

ESTUDIO SOBRE LOS RESULTADOS DEL EXPERIMENTO DE INNSBRUCK.

Alejandro Hnilo¹, Alejandro Peuriot, Guillermo Santiago².

Centro de Investigaciones en Laseres y Aplicaciones (CEILAP), (CITEFA-CONICET-UNSAM).
Zufriategui 4380, (1603) Villa Martelli, Argentina.
e-mail: ahnilo@citefa.gov.ar

En Diciembre de 1998 se publicaron los resultados del experimento EPRB más ambicioso y completo llevado a cabo hasta ahora. Los datos del experimento sin procesar estuvieron disponibles en la web. Hicimos un análisis de los datos dirigido a determinar: 1) hasta qué punto el experimento refuta el modelo de variables ocultas "con direccionalización" (HV+DZ); 2) si existen frecuencias privilegiadas en el espectro de coincidencias en función del tiempo; 3) si había espacio para una violación de la "no trapping assumption". Evaluamos que el experimento refuta las HV+DZ y que no es concluyente acerca de la existencia de frecuencias privilegiadas, ni sobre la existencia de "trapping". Proponemos una modificación del sistema de recolección de datos para hacer evidente esta última.

The results of the most ambitious and complete EPRB experiment performed until now were published in December 1998. The raw data were available in the web. We carried out an analysis of the data aimed to know: 1) if the experiment disproved the "Hidden variables with Directionalization" (HV+DZ) model; 2) if there were privileged frequencies in the spectrum of coincidences as a function of time; 3) if a violation of the "no trapping assumption" was possible. We evaluated that the experiment disproved the HV+DZ model, but that no conclusion could be extracted regarding the existence of privileged frequencies in the spectrum, or about the existence of "trapping". We proposed a modification of the data recording system to detect the latter.

1. Descripción del experimento de Innsbruck.

Se trata de un experimento EPRB, en el que la fuente de pares de fotones en *entangled state* es un cristal (BBO en *phase matching* tipo II) iluminado por un laser continuo de Ar⁺, de 400 mW de potencia media en 351 nm. La característica sobresaliente es que los pares son enhebrados en sendas fibras ópticas monomodos, y que la detección se produce en dos estaciones separadas por 1Km de fibra (400 m, ó 1.3 μ s a la velocidad de la luz, de separación espacial en línea recta)⁽¹⁾. Además, la elección de la polarización a medir se realiza al azar a una frecuencia de 10 MHz, por lo que es imposible, en principio, que cualquier información sobre la medición realizada sobre uno de los fotones del par pueda afectar el resultado de la medición realizada sobre el otro fotón del par. Este es el primer experimento realizado con analizadores variables desde el famoso de Orsay en 1982⁽²⁾. El polarizador de posición variable al azar se realizó aquí insertando un modulador electro-óptico con sus ejes orientados a 45° de los de un cubo polarizador fijo. De este modo, al aplicar voltaje al modulador, se rota la polarización de la luz incidente (o, de modo equivalente, se rota la posición del polarizador que "veía" la luz incidente en sentido opuesto). El voltaje se ajustó de modo de rotar la polarización en 45°. Se aplicaba o no voltaje al modulador según el resultado de la salida de un "random number generator" construido mediante un LED, un *beam-splitter* y dos fotomultiplicadores (PMT). Según cuál PMT

detectaba un fotón, ésta se consideraba una señal random "0" ó "1", y no se aplicaba o sí se aplicaba tensión al modulador. Ajustando la intensidad del LED se obtuvo una frecuencia primaria de bits al azar de 100 MHz, el que fue luego muestrado periódicamente a 10 MHz, para ajustarse a la frecuencia máxima en que se podía variar el voltaje sobre el modulador (<30 MHz). Esta es la más perfecta realización del *true random deflector* definido previamente⁽³⁾ como condición necesaria para discriminar las predicciones de la mecánica cuántica (QM) de las teorías realistas locales. El dispositivo es precisamente la realización de una de las propuestas de la Referencia 3. Es inevitable hacer la *intrinsically untestable hypothesis*⁽³⁾, que en este caso es la suposición de que la detección de los fotones emitidos por el LED no tiene correlación con eventuales variables ocultas llevadas por el par de fotones enganchados.

Los detectores son fotodiodos de avalancha empleados en el modo conteo, y la información es recogida independientemente en dos relojes de alta precisión, uno en cada estación. Se genera así un archivo de datos (uno para cada estación, T_A(t) y T_B(t)), que es una lista de los tiempos en que se detectó un fotón en esa estación. Para ese tiempo de detección, se conserva también en un archivo separado la información sobre si se aplicó o no tensión sobre el modulador electro-óptico, y la puerta del polarizador sobre la que se detectó el fotón (es decir, si el fotón atravesó el polarizador o si fue reflejado). Esta información aparece pues como una lista de números (una para

¹ Inv. Adjunto (sin Dir.) CONICET.

² Facultad de Ingeniería, UBA.

cada estación, $P_A(t)$ y $P_B(t)$ entre 0 y 3, de la misma longitud (en cada rama del experimento) que la lista de tiempos de detección de fotones. Para evaluar el número de coincidencias, se reúne (a posteriori) los archivos $T_A(t)$ y $T_B(t)$ y se busca, para cada línea en $T_A(t)$, si existe una línea en $T_B(t)$ que no esté más lejos de $T_A(t)$ que un cierto intervalo (o "ventana") Δt . Naturalmente, el número de coincidencias depende del tamaño de la ventana.

Como los dos relojes no tienen exactamente el mismo "cero" es preciso también desplazar ligeramente una lista respecto de la otra para maximizar el número de coincidencias. Debido a esto, el primer trabajo a realizar con los datos es un histograma del número de coincidencias en función de este tiempo de corrección y para varios valores de Δt (ver fig.1). Además, se ha observado que los relojes tienen una pequeña deriva⁽⁴⁾, por lo que para optimizar el número de coincidencias es preciso ir ajustando el tiempo de corrección. En este trabajo, hemos dejado al tiempo de corrección constante, por lo que el número total de coincidencias y el valor del parámetro S (ver enseguida) es ligeramente diferente que el reportado en la Referencia 1.

En cuanto al histograma de fig.1, nótese que el pico principal de coincidencias aparece centrado sobre una "plataforma" de un ancho de unos 40 ns y una altura un orden de magnitud por encima del ruido. Esta plataforma se debe probablemente a *jitter* y dispersión de las señales electrónicas. También aparece un segundo pico, un orden de magnitud mayor que la plataforma y menor que el pico principal. que discutiremos en la Sección 4.

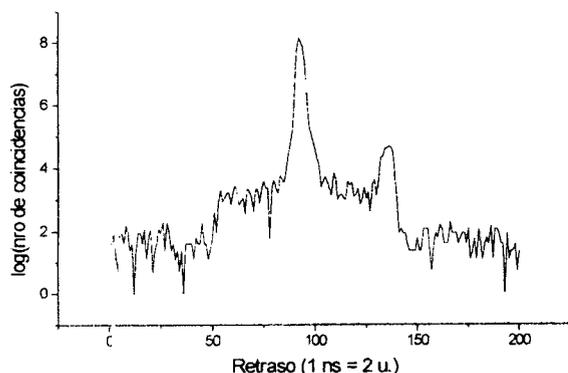


Figura 1: Número de coincidencias (en escala logarítmica) en función del tiempo de corrección entre las dos listas de tiempos T_A y T_B , para una ventana $\Delta t=3$ ns. El óptimo corresponde a 4.5 ns. Nótese la "plataforma" de coincidencias, de ancho cercano a los 40 ns, y el pico secundario.

Finalmente, se calcula el factor de correlación S, que debe ser menor o igual que 2 para no violar las desigualdades de Bell⁽⁵⁾. El valor obtenido en la Referencia 1 es 2.73, mientras que nosotros obtuvimos 2.71 (el valor teórico es 2.82). En ambos casos se viola cómodamente la desigualdad de Bell.

2. Modelo HV+DZ. Condición de discriminación.

Cuando se consideran los valores límites de número de coincidencias impuestos por el realismo local y las

predicciones cuánticas en un experimento EPRB, se observa que la diferencia es pequeña, del orden del 12%. Esto da pie a especular con un modelo de variables ocultas (llamada *hidden variables with directionalization HV+DZ*) en el que la fuente tiene una cierta probabilidad (mayor que el mínimo de 0.5) de "adivinar" la posición que tendrá el polarizador cuando cada fotón del par llegue a su destino, y emita al fotón con la variable oculta apropiada para reproducir los valores cuánticos. El mínimo de esta probabilidad de adivinar que permite reproducir las predicciones cuánticas para condiciones experimentales *ideales*⁽³⁾ es 0.769. Este valor baja si se tienen en cuenta las imperfecciones experimentales. Según la magnitud de las imperfecciones, un dado experimento será capaz o no de discriminar entre el modelo HV+DZ y QM. Las imperfecciones experimentales son muchas, pero basta con restringirse aquí a:

i) La probabilidad w de que, durante el tiempo que tarda la luz en viajar de la fuente a los detectores, se produzca una *random transition* (el equivalente de arrojar una moneda) en uno de los polarizadores, determinando si éste es girado o no. Este parámetro está asociado con la probabilidad que tiene la fuente de "adivinar" la posición de los polarizadores.

ii) La probabilidad p de que un fotón polarizado horizontalmente pase por un polarizador orientado verticalmente. Este parámetro da cuenta de la imperfección de los polarizadores.

iii) La probabilidad ε de "escapar" a la posición indicada por el modulador. Este parámetro está relacionado con la imperfección del contraste en la señal aplicada a los moduladores (acusto-ópticos en Orsay⁽²⁾, electro-ópticos en Innsbruck). Vale la pena notar que se logró una importante mejora en este parámetro en el experimento de Innsbruck ($\varepsilon \approx 0.03$) comparado con el de Orsay ($\varepsilon \approx 0.13$). No se toma en cuenta la eficiencia de los detectores pues el efecto eventual de esta imperfección ya está descartado al aceptar la validez de la *no-enhancement or fair sampling assumption*⁽⁵⁾. La condición de discriminación entre HV+DZ y QM es entonces⁽⁶⁾:

$$1 - \frac{1}{2} w (1 - 2\varepsilon) > 0.231 + 2.719 p \quad (1)$$

En la figura 2 se muestran las condiciones de discriminación y los puntos de trabajo del experimento de Orsay y del de Innsbruck. Los experimentos realizados con polarizadores fijos tienen $w=0$, y por lo tanto no pueden discriminar HV+DZ de QM. Claramente, el experimento de Orsay tampoco podía hacerlo, y en cambio sí puede el de Innsbruck. La diferencia principal entre ambos está en el contraste de los moduladores (ya mencionada) y, sobre todo, en el valor de w . En el experimento de Orsay, w estaba dado por la probabilidad ($\approx 10^{-6}$) de un salto de fase en la señal sinusoidal aplicada al modulador. En el experimento de Innsbruck, se produce un promedio de 13 *random transitions* en el tiempo L/c (L es la separación entre las estaciones), por lo que (como la distribución es una Poisson) la probabilidad de que ocurra *al menos uno* es prácticamente 1.

En consecuencia, el experimento de Innsbruck ha refutado existosamente el modelo HV+DZ. Es además el primero

(por el momento el único) en hacerlo.

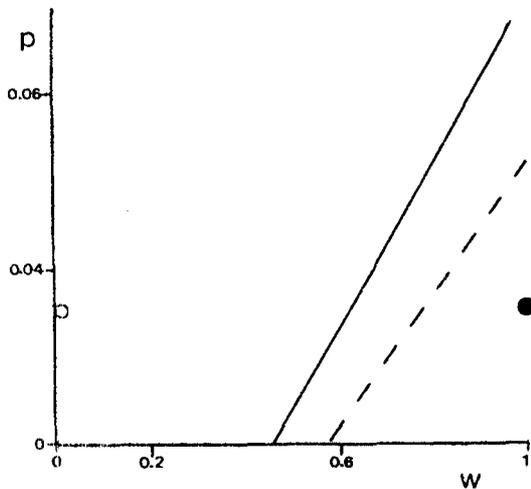


Figura 2. Condición de discriminación entre HV+DZ y QM y puntos de trabajo del experimento de Orsay (o, línea segmentada) y de Innsbruck (•, línea llena). En el caso de Orsay, $p \approx 0.03$, $\varepsilon \approx 0.13$ y $w \approx 10^{-6}$. En el caso de Innsbruck, $p \approx \varepsilon \approx 0.03$ y $w \approx 1$.

3. Búsqueda de frecuencias privilegiadas.

Hace tiempo, uno de nosotros (AH) propuso la hipótesis de un apartamiento transitorio (en un tiempo L/c) de los valores predichos por la QM, en sistemas cuya coherencia se extendiera sobre distancias $L^{(7)}$. La idea es que el sistema mostraría al comienzo resultados acordes con el realismo local, y que una interacción hipotética (de *feedback*) lo llevaría luego a ajustarse al valor cuántico. En principio, para observar ese transitorio sería preciso determinar la violación de las desigualdades de Bell (midiendo, por ejemplo, el parámetro S) en un tiempo menor que L/c después de una *random transition*. Esto requiere tener un número de pares apreciable (no menos de 100) en el tiempo L/c . Para la separación en el experimento de Innsbruck, esto es un flujo de coincidencias >100 MHz (el del experimento realizado es de 1 KHz).

Así, la evolución del sistema estaría dada por una ecuación con un término de "fuente" retardado (es decir: en $t-L/c$) y de intensidad desconocida. Podrían aparecer oscilaciones en el valor de S con frecuencia típica del orden de c/L (tampoco observables con el flujo de pares disponible). Pero el espacio de fases de las ecuaciones con retraso tiene infinitas dimensiones, por lo que, en principio, no puede descartarse que la solución presente cascadas subarmónicas. Si este fuera el caso, entonces S mostraría oscilaciones de frecuencia $c/2L$, $c/4L$, etc. que podrían ser eventualmente observables. Está claro que la no observación de oscilaciones no significa nada: se ignora el valor de la fuerza de *feedback*, y aún en el caso de que existieran subarmónicas de la frecuencia principal (≈ 1 MHz), es harto improbable que fueran visibles en el rango de frecuencias accesible en el experimento realizado (<10 Hz). En cambio, la observación de oscilaciones

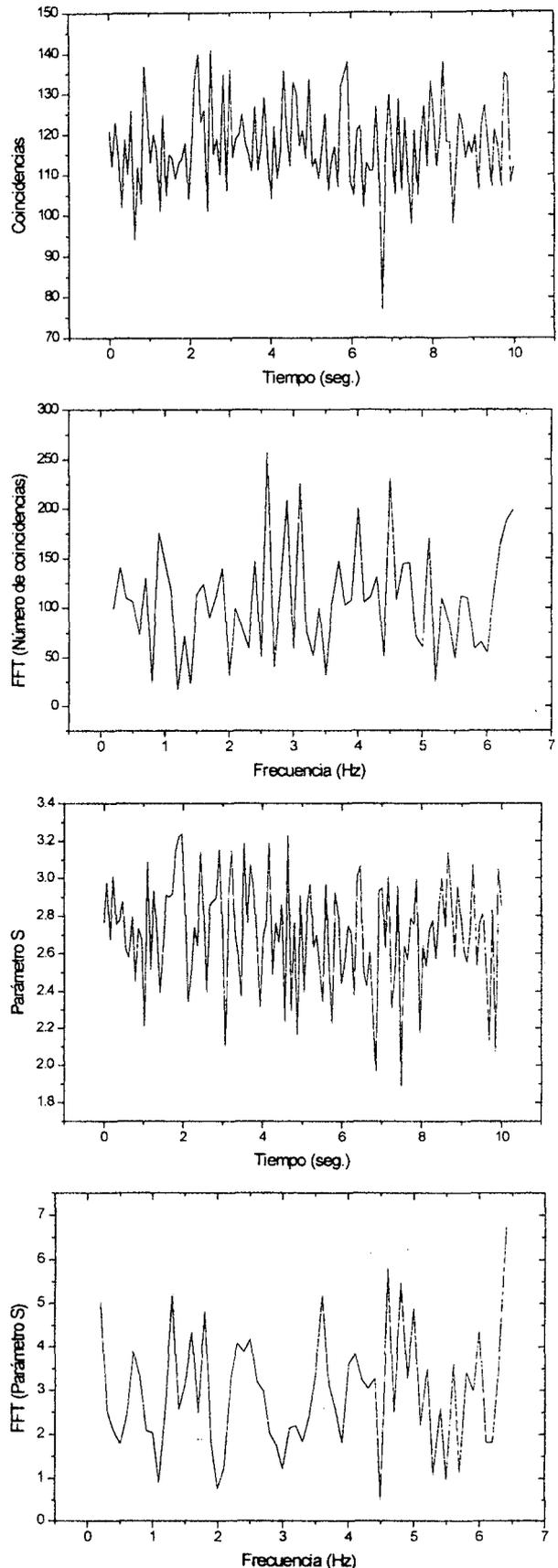


Figura 3: Número de coincidencias y parámetro S en función del tiempo, y sus respectivas transformadas de Fourier en intensidad, para 128 intervalos iguales. Ventana $\Delta t = 3$ ns y tiempo de corrección 4.5 ns (constante).

(que no tuvieran una explicación trivial como, por ejemplo, modulaciones del bombeo) sería un indicio a favor de la existencia de la fuerza de *feedback*.

Realizamos un extenso estudio numérico, dividiendo el archivo total (que corresponde a un tiempo de 10s) en intervalos más cortos y calculando así el valor de S en función del tiempo. En la figura 3 mostramos, a título ilustrativo, la variación $S(t)$ y su transformada, y también el número total de coincidencias $N_{\text{coinc}}(t)$ y su transformada, para el caso de 128 intervalos (o sea, una frecuencia máxima observable de 6.4 Hz). No hay picos que se destaquen del fondo. Lo mismo ocurre para otras subdivisiones del archivo. Por otra parte, la serie de tiempos es demasiado corta para permitir un estudio de dimensionalidad de un eventual atractor subyacente.

En consecuencia, los resultados del experimento de Innsbruck no permiten decir nada sobre la existencia de la fuerza de *feedback*. Para poder hacerlo, debería incrementarse el flujo de pares o la distancia entre polarizadores en por lo menos 10^4 . Dado que ya ha sido posible transmitir estados enganchados por fibra óptica a distancias 100 veces mayores que la del experimento de Innsbruck⁽⁸⁾, es razonable esperar que un experimento capaz de discernir la existencia de la fuerza de *feedback* podrá realizarse en un futuro no lejano.

4. El segundo pico.

Una de las suposiciones del modelo HV+DZ es la validez de la *no trapping assumption*⁽³⁾. Esta significa que el modulador no es capaz de "almacenar" fotones. La idea es que los fotones que llevan una variable oculta preparada para encontrar al modulador en cierta posición, no pueden "esperar" (para ser detectados) la posición favorable, en caso de encontrar al modulador en la posición desfavorable. Obviamente, si los fotones *sí* pudieran esperar la posición favorable, la HV+DZ sería muy difícil de refutar.

Que realmente existiera un fenómeno de *trapping* sería muy sorprendente. Sin embargo, el histograma de la fig.1 muestra, precisamente, un pico secundario, con aproximadamente el 7% de coincidencias que el pico principal, corrido 22 ns. Podría especularse que está formado por fotones que encontraron el modulador en una posición desfavorable, fueron atrapados y re-emitidos (y detectados) más tarde (cuando el modulador cambió a la posición favorable). Si esta especulación fuera correcta, para corregir el valor de S debería contarse cada coincidencia del segundo pico como ocurrida con el modulador en la posición que tenía 22 ns antes. Lamentablemente, el experimento está diseñado de manera de conservar la información sobre la posición de los moduladores sólo cuando se detecta un fotón. Haría falta tener también la posición de los moduladores cuando los fotones fueron emitidos, o, mejor aún, una lista de los tiempos en que se produjeron las *random transitions* y sus resultados. Debido a esta limitación de los datos existentes, no es posible, estrictamente hablando, concluir nada sobre la hipótesis de la existencia de *trapping*, pero hay una serie de elementos que sugieren que el segundo pico es un mero *artifact*:

i) El tiempo de re-emisión de los fotones atrapados sería

de 22 ns, que es demasiado corto. En promedio, el modulador cambia de posición cada 100 ns.

Además, si se supone que la distribución de fotones atrapados es uniforme sobre las variables ocultas, ocurre que:

ii) El segundo pico es muy bajo. El segundo pico debería ser el 18.75% del primero.

iii) El valor de S que se obtiene de los datos recogidos se reduce de 2.71 a 2.27, pero este valor todavía viola las desigualdades de Bell.

iv) El valor de S en el segundo pico debería ser de 1.392, mientras que el observado es de 1.092.

Pero, por otra parte, se observa que el segundo pico no está formado por coincidencias uniformemente distribuidas sobre los 16 posibles resultados. Por ejemplo, cuando hay voltaje aplicado sobre el modulador de A, el 90% de las coincidencias ocurren con el detector "pasó el polarizador" de A (no hay desviación de la distribución uniforme cuando no hay voltaje aplicado al modulador). Es decir, cuando hay voltaje aplicado al modulador A la radiación de ese lado del experimento (y que además participa de las coincidencias del segundo pico) parece estar fuertemente polarizada. Además, el 73% de las coincidencias del segundo pico están concentradas en el caso en que hay aplicado voltaje en el modulador de A y el fotón pasa el polarizador y, en la otra estación, el modulador (B) tiene aplicado voltaje y el fotón es reflejado por el polarizador, o bien el modulador (B) no tiene voltaje y el fotón pasa el polarizador. Todo esto sugiere que no es razonable suponer que la distribución de fotones atrapados es uniforme sobre las variables ocultas, lo que pone en duda tres de las cuatro razones contra la explicación basada en *trapping* mencionadas arriba. Pero es imposible (por lo dicho anteriormente) reconstruir la distribución "correcta" de coincidencias. Una distribución "conveniente" (no uniforme) de las coincidencias en el segundo pico permite, en efecto, bajar el valor de S justo por debajo de 2, pero es un recurso que nos parece demasiado *ad hoc*.

Consultamos a G.Weihls sobre el origen de este segundo pico (que había pasado desapercibido), y su opinión fue que se trataba de uno de los muchos ecos electrónicos presentes. Lamentablemente, el dispositivo experimental ya fue desmantelado y es imposible buscar su origen.

En conclusión, los datos disponibles no permiten descartar la existencia de *trapping*, pero la escasa plausibilidad de la hipótesis nos lleva a pensar que no es ésta la causa de la violación de las desigualdades de Bell observada. De todos modos, sería conveniente que una futura versión del experimento incluyera la recolección de los datos de la posición de los moduladores para todo valor de t , de manera de poder descartar la hipótesis sobre una base firme.

5. Conclusiones.

En este trabajo hemos estudiado los datos obtenidos en el experimento EPRB con analizadores variables y 400 m de separación entre estaciones realizado en Innsbruck en 1998, para establecer si (y hasta qué punto) refuta la teoría realista local conocida como HV+DZ (hasta entonces no refutada), y para buscar algún indicio sobre una violación transitoria de las predicciones cuánticas. De

este estudio concluimos que:

i) El experimento de Innsbruck *si* es capaz de discriminar las predicciones del modelo HV+DZ de las de QM (suponiendo válidas las hipótesis de *no enhancement* o *fair sampling* y la de *no trapping*). En consecuencia, el modelo HV+DZ puede considerarse refutado.

ii) Los datos del experimento no proveen evidencia de violaciones transitorias de las predicciones cuánticas, ni de la existencia de frecuencias privilegiadas en el espectro de las fluctuaciones de la correlación. De todos modos, el flujo de pares era por lo menos 10^4 veces menor que el teóricamente necesario para descubrir dichas anomalías.

iii) El pico secundario que aparece en el histograma de fig.1 no provee sustento suficiente para la hipotética existencia de un efecto de *trapping* pero, estrictamente hablando, tampoco permite descartarla. Hemos propuesto una modificación del sistema de detección para poder discriminar este punto.

Este trabajo fue financiado por el proyecto PIP CONICET 0425/98.

Referencias.

- 1- G.Weih, T.Jennewein, C.Simon, H.Weinfurter y A. Zeilinger; Phys. Rev. Lett. **81** p.5039 (1998).
- 2- A.Aspect, J.Dalibard y G.Roger; Phys. Rev. Lett. **49** p.1804 (1982).
- 3- A.Hnilo; Found. Phys. **21** p.547 (1991).
- 4- G.Weih; comunicación privada, 1999.
- 5- J.Clauser y A.Shimony; Rep.Prog.Phys. **41** p.1881 (1978).
- 6- A.Hnilo; Found.Phys. **24** p.139 (1994).
- 7- A.Hnilo; "Dos explicaciones alternativas para la paradoja EPR", Resúmenes AFA 1987.
- 8- Ver, p.ej., Optics and Photonics News, Dic.1997, p.38.