



# Efeito HBT - GGLP

Sandra S. Padula  
IFT/UNESP

## HISTÓRIA:

HANBURY BROWN & TWISS ('52) ⊕ GGLP ('59/'60)



Radioastronomia

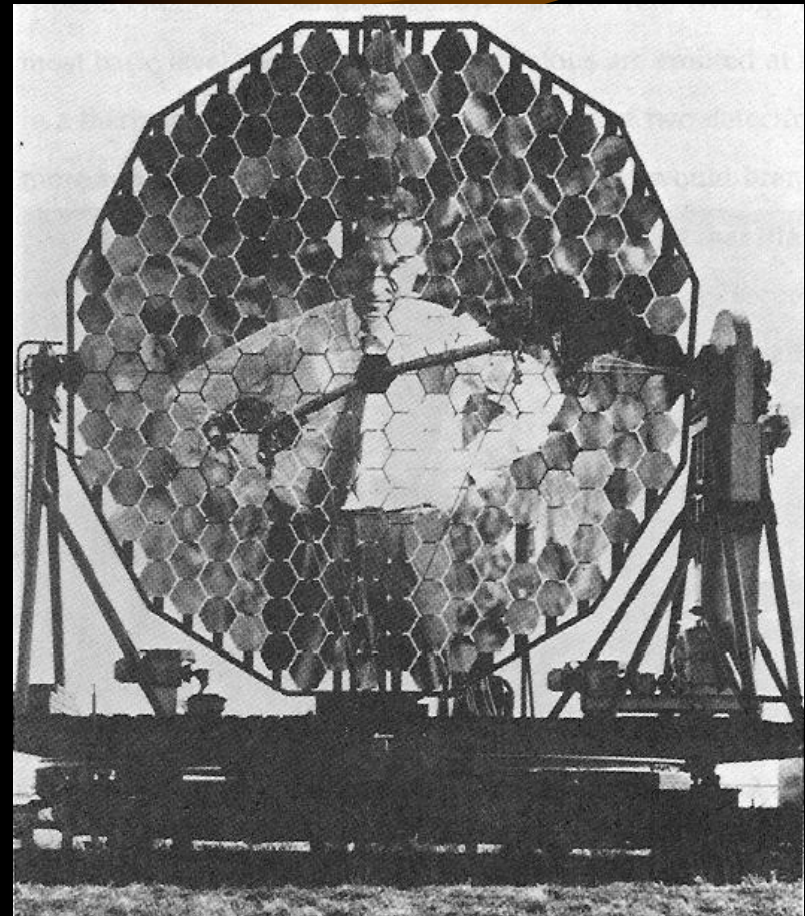


colisões 

## HANBURY-BROWN & TWISS (50's)

[Nature 170 (52) 1061; Phil. Mag. 45 (54) 663;  
Nature 177 (56) 27; 178 (56) 1447]

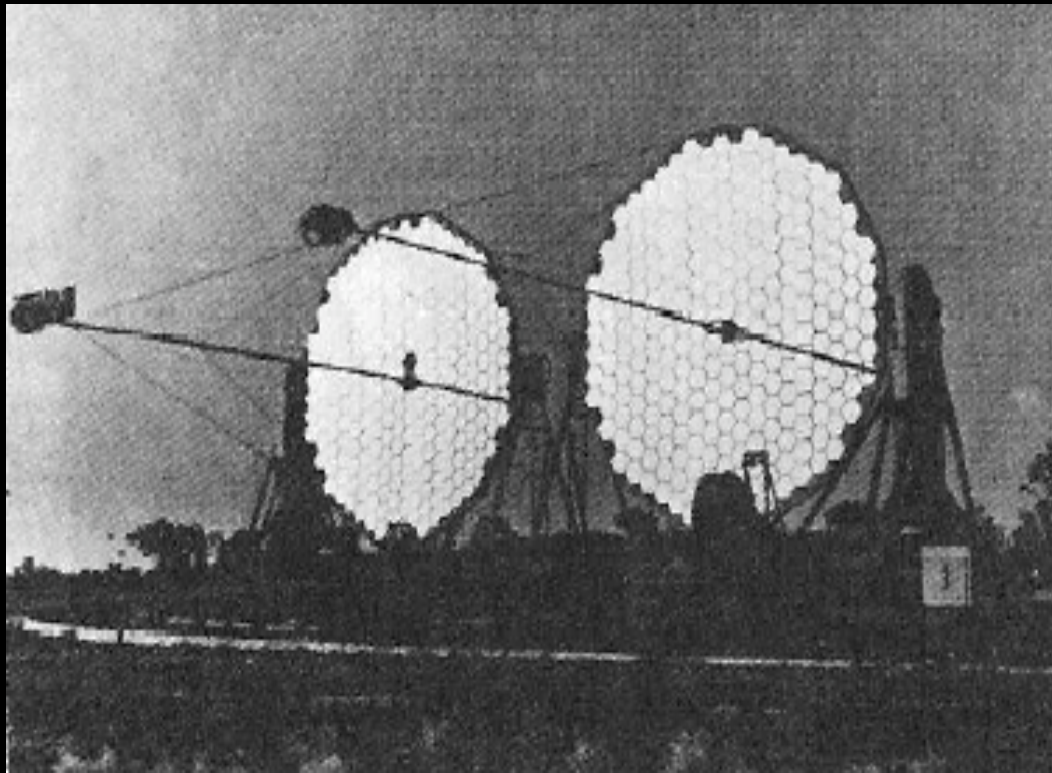
- ♣ R. Hanbury Brown → propôs novo método para medir raios estelares
- ♣ R. Q. Twiss → desenvolveu teoria matemática sobre interferometria de intensidade (interferência de 2ª. ordem).
- ♣ Ambos construíam o aparato e fizeram a experiência em UK e em Narrabri, Austrália:  
4 duas antenas ↔ ambas focando a radiação de uma fonte de radiofreq. em um receptor ⊕ Correlator (dispositivo eletrônico: recebe sinais das duas antenas e os multiplica, levando em conta o atraso temporal)



# Experiência HBT com ftons (1956)

Antenas → espelhos; detetores de rádio-freqüência → células foto-elétricas  
Medida, em função da separação dos espelhos:

Correlação entre as flutuações nas correntes vindas das células quando iluminadas por uma estrela



♣ "...coleta-se luz no correlator como chuva em um balde..."

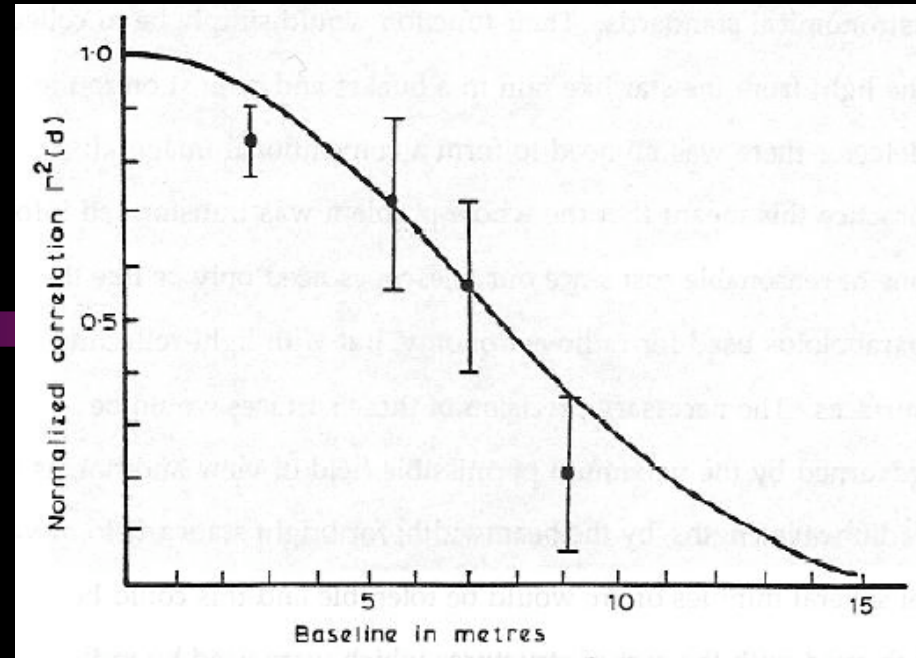
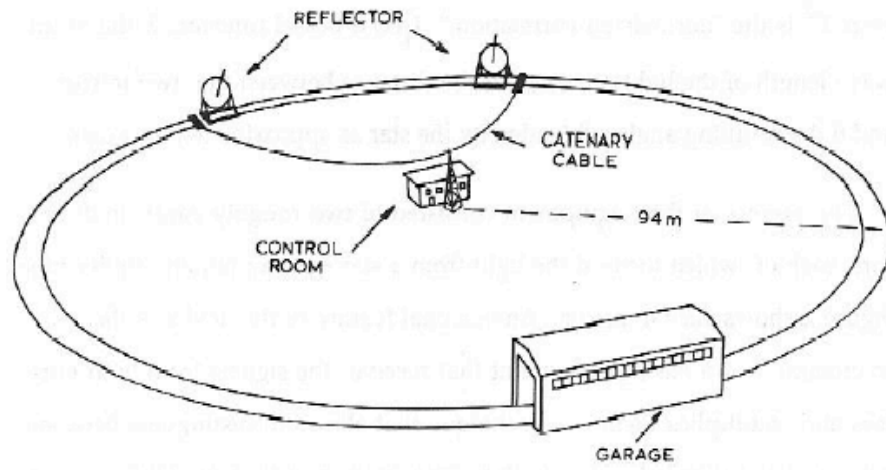
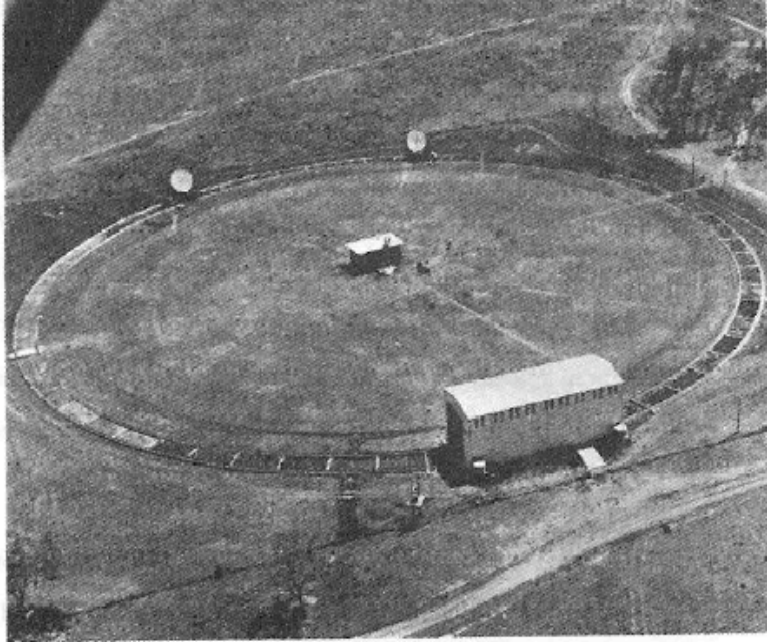
⊗ Não há necessidade de imagem convencional: telescópios

» parabolóides, como os usados em

radio-astronomia (porém, com superfícies que refletem luz)

↳ precisão necessária das superfícies: governada pelo máximo campo permissível de visão.

♣ Dificuldades de convencer a comunidade ↔ ftons tendiam a chegar aos pares aos dois correlatores [dem.: auxiliados por



### Correlação Normalizada:

(estrelas ↔ discos luminosos)

$$\Gamma^2(d) = [2J_1(x) / x]^2 ; x = \pi\theta d / \lambda$$

$\lambda$  → <compr. onda> da luz observada

$d$  → distância entre os 2 espelhos

$\theta$  → ângulo subtendido por estrela  
(≈ disco)

Plot →  $\theta = 6.9 \cdot 10^{-3}$  segundos de arco

## GGLP ('59-'60)

▷▷ 1959 → observação empírica (Goldhaber, Goldhaber, Lee & Pais)  
[Phys. Rev. 120 (1960) 300]

▷▷  $\bar{p}p$  a 1.05 GeV/c Bevatron (LBL): à procura de  $\rho^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ , em câmara de bolha de propano: comparando distribuição-de-massa de  $\pi^+\pi^-$  com  $\pi^\pm\pi^\pm$

▷▷ Exp. não tinha estatística suficiente para estabelecer a existência do  $\rho^0$  mas observou inesperada correlação angular entre  $\pi$ 's idênticos!!

▷▷ 1960 → distrib. angular reproduzida por cálculo de multi- $\pi$ 's no espaço-de-fase, usando função-de-onda simetrizada de partículas idênticas



▷▷ Efeito: consequência da natureza bosônica de  $\pi^+\pi^+$  e  $\pi^-\pi^-$

▷▷ Parametrizaram a correlação por:

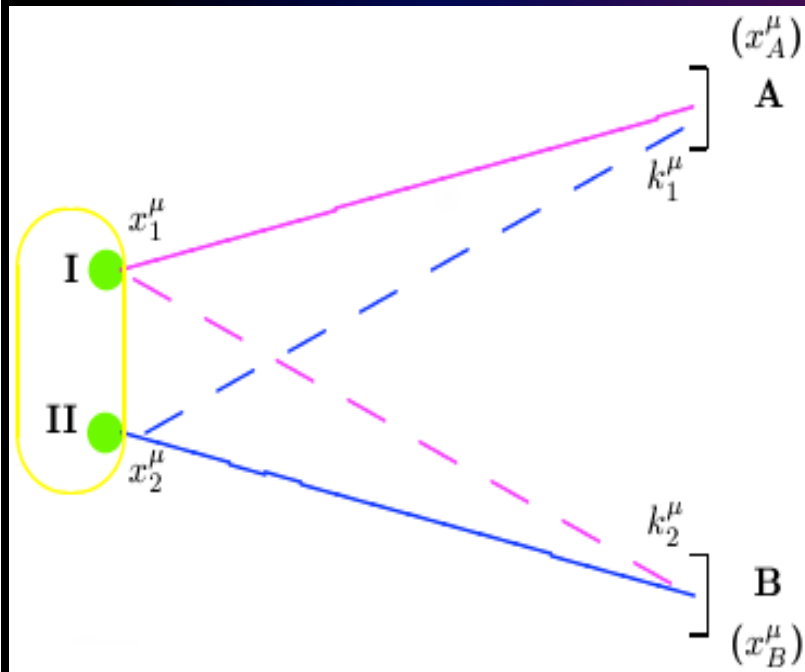
$$C(Q^2) = 1 + e^{Q^2 r^2}; Q^2 = -q^2 = -(k_1 - k_2)^2 = M_{12}^2 - (m_1 - m_2)^2$$

▷▷ GGLP → NÃO eram cientes da experiência de Hanbury Brown e Twiss

# Correlação de duas partículas ou interferometria ou interferência de 2ª. ordem

⊗ Estatística quântica adequada ⊕ fontes caóticas

Ilustração simplificada (2 fontes):



quanta emitidos  $\leftrightarrow$  ondas planas  
Amplitude para process (fontes I & II)

$$A(k_1, k_2) = \frac{1}{2} \left[ e^{-ik_1 \cdot (x_A - x_1)} e^{i\phi_1} e^{-ik_2 \cdot (x_A - x_2)} e^{i\phi_2} \pm e^{-ik_1 \cdot (x_A - x_2)} e^{i\phi_2'} e^{-ik_2 \cdot (x_A - x_1)} e^{i\phi_1'} \right]$$

• (+)  $\leftrightarrow$  bosons; (-)  $\leftrightarrow$  fermions

•  $f_i$   $\leftrightarrow$  fases associadas à emissão (indep. k)

(fontes caóticas  $\leftrightarrow$  diferentes  $f_i$  em cada emissão)

$$\left\langle e^{\pm i(\phi_1 + \phi_2 - \phi_1' - \phi_2')} \right\rangle = \delta_{\phi_1 \phi_1'} \delta_{\phi_2 \phi_2'} + \delta_{\phi_1 \phi_2'} \delta_{\phi_2 \phi_1'} \quad (\text{média nas fases} \leftrightarrow \text{probabilidade})$$

$$\begin{aligned}
P_2 &= \langle |A(k_1, k_2)|^2 \rangle = \\
&= \frac{1}{2} \left\{ 2 \pm e^{i(k_1 - k_2) \cdot (x_1 - x_2)} \langle e^{\pm i(\phi_1 + \phi_2 - \phi'_1 - \phi'_2)} \rangle + c.c. \right\} = \\
&= 1 \pm \cos[(k_1 - k_2) \cdot (x_1 - x_2)]
\end{aligned}$$

☀  $q^\mu = k_1^\mu - k_2^\mu ; K^\mu = \frac{1}{2}(k_1^\mu + k_2^\mu)$

Mais geralmente:  $\rho(x)$  é a distribuição espaço-temporal normalizada x

$$\begin{aligned}
P_2(k_1, k_2) &= P_1(k_1)P_1(k_2) \int d^4x_1 \int d^4x_2 |A(k_1, k_2)|^2 \rho(x_1)\rho(x_2) \\
&= P_1(k_1)P_1(k_2) [1 + |\tilde{\rho}(q)|^2]
\end{aligned}$$

Função de Correlação de 2 partículas →

$$C(k_1, k_2) = \frac{P_2(k_1, k_2)}{P_1(k_1)P_1(k_2)} = 1 + \lambda |\tilde{\rho}(q)|^2$$

\*  $\tilde{\rho}(q) = \int d^4x e^{iq^\mu x_\mu} \rho(x)$  « transformada Fourier de  $\rho(x)$

\*  $\lambda(x) \rightarrow$  é o **parâmetro** de incoerência ou **de caoticidade** (Deutschmann et al., 1978) - para reduzir erros sistemáticos (ajustes gaussianos)

Distribuição (desacoplada) no espaço de fase:

Fontes extensas  
(colisões nucleares ou de partículas)

$$f(x,p) = r(x) g(p);$$

$$r(x) \sim \exp[-x^2/(2R)^2]$$



Função de Correlação de 2 p's

$$C(k_1, k_2) = 1 \pm |\rho(q)|^2 = 1 \pm \exp(-q^2 R^2)$$

R=raio da região emissora de bosons

Em geral  $\mapsto f(x,p) \neq \rho(x) g(p)$

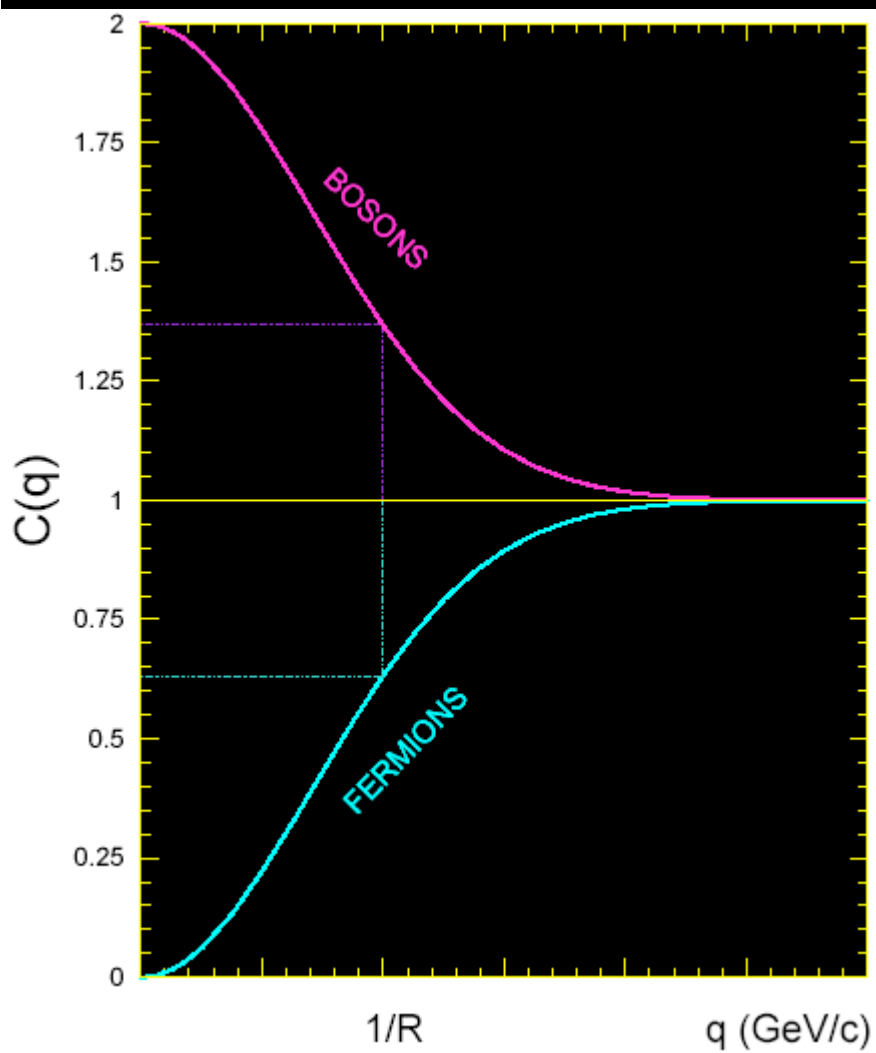


☹ Quadro simples colapsa (dep. em K):

\* Análise depende de modelo  
(sensível à dinâmica subjacente)

\* Requer formalismo mais geral

(Wigner, Cov. Current Ensemble, pacotes-de-onda em torno de traj. class., etc.)





## História Posterior (70's): Modelos e aplicações

♣ Kopylov & Podgoretiskii

Exemplo: emissão da superfície de uma esfera rígida de radio  $R$

$$C(k_1, k_2) = 1 \pm \frac{2J_1(q_\perp R)^2}{q_\perp R} [1 + (q_0 \tau)^2]^{-1}$$

$$\cup 1 \pm \lambda \exp(-\frac{1}{2} q_\perp^2 R_T^2) \exp(-q_0^2 \tau^2)$$

$$|q_\parallel| = \mathbf{q} \cdot \mathbf{n} \quad ; \quad \mathbf{n} = \frac{\mathbf{K}}{|\mathbf{K}|} \quad ; \quad q_\perp = q - q_\parallel$$

$$|q_0| = \mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_1 \cup \frac{1}{2m} (k_1^2 - k_2^2) = \frac{1}{m} (k_1 - k_2) \frac{1}{2} (k_1 + k_2) \propto |q_\parallel|$$

⊙ Adotaram formas similares para estudar:

$\eta$  Tempo de vida de núcleos excitados  $\Leftrightarrow$  interferometria dos neutrons evaporados

$\eta$  Forma e tamanho da região de produção múltipla  $\Leftrightarrow$  correlação de  $\pi^\pm \pi^\pm$   
 $\eta$  aplicada a dados do CERN/ISR de colisões  $pp$  e  $\bar{p}p$

♣ **Muitos outros:**

Shuryak; Cocconi; Fowler & Weiner; Giovannini & Veneziano; Grassberger;  
Yano & Koonin; Gyulassy, Kauffmann & Wilson, ... (+ exp. no ISR, Bevalac...)



Modelos e formalismos, interações no estado final, relação de ressonâncias  $\Leftrightarrow \lambda$

♣ ``Preferência`` de ajuste experimental  $\Leftrightarrow$  gaussianas (+fácil!)

$$C(k_1, k_2) = 1 \pm \lambda \exp(-Q_{inv}^2 R^2) \quad (pp, e^+e^- \bar{p}p)$$

OU

$$C(k_1, k_2) = 1 \pm \lambda \exp(-q_0^2 \tau^2 / 2 - q_T^2 R_T^2 / 2 - q_L^2 R_L^2 / 2)$$

Comumente usadas em  $\updownarrow$  colisões de ions pesados relativísticos

[	$q_L$	$\Leftrightarrow$	ao longo da direção do feixe
	$q_T$	$\Leftrightarrow$	transversal à direção do feixe
	$q_0$	$\Leftrightarrow$	componente temporal

