

Desigualdad de Bell Cómica

Juan Rafael Álvarez

Estudiante de Física

Universidad de los Andes

**Testing Bell's Inequality with Cosmic Photons:
Closing the Settings-Independence Loophole**

Jason Gallicchio¹, Andrew S. Friedman², and David I. Kaiser^{2*}

¹ *Kavli Institute for Cosmological Physics, University of Chicago, Chicago, Illinois 60637 USA*

² *Center for Theoretical Physics and Department of Physics,
Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139 USA*

(Dated: October 15, 2013)

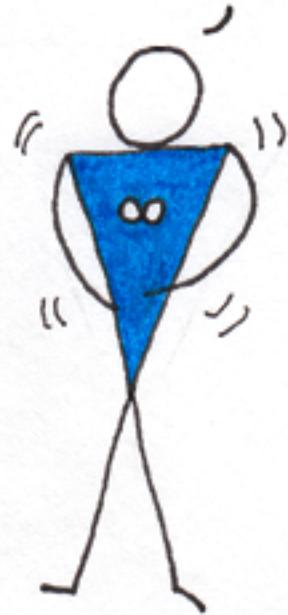
Menú

1. El camino hacia la desigualdad de Bell
2. *Loopholes* en la desigualdad de Bell
3. Quásares e independencia
4. Distancia y *redshift*
5. Observatorios viables
6. Perspectivas y conclusiones

Enredamiento cuántico

- Cuando el estado cuántico de una partícula no puede describirse sin utilizar el estado cuántico de otra, decimos que tenemos **enredamiento cuántico** entre las dos.
- Este fenómeno no depende del hecho de que ambas partículas se encuentren a distancia.

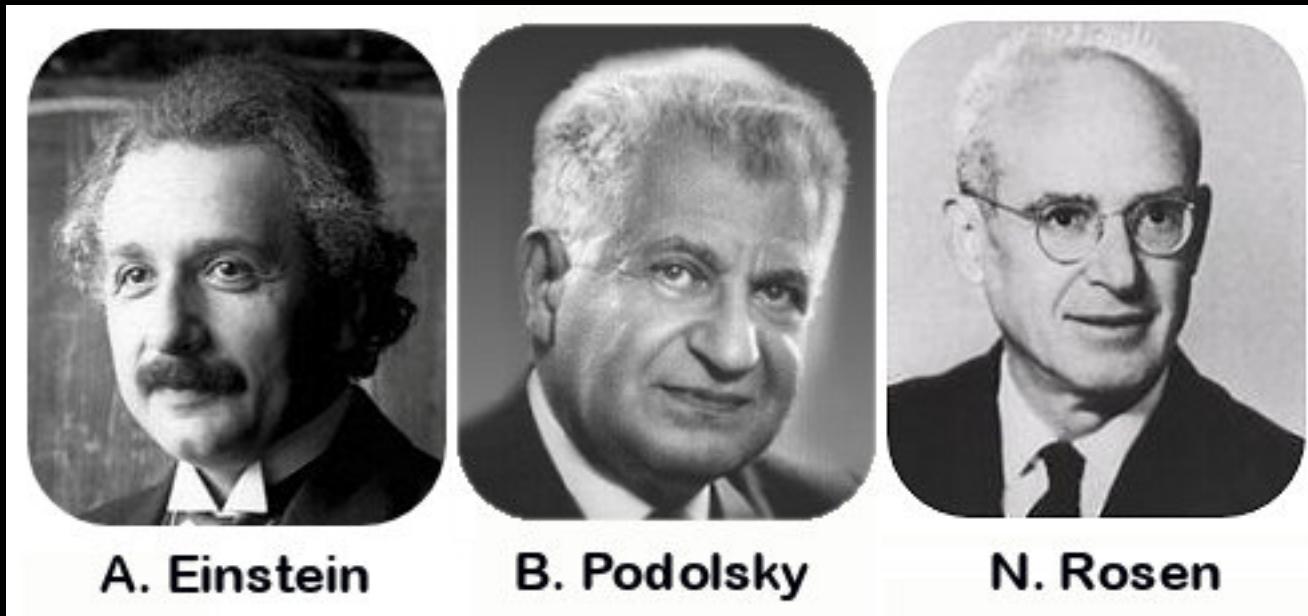
Ha Ha Ha!
...please...stop...
Ha Ha Ha!



Captain Quantum Entanglement's Unfortunate Weakness

©2011 Seth Black

Einstein-Podolsky-Rosen paradox



A. Einstein

B. Podolsky

N. Rosen

- El fenómeno del enredamiento despierta la pregunta:
“¿Puede la información viajar más rápido que la luz?”

Variables Locales Ocultas

- Einstein (*et. al.*) postula que la mecánica cuántica ha de tener variables locales ocultas, es decir, variables que hacen que el sistema predicho de manera probabilista se vuelva determinista.

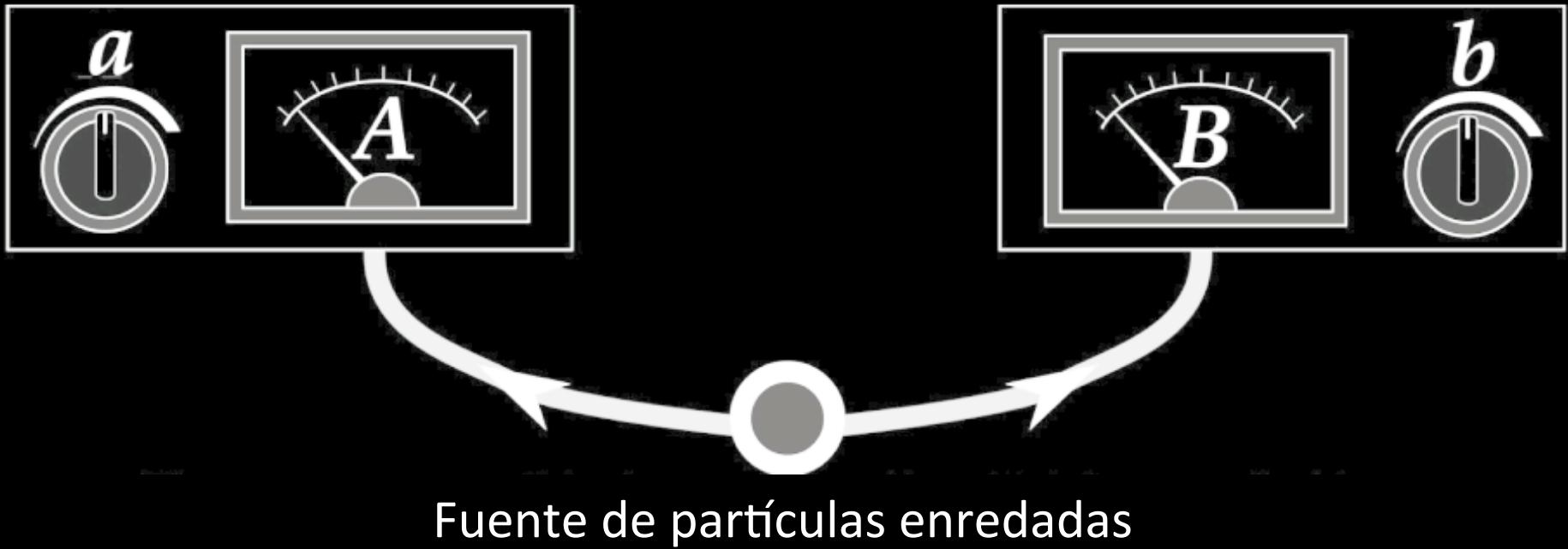
John S. Bell

- Bell postula una serie de desigualdades (y por lo tanto un teorema) que ponen de manifiesto las propiedades de la mecánica cuántica, y también nuestro entendimiento sobre el universo:

“Bell’s theorem implies that one or more eminently reasonable assumptions about the nature of the world must be abandoned or revised”

¿Cuáles suposiciones razonables?

- Localidad
 - Dos sistemas apartados no pueden influenciarse entre sí.
- Realismo
 - Las propiedades de los sistemas físicos son definidas, observados o no.
- **Independencia de configuraciones**
 - Los observadores pueden escoger las configuraciones para medir de manera libre.

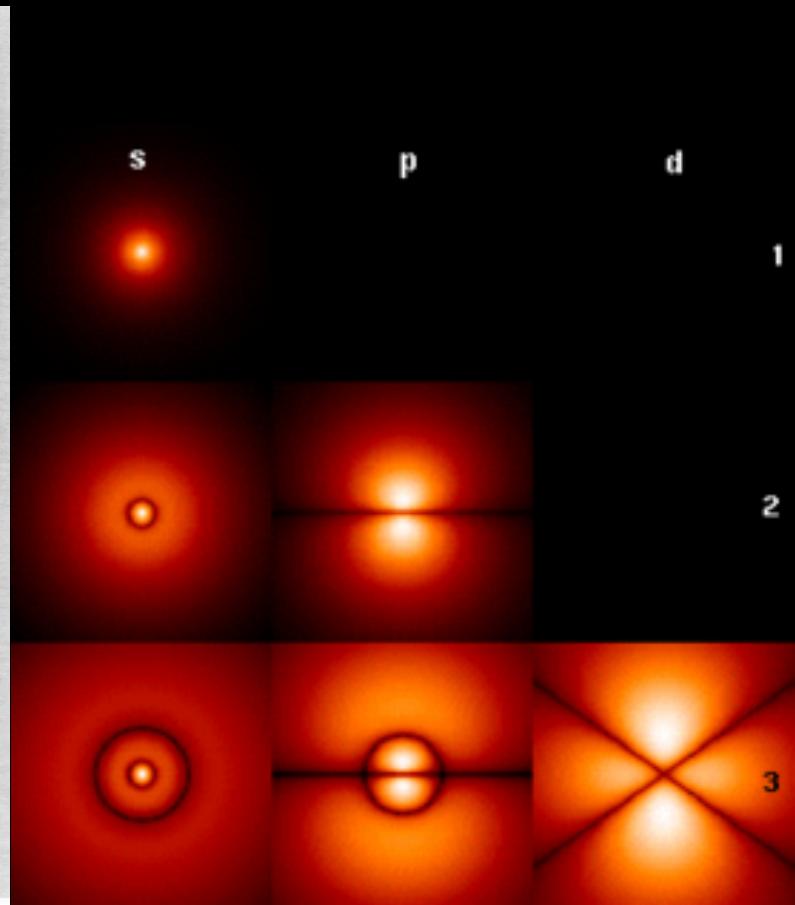
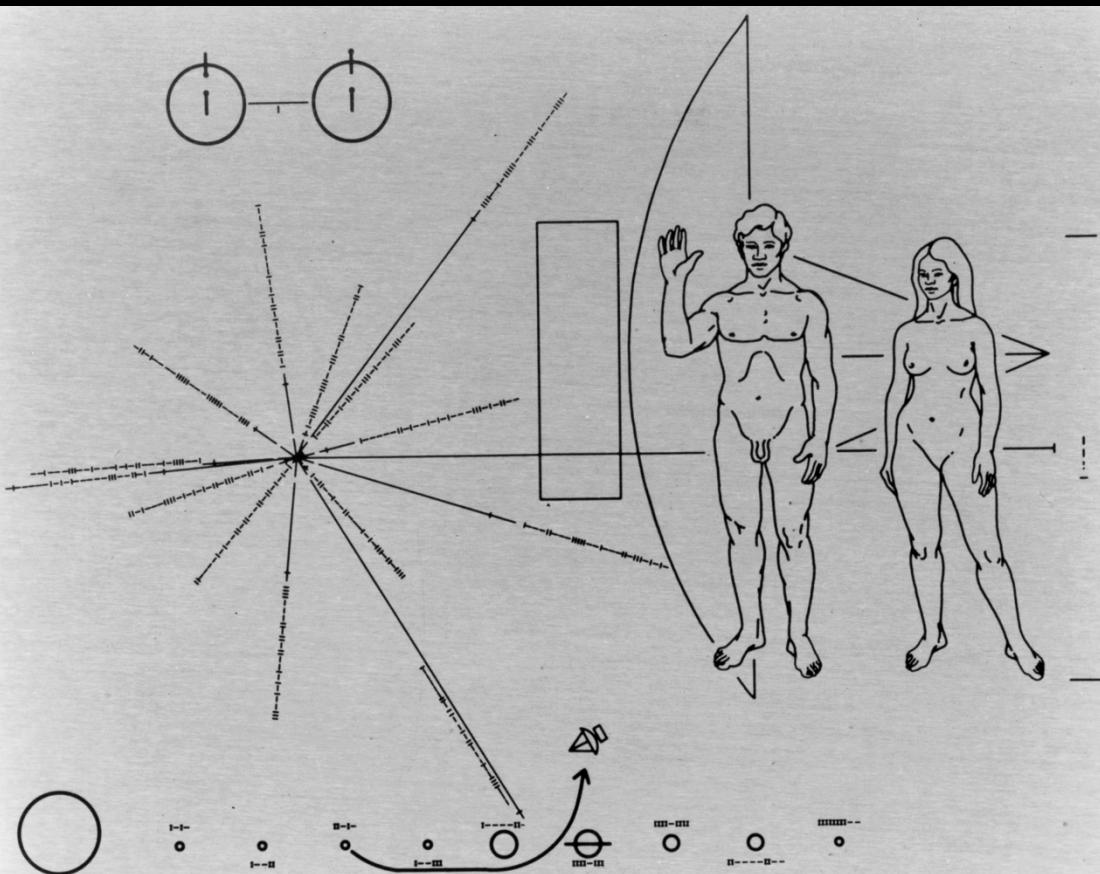


- a y b son las configuraciones del sistema
- A y B son los posibles resultados de la medición.

Loopholes del teorema de Bell

- De las suposiciones del teorema de Bell obtenemos también ciertos *Loopholes*, que pretendemos cerrar:
 - Localidad: ¿Hay comunicación entre los sistemas?
 - Solución: Realizar mediciones lejanas
 - Detectores ineficientes: ¿Medidas poco confiables?
 - Solución: Detectores más eficientes
 - Independencia de configuraciones: ¿Las configuraciones están relacionadas con variables ocultas?
 - Solución: Configuraciones aleatorias. Pero...

- El *loophole* menos explorado ha sido la independencia de configuraciones.
- ¿Su importancia?



Independencia de configuraciones

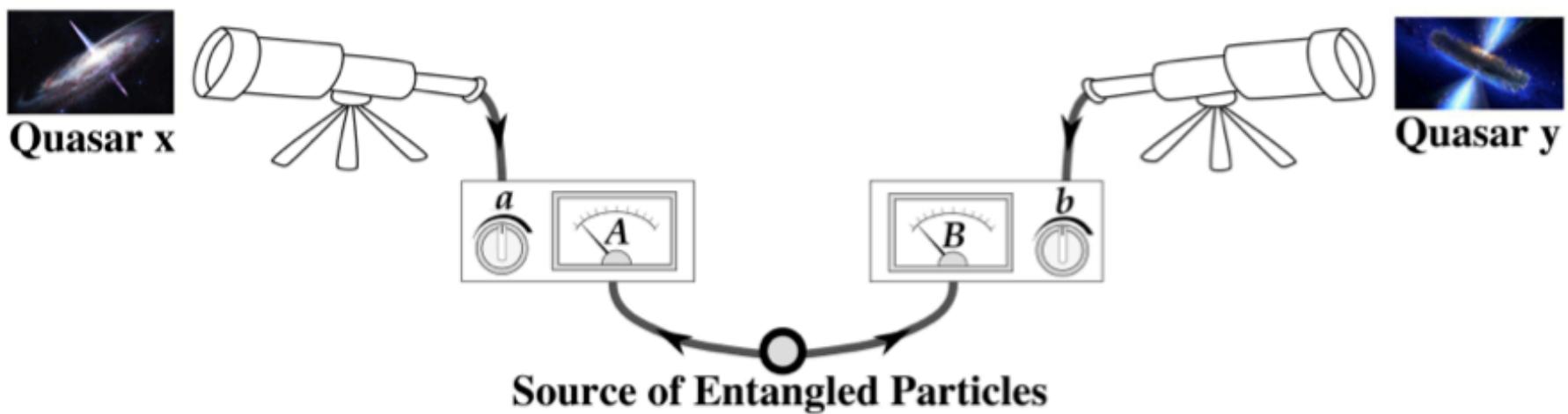
- Se puede *imitar a la mecánica cuántica* con tan poca información común como $1/22$ de bit.
- *¿Conspiración?*
- Es posible que los generadores de números aleatorios tengan correlación, pero...



QUASARS

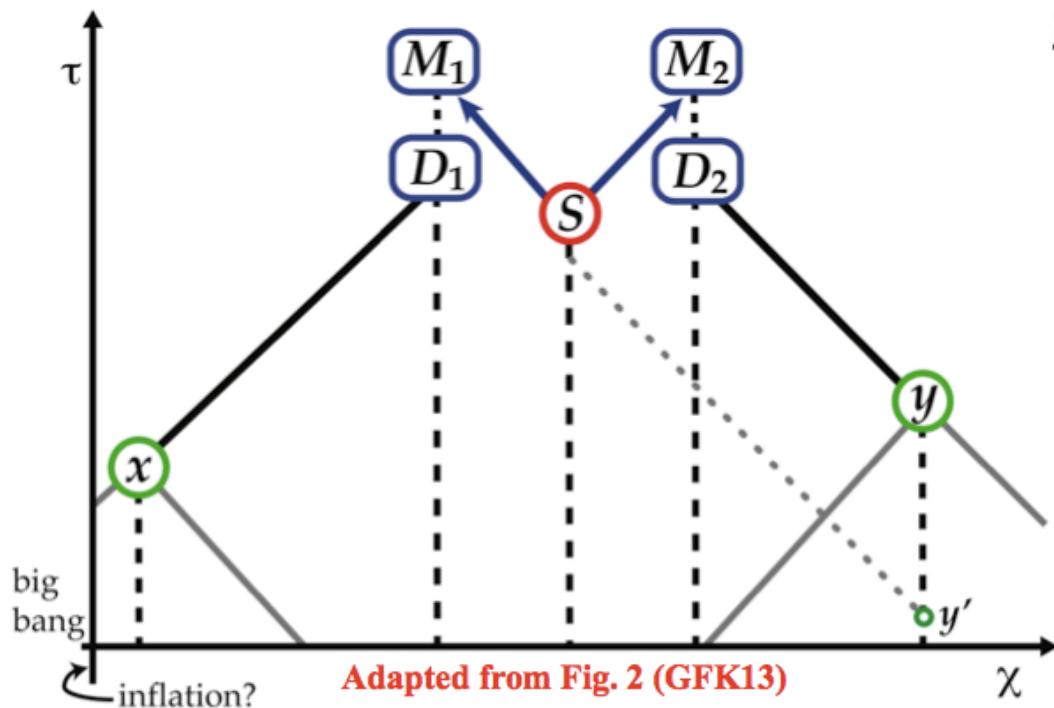
When harpoons, death stars and black holes don't work, use the ultimate weapon

- Dos fuentes **disconexas y alejadas** de quásares son tan independientes como es físicamente posible en nuestro universo.
- Los generadores de números aleatorios son independientes desde hace milisegundos. Los quásares son independientes desde el Big Bang.



- A día de hoy, ningún experimento ha podido cerrar los tres loopholes exitosamente.
- Pero con la desigualdad de Bell cósmica, es posible que los loopholes se puedan cerrar de manera adecuada.

COSMIC BELL CONFORMAL DIAGRAM



Space-time events

x, y : cosmic sources emit light

D_1, D_2 : settings choices

S : source emits EPR particles

M_1, M_2 : EPR particles measured

y' : event in past LC of y and S

x, y need $z > 3.65$ (at 180°) to have no shared causal past with each other, source, or detectors since hot big bang (end of inflation)

¡PREGUNTAS!

- Para un par de eventos cosmológicos con *corrimiento al rojo* y separación angular arbitraria:
 - ¿Cómo saber si han compartido un pasado común desde el big bang?
 - ¿Puede haber habido alguna otra influencia externa?
 - ¿Son independientes los eventos o están correlacionados?

El quásar más distante: ULAS J1120 +0641

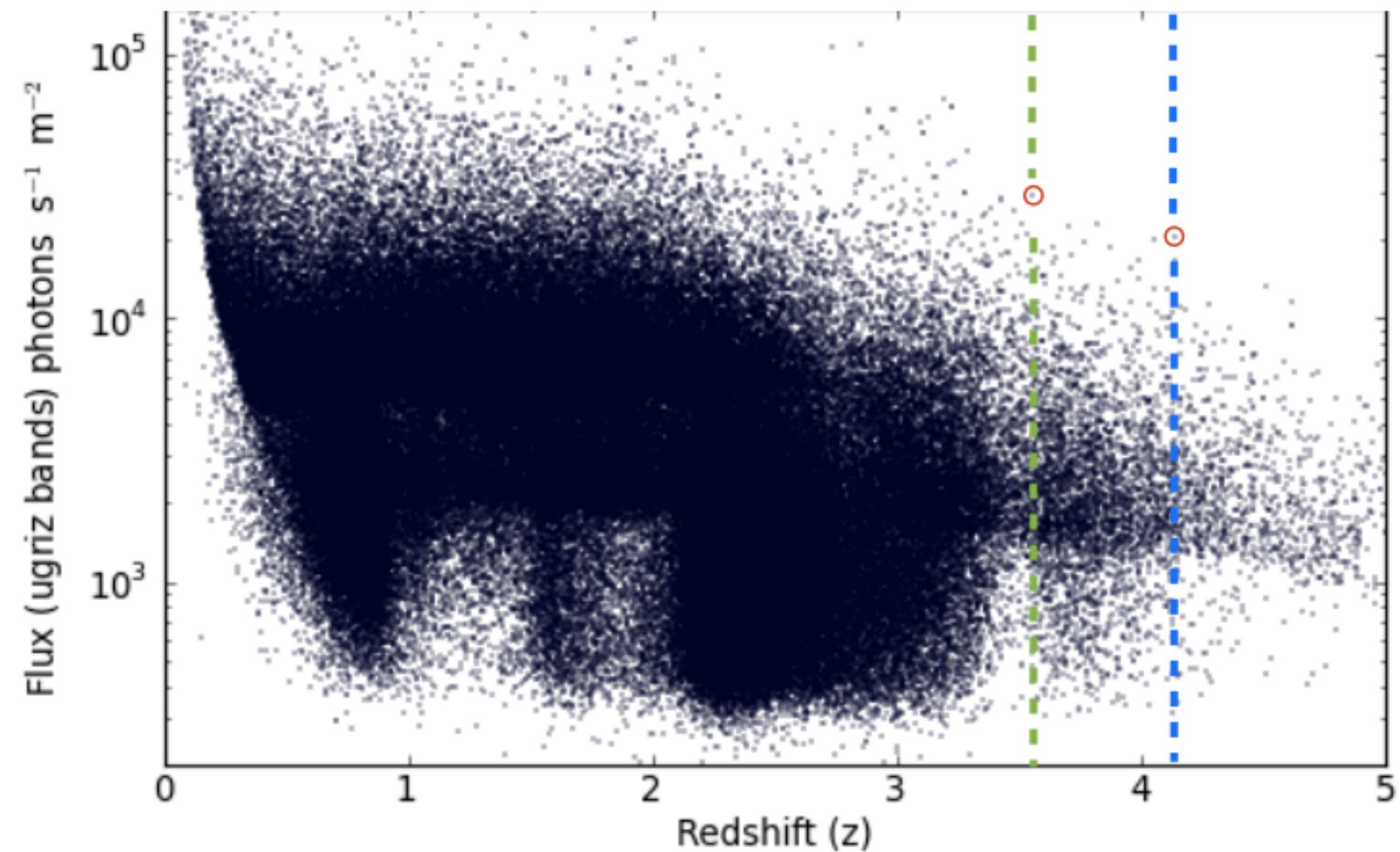
Con un redshift de $z=+7.085$



Interpretación artística*

$z \sim 3.65$, $F_{\text{opt}} \sim 3 * 10^4 \text{ fotones s}^{-1} \text{ m}^{-2}$

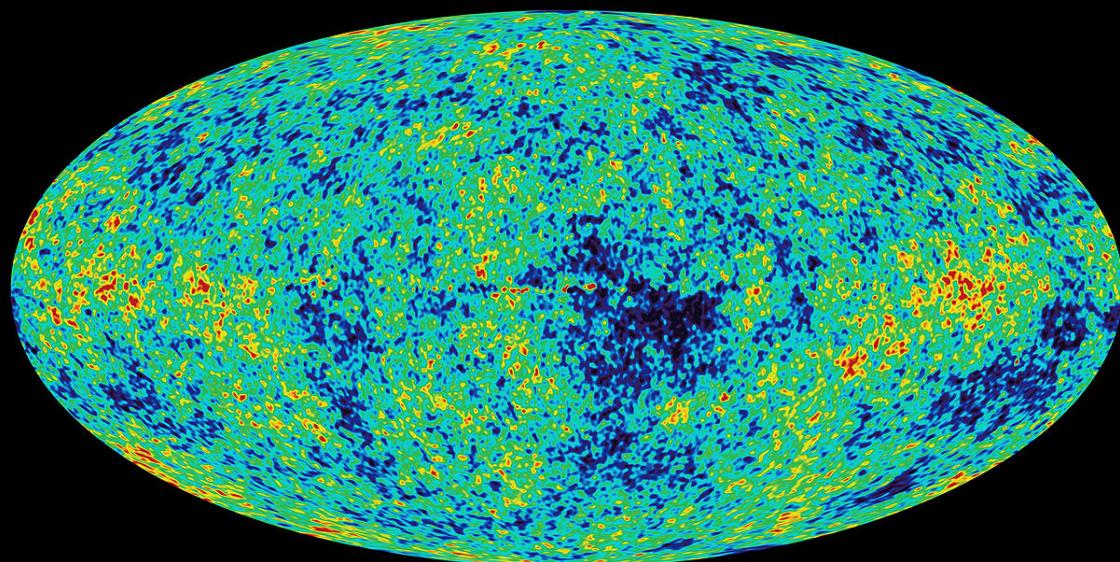
$z \sim 4.13$, $F_{\text{opt}} \sim 2 * 10^4 \text{ fotones s}^{-1} \text{ m}^{-2}$



- Aún con estrellas más cercanas que los mismos quásares, el sistema puede tener un gran mejoramiento con respecto a los generadores de números aleatorios.

Otra idea: CMB

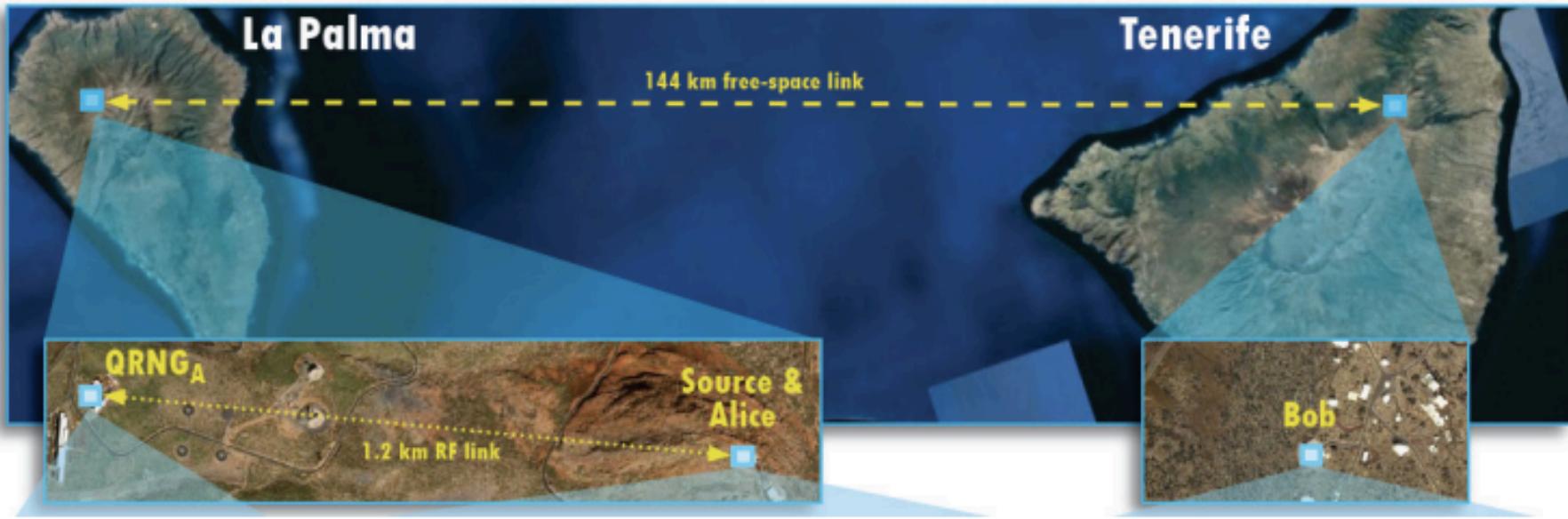
- La radiación cósmica de fondo también puede determinar la independencia en configuraciones.



Posibles problemas

- Ruido:
 - Al tratarse de fuentes cosmológicas lejanas, es altamente probable que la luz que llegue desde el quásar no sea la más limpia.
 - Atmósfera
 - Luz zodiacal
 - Medio interestelar
- Se propone usar telescopios espaciales.

Observatorios Viables



Scheidl+2010, PNAS, 107, 46, p. 19708-19713



ESA Optical Ground Station Tenerife

Observatorio Roque de los Muchachos
– La palma



Observatorio del Teide



Stefan Seip

Gran Telescopio Canarias



Perspectivas

- La más esperada:
 - Se viola la desigualdad de Bell, se cierran los 3 loopholes, adiós teorías de variables ocultas.
- La más sorprendente:
 - No se viola Bell. (?)
- La más extraña:
 - Las correlaciones dependen del pasado casual compartido. ¿Qué implicaciones tendría esto?

Conclusiones

- El experimento de desigualdad de Bell cósmica es un experimento que nos permite usar al universo mismo para explorar los límites de la mecánica cuántica.
- Es un experimento realizable* en la práctica, pues ya tenemos montaje óptico.
- Es un experimento que combina muchas técnicas astronómicas pero también teóricas y ópticas.

¡ 10^3 gracias por su atención!

Referencias:

- Jason Gallicchio, Andrew S. Friedman, and David I. Kaiser. Testing Bell's inequality with cosmic photons: Closing the setting-independence loophole. *Physical Review Letters*, 2014
- Testing Quantum Mechanics and Bell's Inequality with Observations of Causally Disconnected cosmological events – Andrew S. Friedman - MIT Center for Theoretical Physics – 2013
- Closing Loopholes in Quantum Mechanics – Warren Huelsnitz – Octubre 16/2013 – Tomado de <http://www.thefunisreal.com/2013/10/closing-quantum-loopholes/>
- Massachusetts Institute of Technology. "Closing the 'free will' loophole: Using distant quasars to test Bell's theorem." ScienceDaily. ScienceDaily, 20 February 2014. <www.sciencedaily.com/releases/2014/02/140220112515.htm>.
- Photonic Bell Violation – Johannes Kofler - Workshop “Quantum Information & Foundations of Quantum Mechanics” - <http://www.qi.ubc.ca/Talks/TalkKofler.pdf>
- Cosmic Bell – Sabine Hossenfelder – November 27,2013 - Tomado de <http://backreaction.blogspot.com/2013/11/cosmic-bell.html>