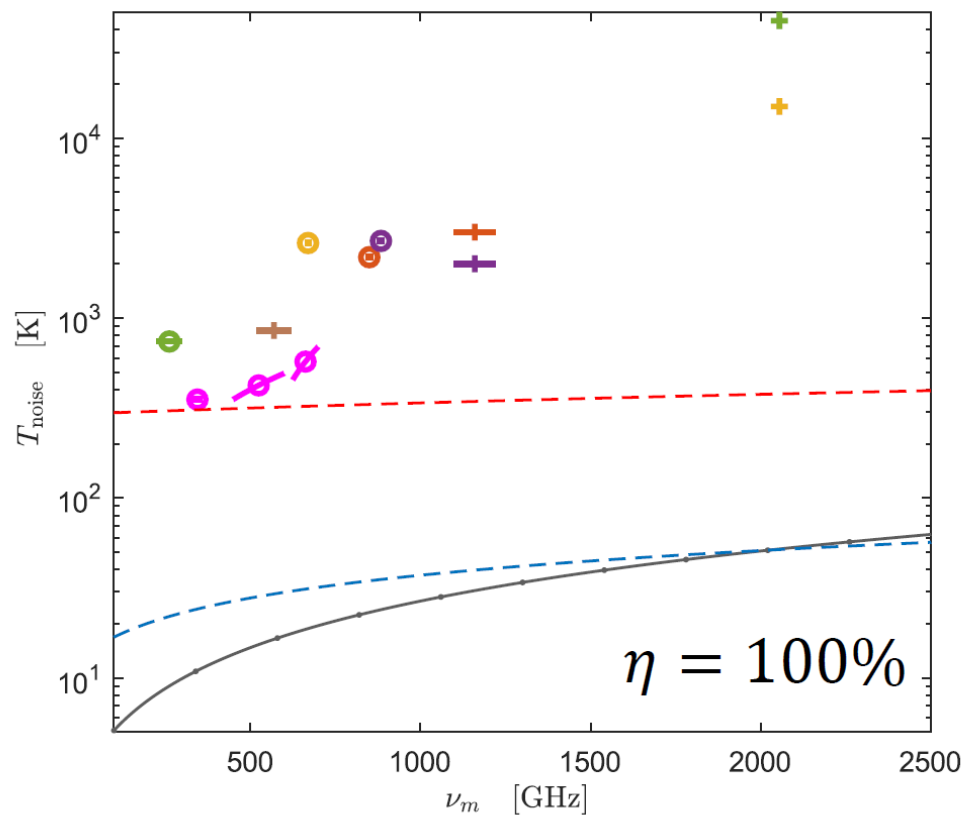


Heterodyne detection

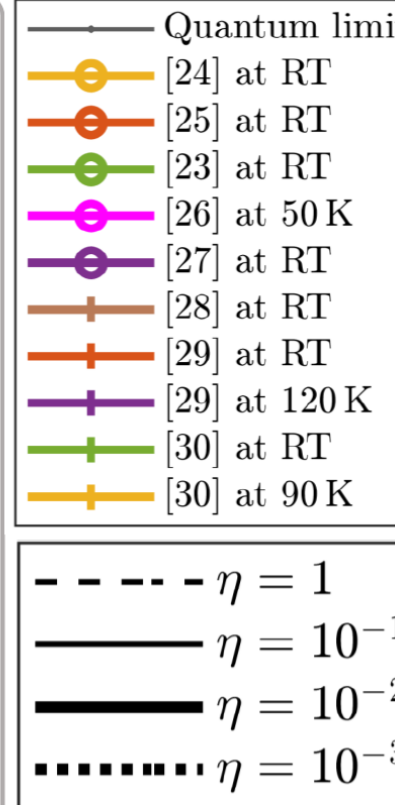
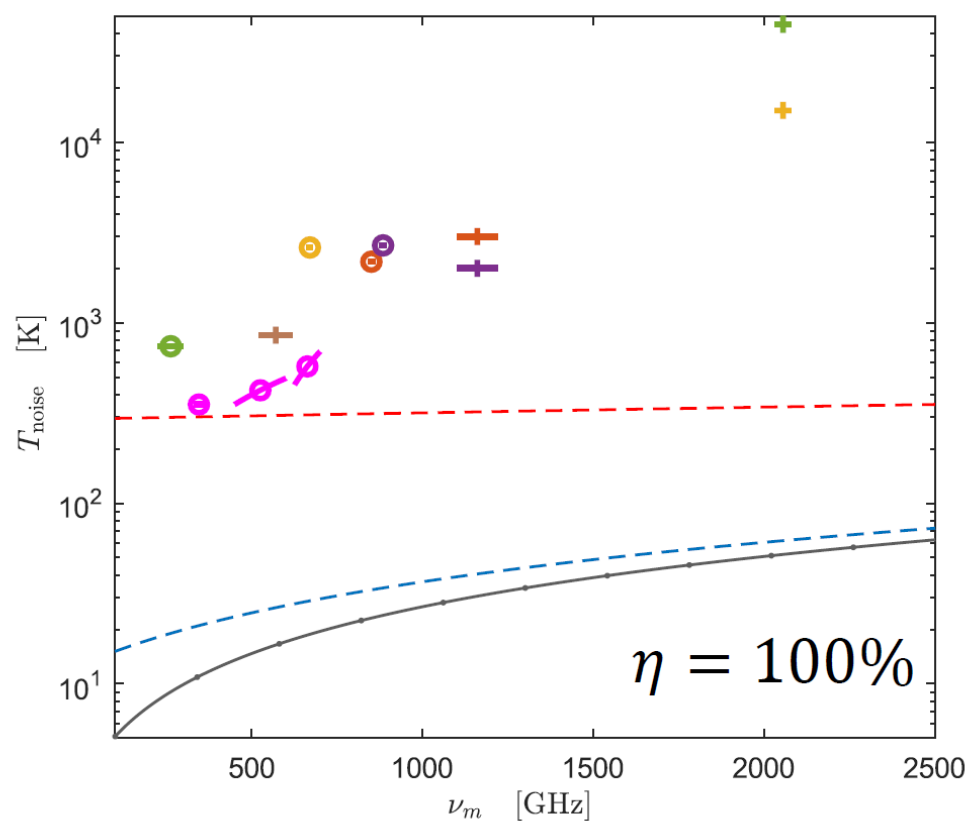


Sensitivity as a radiometer

Direct detection

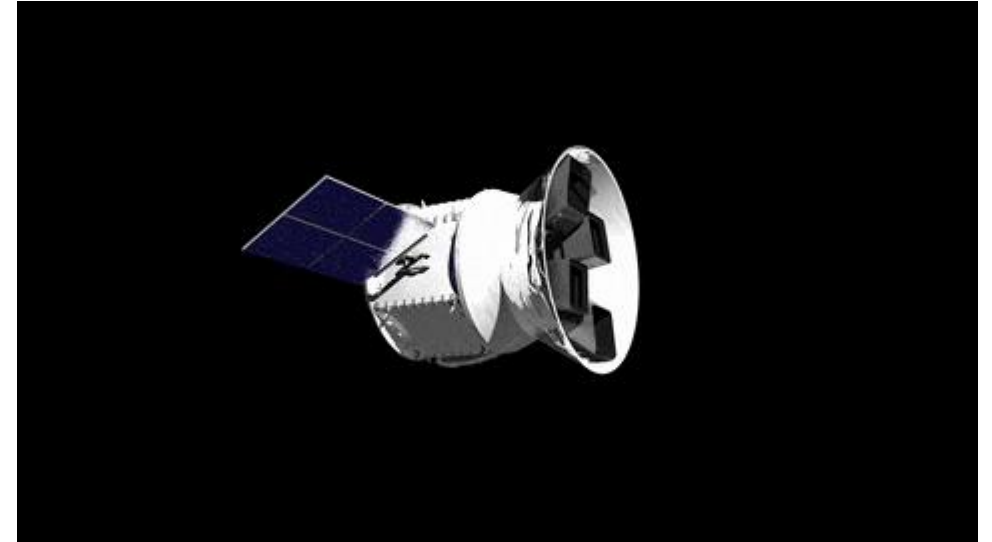


Heterodyne detection



— $T_e = 10 \text{ K} ; Q_{\text{THZ}} \gtrsim 1000$
 — $T_e = 290 \text{ K} ; Q_{\text{THZ}} < 100$

Millimeter wave Array at Room Temperature for Instruments in LEO Altitude Radio Astronomy (MARTINLARA) desarrolla una misión espacial de demostración en órbita integrando en un nanosatélite tecnologías de uso espacial en radioastronomía, observación de la Tierra, fotónica espacial, y propulsión espacial eléctrica.



Millimeter wave Array at Room Temperature for
INstruments in LEO Altitude Radio Astronomy
(MARTINLARA)

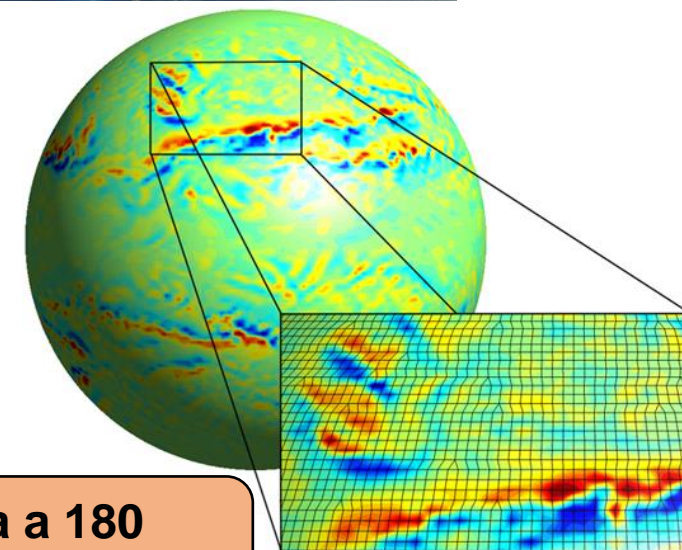
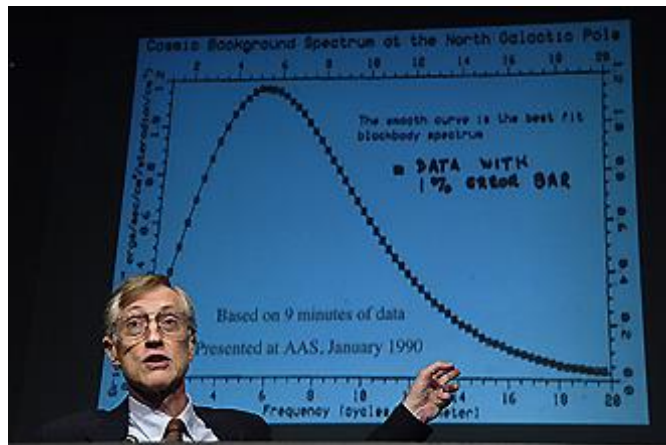
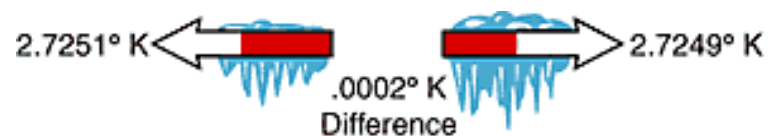
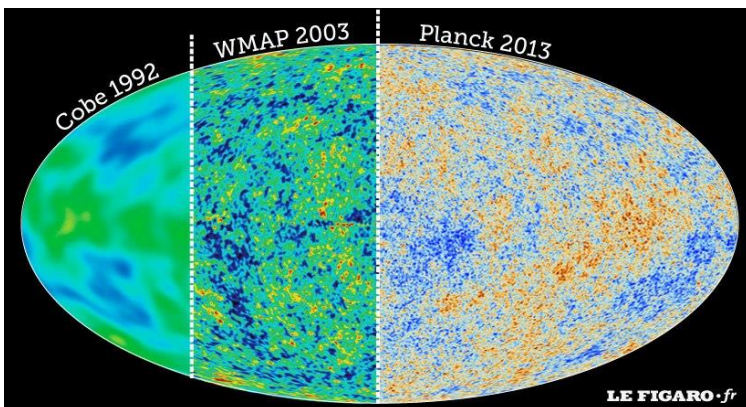
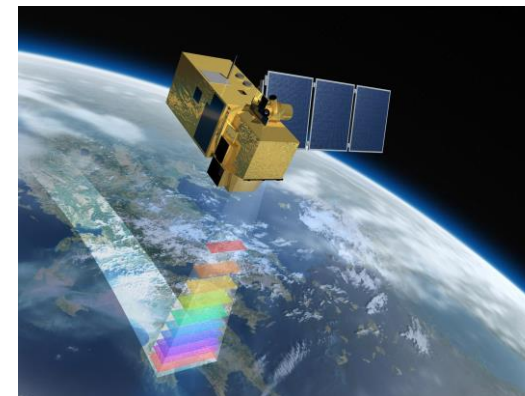


MARTINLARA CUBESAT

Anisotropías de CMB

CMB a 180, 200 y 250 GHz

“Numerical Weather Prediction”



Vapor de agua a 180 GHz

Anisotropías de CMB

CMB a 150, 200 y 250 GHz

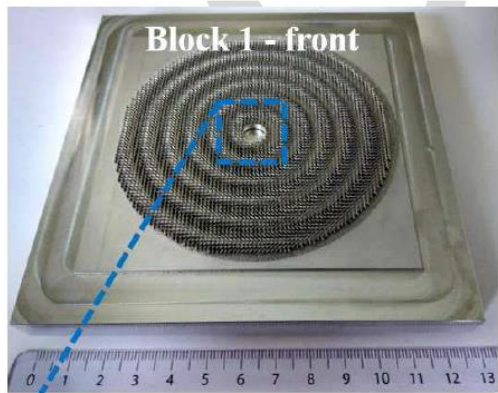
“Numerical Weather Prediction”

NWP a 150, 200 y 250 GHz

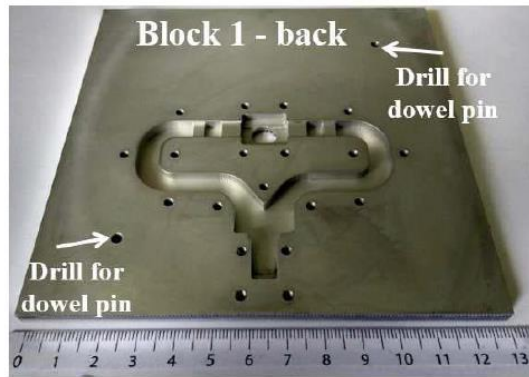
Eficiencia de apertura = 40%
Órbita = 800 km
Directividad = 38 dB
Apertura = 20*lambda
Cielo → 10° (3x3°)
Tierra → 10° (40x40 km de spot)

Diámetro_{150 GHz} = 8 cm
Diámetro_{200 GHz} = 6 cm
Diámetro_{250 GHz} = 4,8 cm

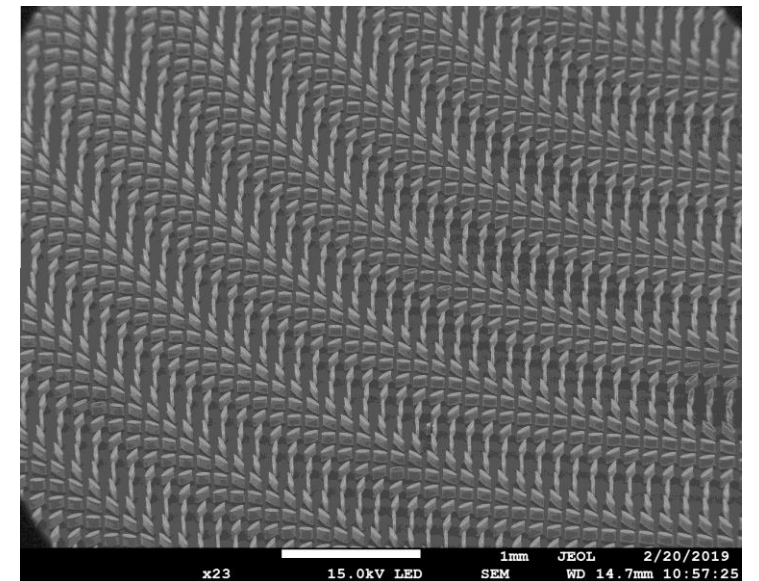
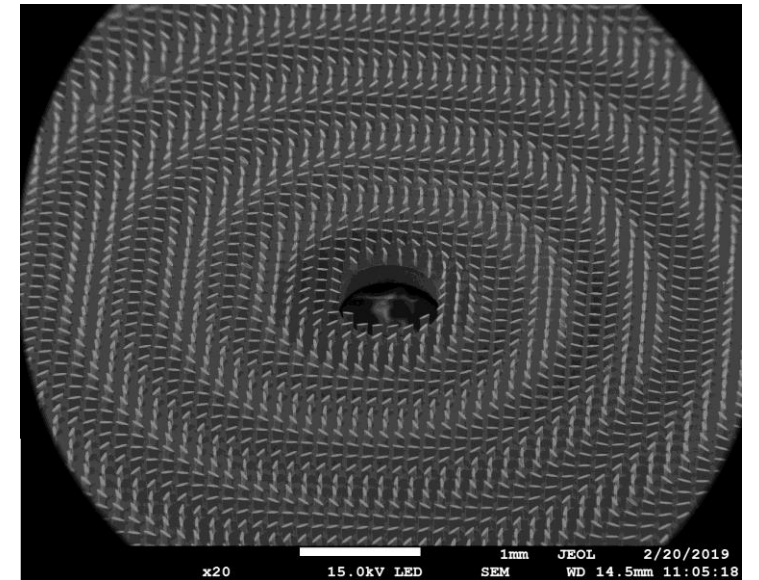
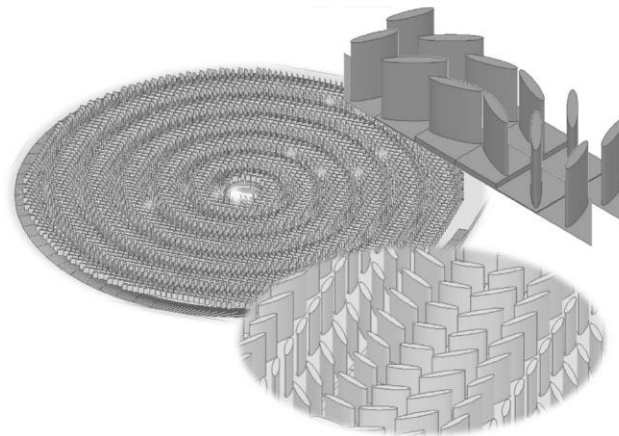
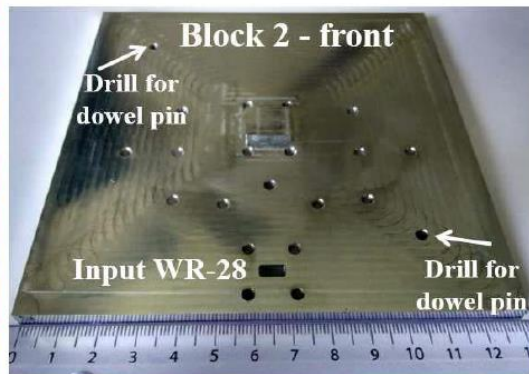
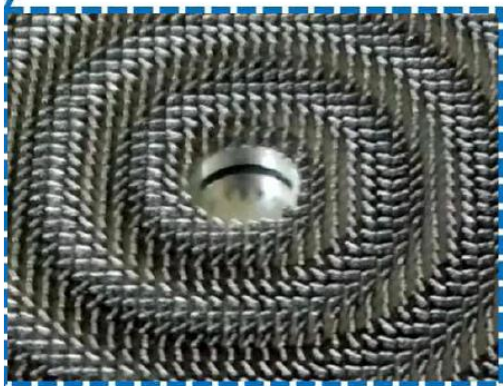
Antennas

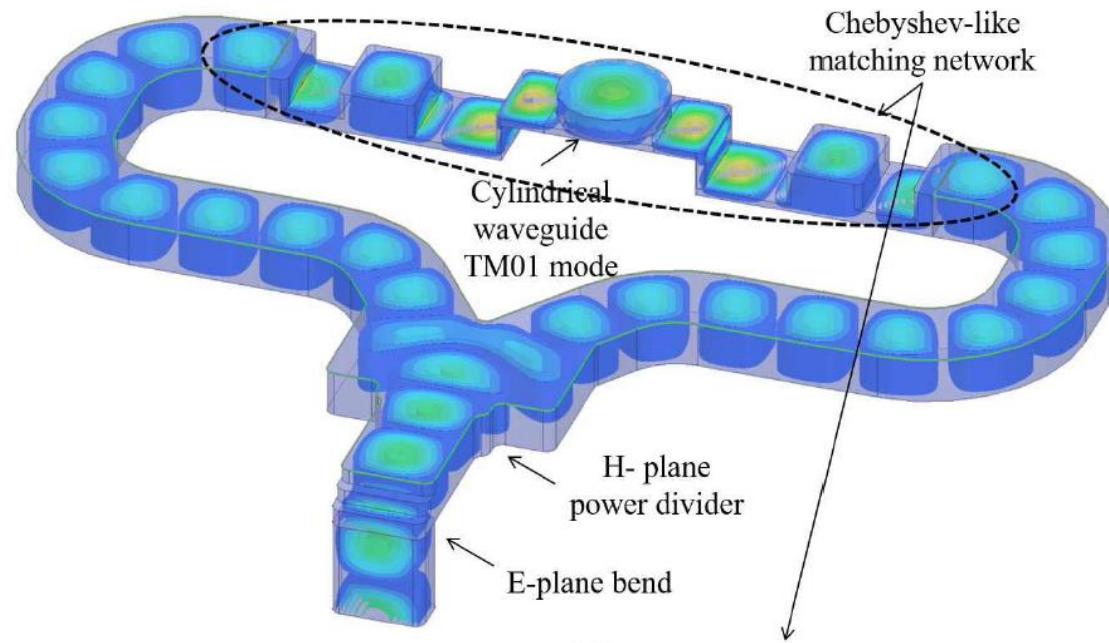
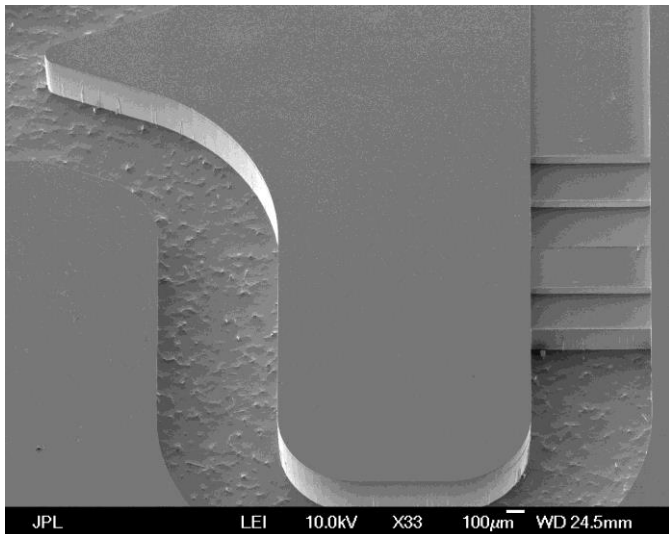
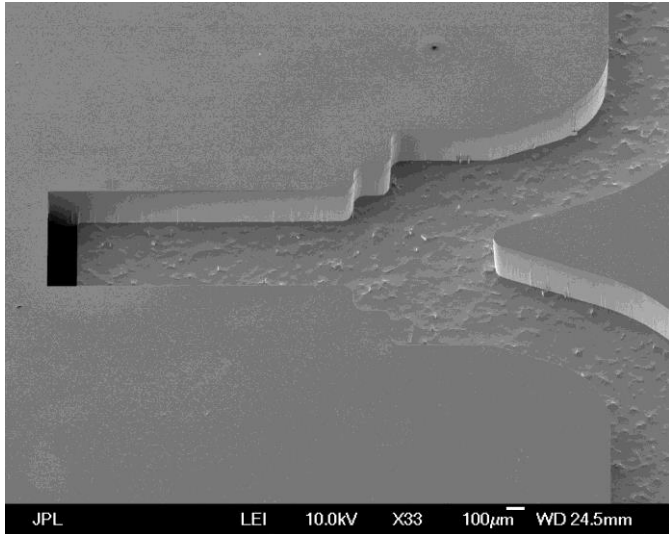


a)

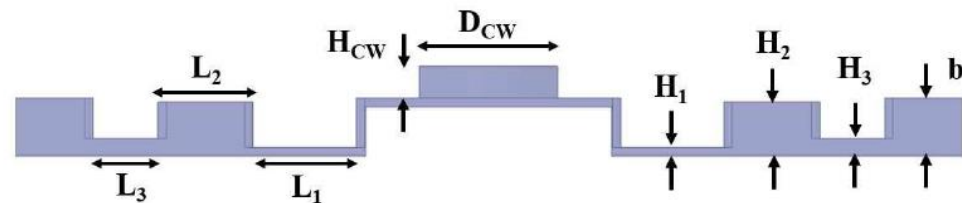


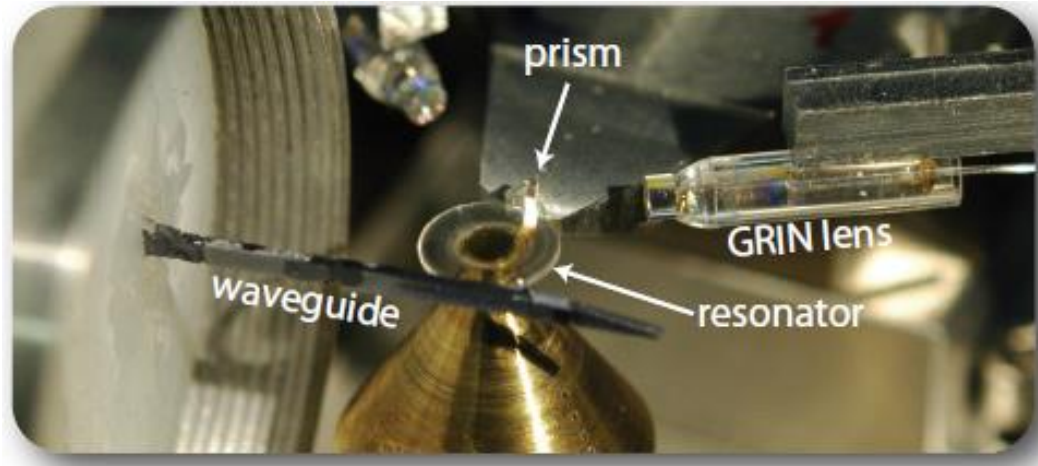
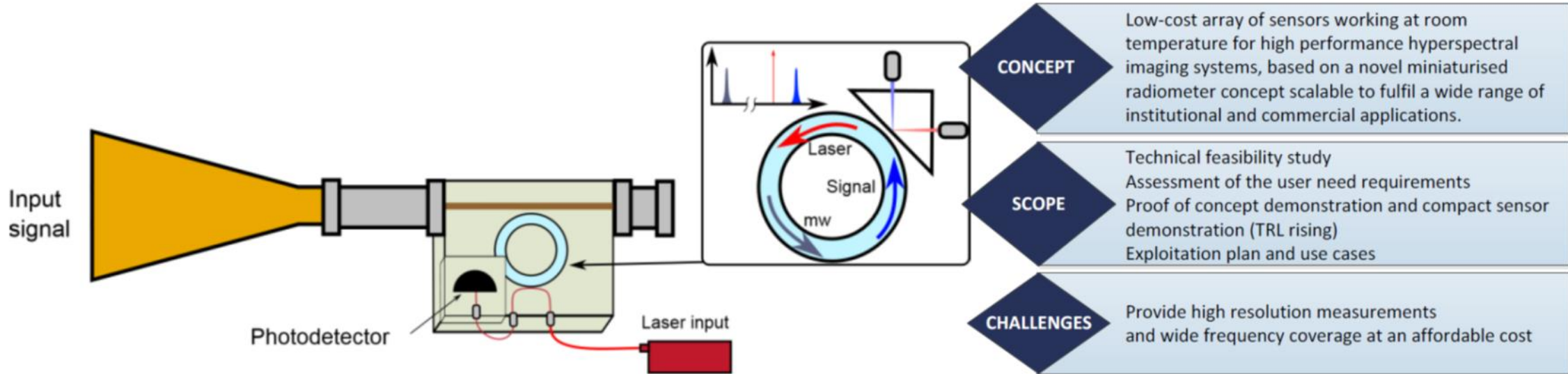
b)





(a)





Cada radiómetro (sin guía de onda ni antena):

Caja de aluminio de 3 mm de espesor

Peso: 500 g

Volumen: 150 x 80 x 30 mm

Consumo: 10 W

Motivación

Electro optic up-converter

Experiment

Sensitivity as radiometer

Conclusions

Currently the experiment is limited by shot noise.

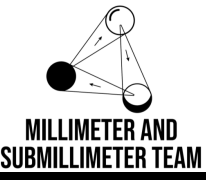
Optimized geometries and structures have to be designed to reduce thermal noise and increase efficiency.

For intrinsic (unloaded) microwave $Q \approx 1500$ and $\eta \approx 10\%$, the sensitivity would be 10 times above the quantum limit at room temperature.

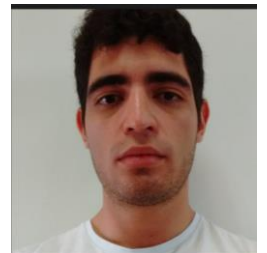
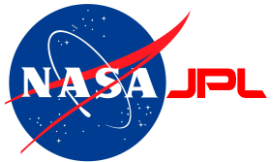
The same concept can be extended to the sub-millimeter range by just scaling the resonator's geometry.

The conversion bandwidth is not fundamentally limited. We are seeking for other ideas and approaches to achieve broadband up-conversion.

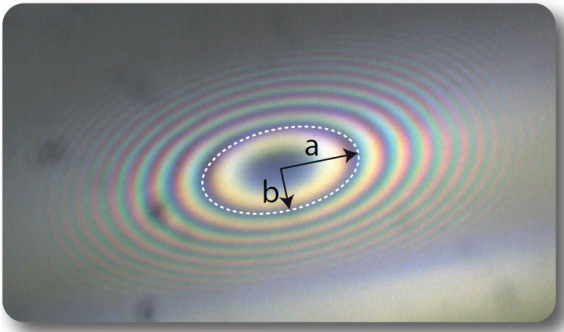
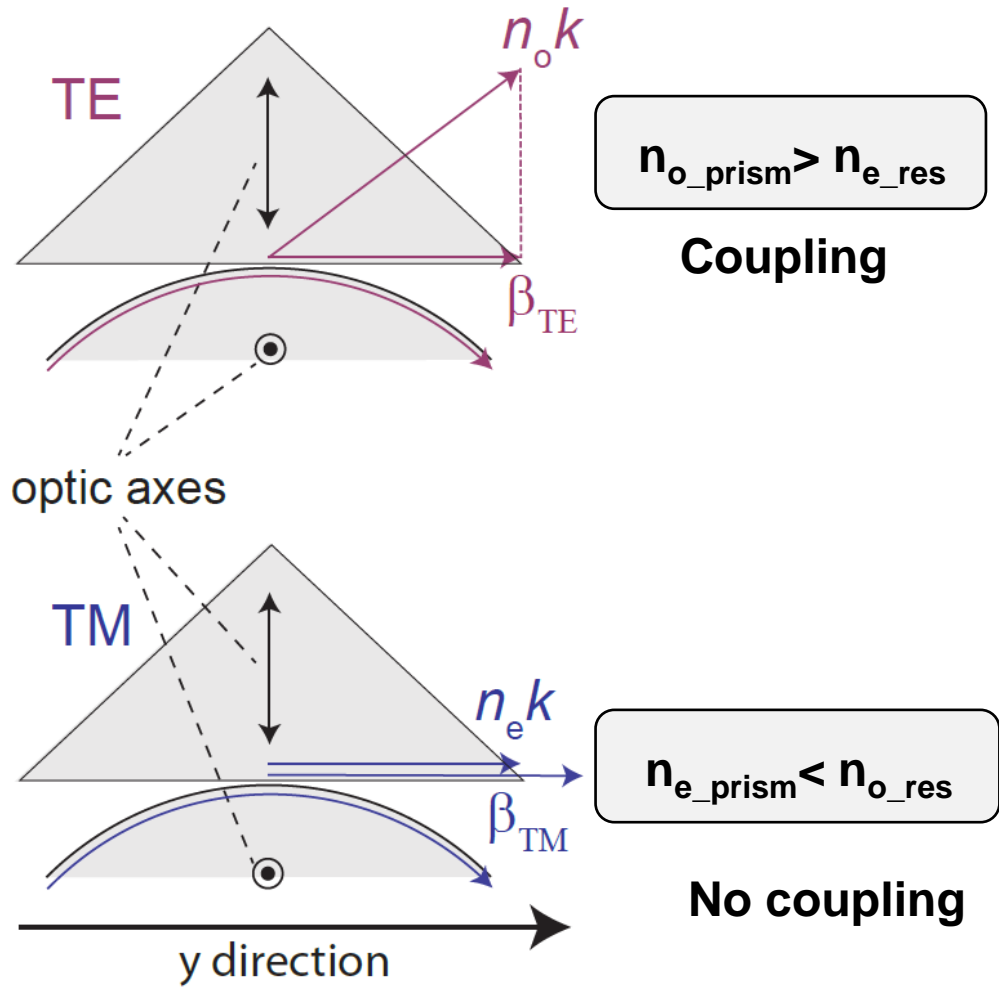
Conclusiones: el equipo de trabajo



University of Colorado
Boulder

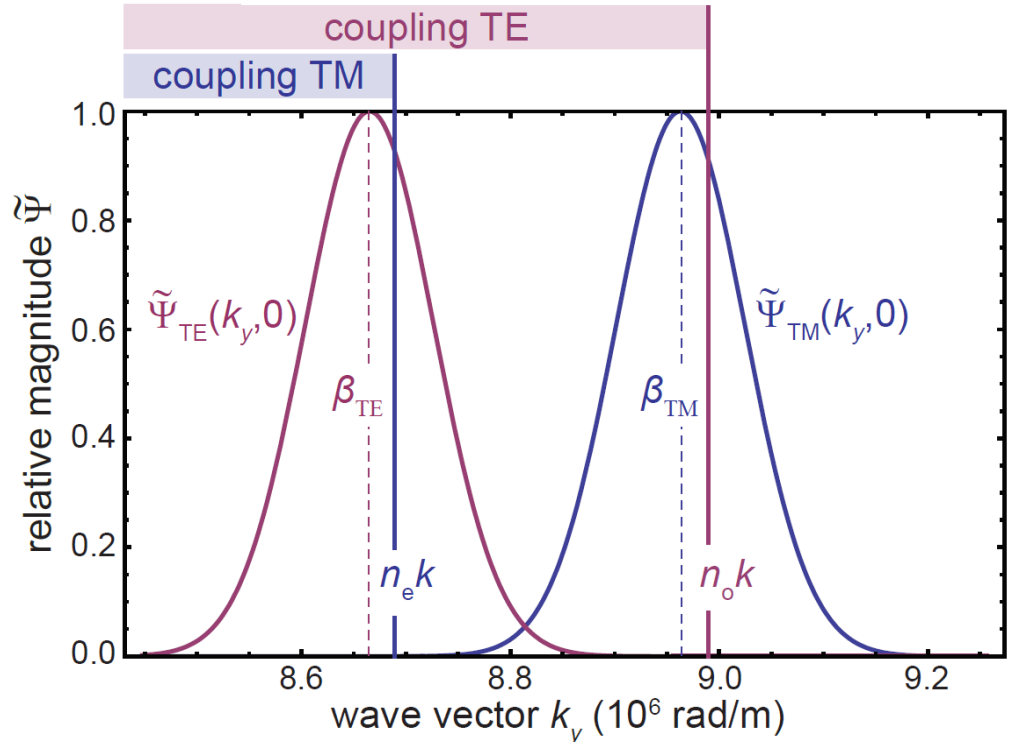


Electro-optic up-converter: increasing bandwidth

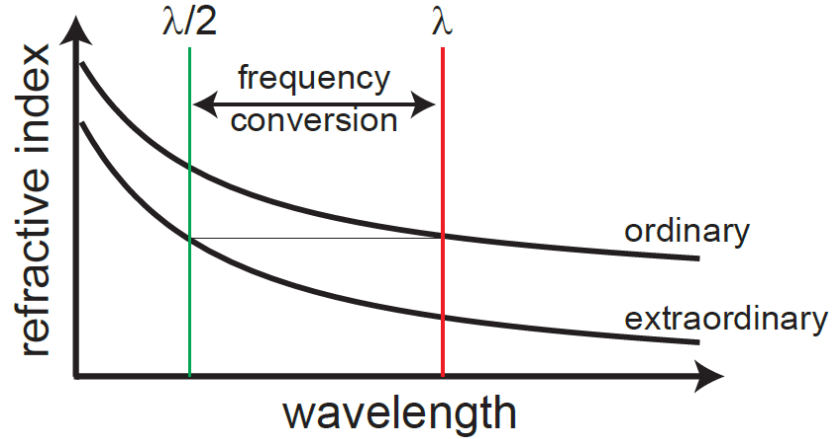


$$\Psi^P(x_p, y, z) \propto \Psi^r(x, y, z) \Big|_{\rho=r} \times \exp \left[-\kappa \left(d + \frac{z^2}{2r} + \frac{y^2}{2R} \right) \right]$$

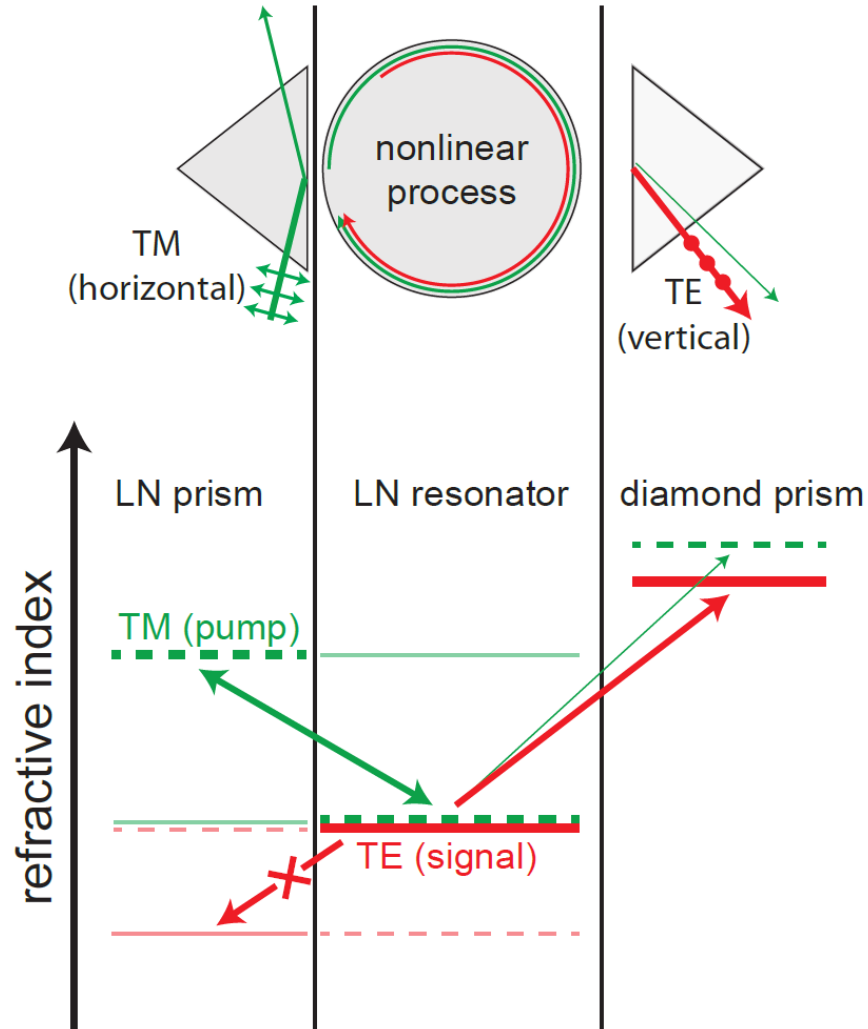
$$|\tilde{\Psi}^P(k_y, k_z)|^2 \propto \exp \left[-\Delta y^2 (k_y - \beta)^2 - \Delta z^2 k_z^2 \right]$$



Electro-optic up-converter: increasing bandwidth



- dashed line: TM polarized
- straight line: TE polarized
- ==== green: pump light
- ==== red: signal light



Second harmonic generation (SHG)