



O trânsito de Vénus e a Unidade Astronómica

Pedro Augusto
José L. Sobrinho

CCM Nr.128/07

CCM- Centro de Ciências Matemáticas
Universidade da Madeira, P-9000-390 Funchal, Madeira
Tel. + 351 291 705181, Fax: +351-91-705189
e-mail: ccm@uma.pt
<http://www.uma.pt/ccm>

O trânsito de Vénus e a Unidade Astronómica

Novembro 2007

Pedro Augusto

José Laurindo Sobrinho

Grupo de Astronomia



Índice

1 – Introdução.....	5
2 – História	11
2.1 – Vénus, Trânsito e a Unidade Astronómica.....	11
2.2 – Os Trânsitos de 1761/1769, Cook e a Madeira.....	12
3 – Como medir a Unidade Astronómica à custa do Trânsito de Vénus.....	23
3.1 – Definição de paralaxe.....	24
3.2 – O Método de Halley.....	24
3.3 – O Método de Delisle.....	25
3.4 – O percurso.....	25
4 – Medições do Trânsito de 2004	31
5 – Bibliografia.....	33

1 - Introdução

Sempre que um planeta passa em frente ao Sol conforme visto pelo observador (usualmente na Terra), diz-se que *transita* e que ocorreu um *trânsito*. É claro que também se usa a mesma linguagem para as dezenas de *exoplanetas* (descobertos para além do nosso Sistema Solar) que passam em frente da estrela hospedeira, na nossa linha-de-visão (Figura 1).

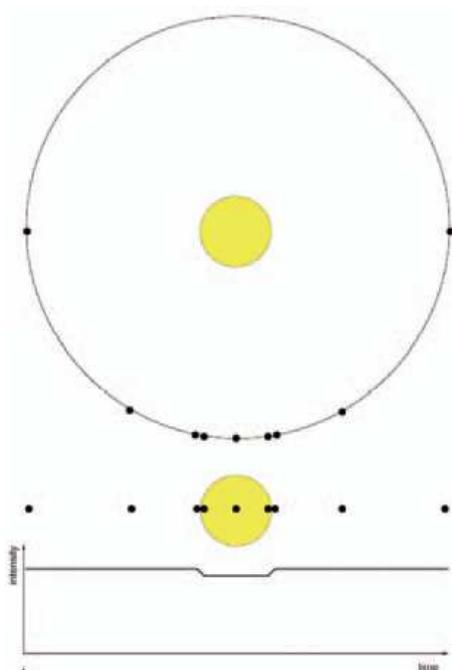


Figura 1[5]. A órbita de um exoplaneta vista de cima e em trânsito – é esta a disposição geométrica em relação à Terra que explica a curva de luminosidade (intensidade vs. tempo), em baixo: a única grandeza mensurável para este tipo de sistema.

No caso do nosso Sistema Solar, conforme vistos da Terra, só é possível vermos trânsitos de Vénus e Mercúrio, os chamados *planetas interiores*, por terem uma órbita (média) que os coloca mais perto do Sol do que a nossa^a.

^a É claro que estamos a excluir os “trânsitos” da Lua a que chamamos *eclipses* do Sol.

A propósito, à *distância média*^b entre a Terra e o Sol chama-se *Unidade Astronómica* (UA), já que é utilizada como padrão de distância no nosso Sistema Solar (e não só). Define-se como 149 597 870 691 m. A distância tem de ser *média*, pois já Kepler no séc.XVII descobriu que as órbitas de todos planetas são elípticas (como uma circunferência achatada), embora umas mais que outras. Em adição, as órbitas não estão todas no mesmo plano...

... e é por isso que o fenómeno de trânsito é tão *raro*, especialmente para Vénus. Para Mercúrio, por estar bem mais perto do Sol, a probabilidade é maior mas ainda relativamente pequena (em média, ocorrem 13 em cada século).

Chama-se *linha dos nodos* àquela que corresponde às intersecções dos planos das órbitas de dois planetas. A intersecção de uma órbita com esta linha define dois *nodos* – Figura 2. Assim, visto da Terra, quando Vénus passa num nodo (o *de cá*, para termos trânsito) temos um alinhamento perfeito Terra-Vénus-Sol. O ângulo entre o plano das órbitas de Vénus e da Terra é de 3.39°. Devido ao Sol não ser um ponto, isto implica que existe uma pequena zona (na prática, corresponde a um percurso de 4 dias) perto do *nodo* onde vemos Vénus a passar à frente do Sol (trânsito), mesmo que o alinhamento não seja perfeito – Figura 3. Como a Terra passa pelos nodos nos dias 7 de Junho e 8 de Dezembro, é sempre por volta destas datas que podemos esperar um trânsito de Vénus.

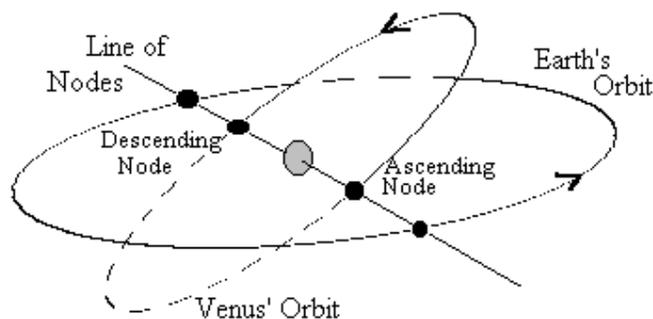


Figura 2[3]. A linha-dos-nodos é definida na intersecção dos planos de duas órbitas. No caso da Terra e Vénus, o ângulo entre estas é de 3.39°. Dois nodos (pontos) são definidos na intersecção da órbita de Vénus com a linha-dos-nodos.

^b Formalmente, porque a distância média da Terra ao Sol varia (várias influências gravíticas), a UA é *definida* como o raio de uma órbita perfeitamente circular à volta do Sol com um período de 365.2568983 dias (o Ano Gaussiano). Hoje em dia consegue-se medir a distância da Terra ao Sol com uma precisão próxima do metro.

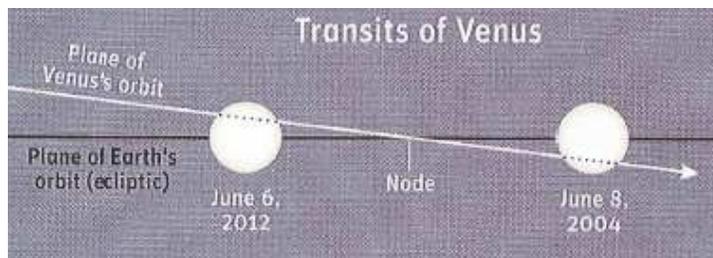


Figura 3[8]. Devido ao ângulo de 3.39° entre os planos das órbitas da Terra e de Vénus, só vemos trânsitos deste sobre o Sol muito perto de um nodo. Daí a pequena probabilidade. Assinalados estão os percursos de Vénus durante o último trânsito e no próximo.

Os trânsitos aparecem, geralmente, em pares separados de oito anos^c e, entre eles, de 121.5 ou 105.5 anos, alternadamente. O ciclo global é, então, de 243 anos ($8 + 121.5 + 8 + 105.5$). O trânsito anterior ao último aconteceu em 1882, cerca de 122 anos antes do mais recente, que ocorreu no dia 8 de Junho de 2004. Este foi um dos eventos astronómicos mais mediáticos de sempre (e.g. [1,2,3]). Pretendeu-se recordar as medições históricas da Unidade Astronómica graças a trânsitos de Vénus passados^d. O próximo trânsito de Vénus ocorrerá no dia 6 de Junho de 2012. Depois, teremos de esperar 105 anos – Tabela 1.

Tabela 1. Os trânsitos de Vénus a partir do primeiro previsto (por Kepler) e até ao séc.XXIII.

Data	Local [observador]	comentário	Fig.
6-Dez-1631	não foi visível da Europa	ninguém viu	
4-Dez-1639	Much Hoole, Inglaterra [Jeremiah Horrocks*] Salford, Inglaterra [William Crabtree]		4
6-Jun-1761	muitas expedições e observações planeadas	guerra dos sete anos França-Inglaterra	
4-Jun-1769	muitas expedições e observações efectuadas Por ex: Vardø, Noruega [Maximilian Hell] Baía de Hudson, Canadá [Dymond, Wales] Taiti [James Cook, Green**]		5
9-Dez-1874	muitas expedições e observações efectuadas	primeiro trânsito "público" e fotografado	6, 7, 8
6-Dez-1882	muitas expedições e observações efectuadas		9
8-Jun-2004		visível da Europa, Ásia, África, Austrália	
6-Jun-2012		não será totalmente visível da Europa	
11-Dez-2117			
8-Dez-2125			
11-Jun-2247			

* Previu este trânsito um mês antes e informou o seu amigo William Crabtree sobre o mesmo.

** Foi a propósito desta viagem no Endeavour, de interesse astronómico, que Cook descobriu o Havai (antes de chegar ao Taiti) e a Austrália (costa leste) pouco depois. Foi também esta a viagem que lançou a sua carreira como navegador.

^c Raramente, porque os movimentos planetários nunca são bem comportados, acontece não se ver o par separado de oito anos mas apenas um dos eventos. A última vez que tal aconteceu foi no séc.XIV e a próxima será daqui a um pouco mais de mil anos.

^d Hoje em dia há métodos bem mais precisos para fazer a medição da UA (nomeadamente radar). Daí o interesse destas campanhas ser apenas histórico e para promoção da Astronomia junto do público.



Figura 4[13]. Carr House em Much Hoole (Lancashire, Inglaterra) onde Jeremiah Horrocks observou um trânsito de Vénus pela primeira vez na história.

a)

b)



Figura 5[6,13]. a) O Observatório portátil usado por Cook para observar o trânsito de 1769 (aqui homenageado por emissão filatélica); b) o Forte Vénus, construído por Cook e equipa no Taiti, para efectuar as observações.

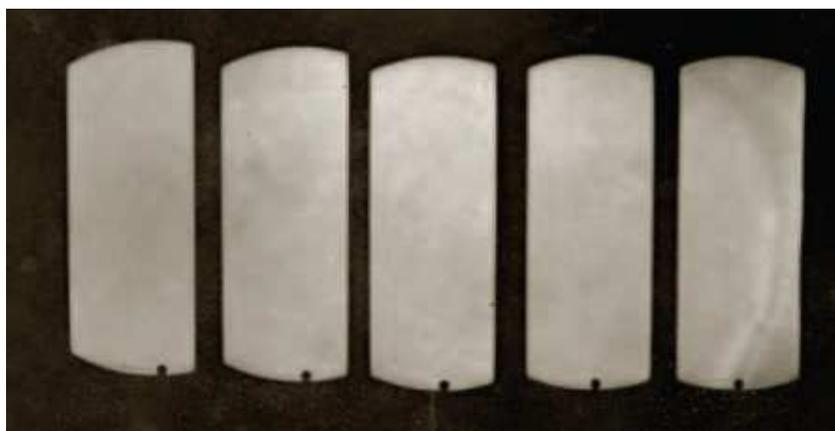


Figura 6[5]. Vénus como fotografado pela primeira vez em trânsito (1874).

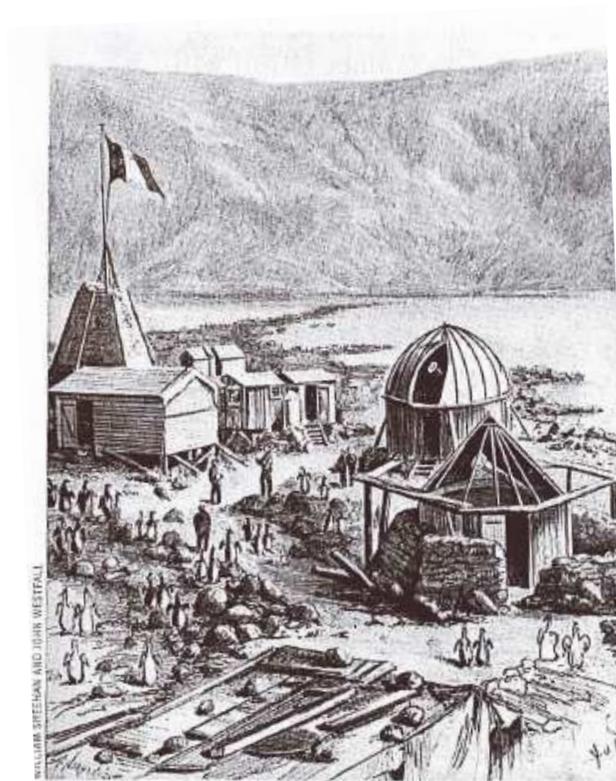


Figura 7[10]. Os observatórios montados na ilha de S.Paulo por uma expedição francesa (trânsito de 1874).

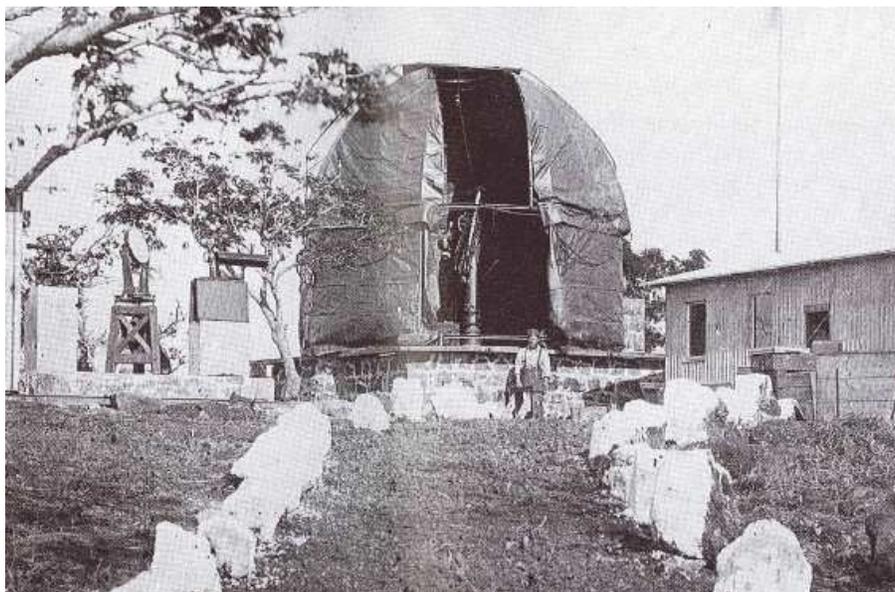


Figura 8[11]. O observatório temporário montado por Lord Lindsay para observar o trânsito de 1874 das ilhas Maurícias.

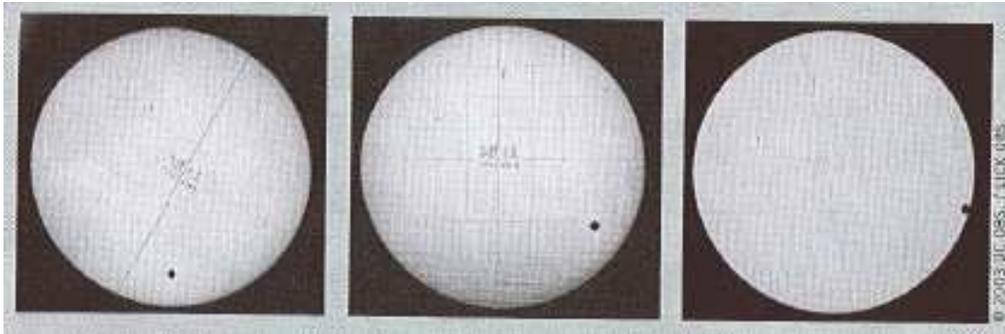


Figura 9[11]. Vénus em trânsito fotografado (1882).

Os trânsitos dos planetas interiores foram valiosos para a medição da nossa distância média ao Sol pelo método da *paralaxe*. Uma boa noção desta técnica adquire-se com o seguinte exercício: olhar (com ambos os olhos alternadamente) para um único dedo da nossa mão com o braço esticado contra um fundo distante, veremos o dedo “deslocar-se” para a esquerda e para a direita em relação a esse fundo devido à distância entre os olhos. A este fenómeno chama-se *paralaxe*. A paralaxe mede um *ângulo*: aquele que é descrito pelo dedo, no seu “movimento” em relação ao fundo. É mensurável na proporção em que uma volta completa são 360°.

2 - História

2.1 Vénus, Trânsitos e a Unidade Astronómica

Embora já se conhecessem vários planetas do Sistema Solar e ainda que as suas órbitas eram elípticas, a falta do conhecimento das distâncias entre eles (em particular entre a Terra e o Sol) era uma das falhas mais graves da Astronomia até ao séc.XVIII. De facto, se nem tão perto conhecíamos distâncias, como poderíamos almejar conhecer distâncias a estrelas e a objectos mais longínquos? O mais interessante era que, após a descoberta por Copérnico do modelo geocêntrico para o Sistema Solar, só faltava o conhecimento de uma qualquer das distâncias interplanetárias para que todas as outras surgissem pelas relações de Kepler. Ainda, a partir de simples relações geométricas também poderíamos determinar as distâncias às estrelas mais próximas. Assim, os esforços concentraram-se na determinação da Unidade Astronómica (UA).

As referências mais antigas ao planeta Vénus, de que há conhecimento, foram encontradas nas ruínas de Ninive (actual Mosul no Iraque) e remontam ao Séc. XVI.

O primeiro a apontar para a possibilidade de medir a UA a partir de trânsitos foi Kepler nos anos 20 do séc. XVII, prevendo o trânsito seguinte em 1631^e: Mercúrio dia 7 de Novembro e Vénus dia 6 de Dezembro. O primeiro foi observado em Paris por Pierre Gassendi (o primeiro trânsito em que tal aconteceu^f) enquanto o de Vénus não foi visível de Paris (foi-o em outras partes da Europa, mas mais ninguém o tentou observar – talvez devido à guerra dos 30 anos?). Os trânsitos seguintes (do séc.XVIII), foram previstos com muito tempo de antecedência. Houve, assim, tempo para Halley (publicação de 1716, após a inspiração motivada pela observação de um trânsito de Mercúrio em 1677) propor uma forma de medir a UA à custa dos trânsitos de Vénus; ainda, teve tempo para estimar esta em 111 milhões de km a partir do registo de observações telescópicas. Na década de 1720, Delisle simplificou o método de Halley. Prepararam-se, com este propósito, grandes expedições para observar os quatro trânsitos dos sécs.XVIII e XIX, motivados pelo meticoloso trabalho de Halley e Delisle.

^e Por alguma estranha razão, Kepler não conseguiu prever o trânsito de 1639.

^f Astrónomos chineses já faziam referência a “defeitos” na superfície do Sol (as manchas solares). Será que Vénus em trânsito foi por estes algum dia confundido por uma mancha?

O irónico é que, apesar das numerosas e multi-nacionais colaborações e expedições dos séculos XVIII e XIX e consequentes medições aproximadas, o Trânsito de Vénus acabou por nunca permitir medir a UA com a precisão necessária⁸: era extremamente difícil medir os instantes de contacto devido a imensos efeitos ópticos. Só nos finais do séc.XIX e alvares do séc.XX se conseguiu tal feito, por outros métodos. Por exemplo, Hornsby, em 1771, obteve o valor de 8.78” para a paralaxe do Sol (actualmente mede-se 8.794148”). No entanto, autores contemporâneos obtiveram valores na gama 8.43” aos 8.80”, implicando um inaceitável erro de dez milhões de km na UA.

Uma curiosidade: há uma relação entre Portugal e o Trânsito de Vénus de 1882: este tocou profundamente John Philip de Sousa (1854-1932), um compositor americano de ascendência portuguesa (avô), que compôs a “Transit of Venus March”. Este é mais conhecido pelas suas marchas de espírito nacionalista (e.g. Washington Post March ou Stars and Stripes Forever – marcha nacional americana conhecida em todo o mundo).

2.2 Os Trânsitos de 1761/1769, Cook e a Madeira

2.2.1 Os Trânsitos de 1761/1769

A observação do trânsito de Vénus de 1761 deu lugar provavelmente ao primeiro grande projecto científico à escala internacional. Foram enviadas expedições para locais tão remotos quanto a ilha de S^{ta} Helena (Atlântico), Terra Nova (Canadá), Vardø (Noruega, acima do Circulo Ártico), Ilha de Rodrigues (Índico), Tobolsk (Sibéria) e Ilhas Maurícias (Índico). A Guerra dos Sete Anos (França vs. Inglaterra) causou problemas a algumas das expedições. Os valores de paralaxe solar medidos (entre 8.28” e 10.6”) não permitem qualquer conclusão sobre a UA.

As atenções passaram para o próximo trânsito de Vénus (de 1769). Mais uma vez, sendo o trânsito pouco visível da Europa (Figura 10), enviaram-se expedições por todo o mundo. Entre os locais escolhidos contavam-se: o Cabo Norte (Noruega), a Baía de Hudson (Canadá) e a ilha do Rei Jorge (actual Taiti), descoberta no ano anterior ao do trânsito.

⁸ Encke (em 1824) fez um estudo cuidado de todas as observações dos dois trânsitos do séc.XVIII e chegou ao valor de 153340000 ± 660000 km (erro relativo de 0.4%): 2.5% acima do verdadeiro (paralaxe do Sol: 8.5776”).

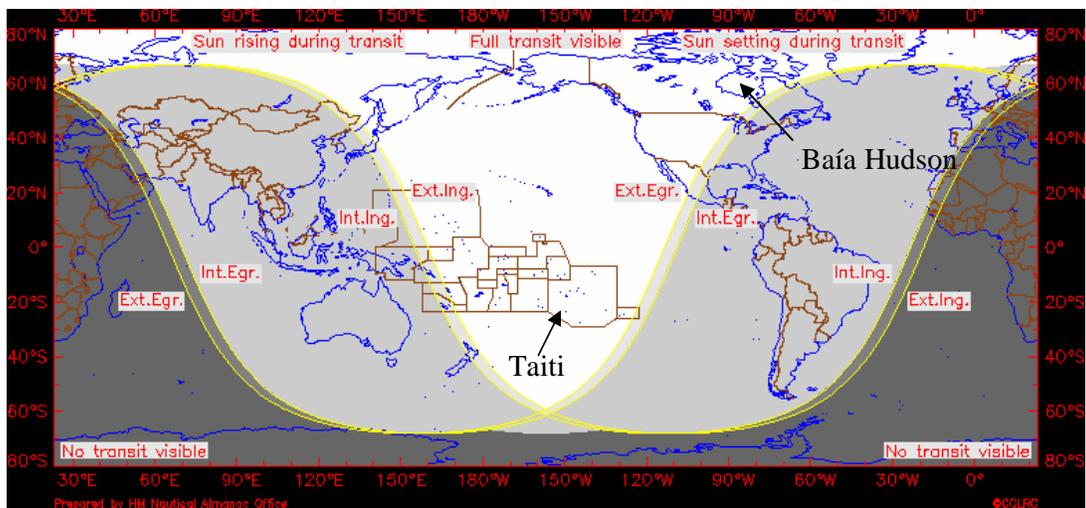


Figura 10[21]. Visibilidade do Trânsito de Vénus de 1769. No caso da Madeira o ocaso do Sol ocorreu durante o trânsito pelo que o fenómeno apenas poderia ser visto parcialmente. Estão assinalados o Taiti e a Baía de Hudson, importantes para as expedições britânicas.

2.2.2 James Cook

A expedição ao Taiti ficou à responsabilidade do Capitão James Cook acompanhado pelo Astrónomo Charles Green que já havia participado no trânsito de 1761. A *Royal Society* e o *Royal Observatory* de Greenwich forneceram diverso equipamento científico necessário às observações, nomeadamente: quatro telescópios reflectores de foco gregoriano (Figura 11) equipados com um micrómetro (na ocular); um sextante, um quadrante e diversos relógios (instrumentos vitais para a determinação da latitude e da longitude e na manutenção de um serviço horário local).

No dia 26 de Agosto de 1768 o Endeavour partiu do porto de Plymouth naquela que seria, até a data, uma das mais caras e ambiciosas expedições levadas a cabo pela Inglaterra. Passou pela Madeira, tendo fundeado no Funchal, entre 12 a 22 de Setembro de 1768 (Secção 2.2.3). Depois de contornar o cabo Horn na América do Sul, o Endeavour entrou no Pacífico tendo ancorado a 13 de Abril de 1769 na Baía de Matavai na costa norte da ilha de Taiti, mais de sete semanas antes do evento. Para evitar quaisquer interrupções durante a observação, construiu-se um forte, designado por *Forte Vénus* (Figura 5b).



Figura 11 [18] - Telescópio reflector de foco gregoriano equipado com um micrómetro (na ocular).

O trânsito foi observado com sucesso a partir dos três locais. Embora o grande objectivo fosse medir os instantes de entrada e saída de Vénus do disco solar, os micrómetros instalados nas oculares permitiram também medir o diâmetro de Vénus tendo sido obtidos valores entre os 54.77" e 56.28". Acerca da observação, Cook escreveu no seu diário:

“This day prov’d as favourable to our purpose as we could wish, not a Cloud was to be seen the whole day and the air was perfectly clear [...] we very distinctly saw an Atmosphere or dusky shade round the body of the Planet which very much disturbed the times of the Contacts...”

Uma vez em Inglaterra, Cook lançou-se na tarefa não trivial de tentar dar sentido ao vasto leque de observações e dados recolhidos; publicou o consequente relatório de 25 páginas em 1771 na *Philosophical Transactions of the Royal Society* (tendo por primeiro autor Charles Green, entretanto falecido – [16]) – Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Trânsito de Vénus (Green) com um telescópio reflector com uma distância focal de 60cm e um poder de ampliação de 140 vezes – c.f. Figura 12.

Tempo (hh mm ss)	Etapa
09 21 45	Luz sobre o limbo do Sol (b-1)
09 22 00	Certo (b-2)
09 39 20	Primeiro contacto interno do limbo de Vénus com o Sol (b-4)
09 40 00	Penumbra e limbo do Sol em contacto (b-5)
03 10 05	Primeiro contacto da penumbra, alternando entre perceptível e imperceptível
03 10 53	Segundo contacto interno dos dois corpos
03 27 30	Segundo contacto externo
03 28 16	Saída total da penumbra. Limbo do Sol perfeito

Tabela 3 - Trânsito de Vénus (Cook) com um telescópio reflector com uma distância focal de 60cm e um poder de ampliação de 140 vezes – c.f. Figura 12.

Tempo (h:m:s)	Etapa
09 21 50	Primeira aparência de Vénus sobre o Limbo do Sol (a-1)
09 39 20	Primeiro contacto interno ou então o limbo de Vénus coincidente com o do Sol (a-2)
09 40 20	Pequeno feixe de luz observado abaixo da penumbra (a-3)
03 10 15	Segundo contacto interno da penumbra ou o feixe de luz rompeu inteiramente
03 10 47	Segundo contacto interno dos dois corpos
03 27 24	Segundo contacto externo dos corpos
03 28 04	Saída total da penumbra; dúbio

Em resumo, Green & Cook (1771) [16] apresentaram a seguinte descrição:

A primeira aparência de Vénus sobre o Sol, foi certamente apenas a penumbra, o contacto dos limbos apenas aconteceu vários segundos depois. Esta aparência foi observada por Mr. Green e por mim mas o instante em que ocorreu não foi registado por nenhum de nós.

Afigurou-se muito difícil medir com precisão os instantes correspondentes aos contactos internos de Vénus devido ao facto da penumbra no limbo do Sol ser

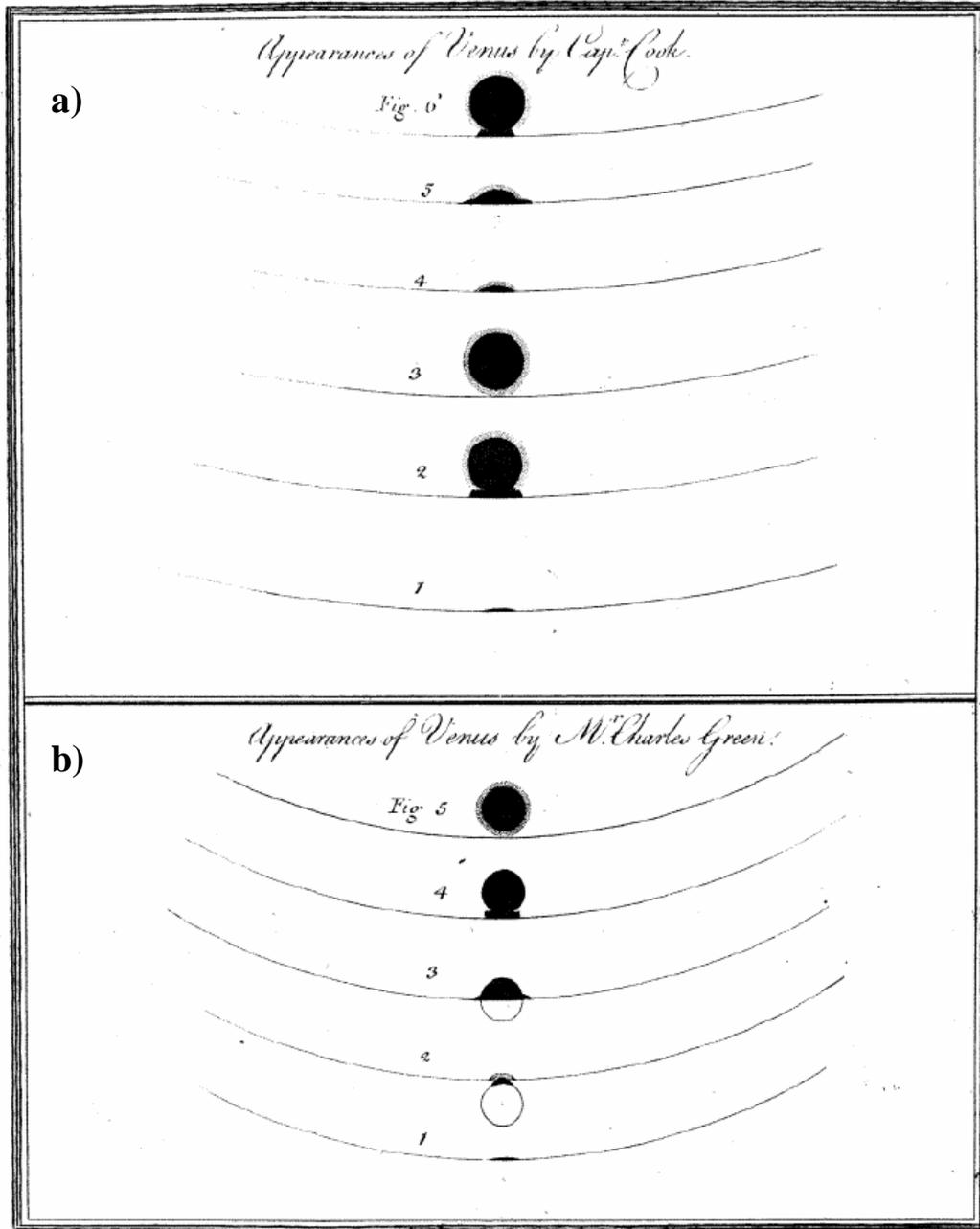


Figura 12[16] - Desenhos feitos por Cook (a) e Green (b) ilustrando os pontos de contacto durante o trânsito de Vénus.

praticamente tão escura como o próprio planeta. Neste instante uma luz fraca, muito mais fraca que o resto da penumbra, pareceu convergir em direcção ao ponto de contacto, mas sem o atingir verdadeiramente. Isto foi visto por mim e pelos outros dois observadores e acabou por nos ajudar imenso na determinação dos contactos internos do corpo escuro de Vénus com o limbo do Sol.

Eu julgo que a penumbra estava em contacto com o limbo do Sol 10 segundos antes do tempo indicado anteriormente. Do mesmo modo, à saída, o encadear de luz não desapareceu abruptamente mas sim de forma gradual com a mesma incerteza. O tempo anotado corresponde apenas ao instante em que o encadear de luz foi completamente desfeito pela penumbra.

Na saída total achei difícil distinguir o limbo de Vénus da penumbra, o que naturalmente tornou o segundo contacto externo um pouco dúbio.

2.2.3 Cook e a Madeira

No diário do Capitão Cook existem diversas referências à passagem pela região da Madeira entre os dias 12 e 24 de Setembro de 1768. A primeira referência ocorre a 12 de Setembro e refere o avistamento do Porto Santo, ilhas Desertas e Madeira. O Endeavour fundeou na baía do Funchal ao fim do dia 13 de Setembro, tendo Cook registado no seu diário a presença de diversos navios mercantes. Nos dias seguintes abasteceram-se de mantimentos, nomeadamente: água, vinho, carne e frutas frescas. Infelizmente, um acidente no dia 14 vitimou um dos elementos da tripulação.

Curiosamente, no seu diário do dia 18, Cook fala sobre a localização geográfica do Funchal. Observações anteriores feitas pelo Dr. Eberton da Royal Society davam uma latitude de 32°33'33" Norte e uma longitude de 16°49' a Oeste de Greenwich. Cook contesta estes valores.

A saída do Funchal ocorreu no dia 19 de Setembro pela meia-noite. Na tarde do dia 22 de Setembro, Cook avistou as ilhas Selvagens. A 24 de Setembro o Endeavour passou pela ilha de Tenerife a qual, segundo os cálculos de Cook, fica a 93 léguas do Funchal (449 km) e a 98 milhas das Selvagens (181 km).

A seguir é apresentado o diário feito pelo Capitão Cook entre os dias 12 e 24 de Setembro (como em [20]):

Monday, 12th.

Moderate breezes and fine Clear weather. At 6 a.m. the Island of Porto Santo bore North-West by West, distance 9 or 10 leagues. Hauld the Wind to the westward at noon, the Deserters extending from West-South-West to South-West by South, the Body of Madeira West 1/2 South, and Porto Santo North-North-West 1/2 West. Wind North-North-West; course South 40 degrees West; distance 102 miles; latitude 32 degrees 43 minutes North, longitude 15 degrees 53 minutes West.

Tuesday, 13th.

Fresh breezes and clear weather. At 8 p.m. anchored in Funchal Road in 22 fathoms. Found here His Majesty's Ship Rose and several Merchants' Vessels. In the Morning new berthed the Ship, and Moor'd with the Stream Anchor, half a Cable on the Best Bower and a Hawser and a half on the Stream Wind North-West.

Moored in Funchal Road, Madeira, Wednesday, 14th.

First part fine, Clear weather, remainder Cloudy, with Squals from the land, attended with Showers of rain. In the Night the Bend of the Hawsers of the Stream Anchor Slip'd owing to the Carelessness of the Person who made it fast. In the Morning hove up the Anchor in the Boat and carried it out to the Southward. In heaving the Anchor out of the Boat Mr. Weir, Master's Mate, was carried overboard by the Buoy rope and to the Bottom with the Anchor. Hove up the Anchor by the Ship as soon as possible, and found his Body intangled in the Buoy rope. Moor'd the Ship with the two Bowers in 22 fathoms Water; the Loo Rock West and the Brazen Head East. Sailed His Majesty's Ship Rose. The Boats employed carrying the Casks a Shore for Wine, and the Caulkers caulking the Ship Sides. Wind Easterly.

Thursday, 15th.

Squalls of Wind from the Land, with rain the most part of these 24 Hours. Received on board fresh Beef and Greens for the Ship's Company, and sent on shore all our Casks for Wine and Water, having a Shore Boat employed for that purpose. Wind North-East to South-East.

Friday, 16th.

The most part fine, Clear weather. Punished Henry Stevens, Seaman, and Thomas Dunster, Marine, with 12 lashes each, for refusing to take their allowance of Fresh Beef. Employed taking on board Wine and Water. Wind Easterly.

Saturday, 17th.

Little wind, and fine Clear weather. Issued to the whole Ship's Company 20 pounds of Onions per Man. Employed as Yesterday. Wind Westerly.

Sunday, 18th.

Ditto Weather. P.M. received on board 270 pounds of fresh Beef, and a Live Bullock charged 613 pounds. Completed our Wine and Water, having received of the former 3032 Gallons, of the Latter 10 Tuns. A.M. unmoor'd and prepar'd for Sailing. Funchall, in the Island of Madeira, by Observations made here by Dr. Eberton, F.R.S., lies in the latitude of 32 degrees 33 minutes 33 seconds North and longitude West from Greenwich 16 degrees 49 minutes, the Variation of the Compass 15 degrees 30 minutes West, decreasing as he says, which I much doubt; neither does this Variation agree with our own Observations. The Tides flow full, and Change North and South, and rise Perpendicular 7 feet at Spring Tides and 4 feet at Neap tides. We found

the North point of the Diping Needle, belonging to the Royal Society, to Dip 77 degrees 18 minutes. The Refreshments for Shipping to be got at this place are Wine, Water, Fruit of Several Sorts, and Onions in Plenty, and some Sweatmeats; but Fresh Meat and Poultry are very Dear, and not to be had at any rate without Leave from the Governour. Wind southerly, East-South-East, South-West.

Monday, 19th.

Light breezes and fine Clear weather. At Midnight Sailed from Funchall. At 8 a.m. the high land over it bore North 1/2 East. Unbent the Cables, stow'd the Anchors, and issued to the Ship's Company 10 pounds of Onions per Man. Ship's Draught of Water, Fore 14 feet 8 inches; Aft 15 feet 1 inch. Wind East-South-East; latitude 31 degrees 43 minutes North; at noon, High land over Funchall North 7 degrees East, 49 miles.

Tuesday, 20th.

Light Airs and Clear weather. P.M. took several Azimuth, which gave the Variation 16 degrees 30 minutes West. Put the Ship's Company to three Watches. Wind variable; course South 21 degrees 30 minutes West; distance 28 miles; latitude 31 degrees 17 minutes, longitude 17 degrees 19 minutes West; at noon, Funchall, Island of Madeira, North 13 degrees East, 76 miles.

Wednesday, 21st.

First part light Airs, remainder fresh Breezes and Clear weather. Served Hooks and Lines to the Ship's Company, and employed them in the day in making Matts, etc., for the Rigging. Wind South-West to South-West by West; course South 60 degrees East; distance 60 miles; latitude 30 degrees 46 minutes North, longitude 16 degrees 8 minutes South; at noon, Funchall North 10 degrees West, 113 miles.

Thursday, 22nd.

Genteel breezes and Clear weather. At 4 p.m. saw the Salvages bearing South; at 6, the Body of the Island bore South 1/2 West, distant about 5 leagues. Found the Variation of the Compass by an Azimuth to be 17 degrees 50 minutes West. At 10 the Isles of Salvages bore West by South 1/2 South, distance 2 leagues. I make those Islands to be in latitude 30 degrees 11 minutes South, and South 16 degrees East, 58 leagues from Funchall, Madeira. Wind South-West; course South 35 degrees 30 minutes East; distance 73 miles; latitude 29 degrees 40 minutes North, longitude 15 degrees 31 minutes West; at noon, Funchall North 21 degrees West, 62 leagues.

Friday, 23rd.

Light breezes and Clear weather. At 6 a.m. saw the Peak of Teneriff bearing West by South 1/2 South, and the Grand Canaries South 1/2 West. The Variation of the Compass from 17 degrees 22 minutes to 16 degrees 30 minutes, Wind South-West, North-East; course South 26 degrees West; distance 54 miles; latitude 28 degrees 51 minutes North, longitude 15 degrees 50 minutes West; at noon, Funchal North 12 degrees 45 minutes West, 77 leagues.

Saturday, 24th.

A fresh Breeze and Clear weather the most part of these 24 Hours. I take this to be the North-East Trade we have now got into. At 6 p.m. the North-East end of the Island of Teneriff West by North, distance 3 or 4 Leagues. Off this North-East point lies some Rocks high above the water. The highest is near the point, and very remarkable. By our run from Yesterday at Noon this end of the Island must lie in the latitude of 28 degrees 27 minutes and South 7 degrees 45 minutes East, distance 83 leagues from Funchal, and South 18 degrees West, 98 miles from the Salvages. At 1 a.m. the Peak of Teneriff bore West-North-West.

Found the Variation to be this morning 16 degrees 14 minutes West. The Peak of Teneriff (from which I now take my departure) is a very high Mountain upon the Island of the same name--one of the Canary Islands. Its perpendicular highth from Actual Measurement is said to be 15,396 feet. It lies in the Latitude of 28 degrees 13 minutes North, and Longitude 16 degrees 32 minutes from Greenwich. Its situation in this respect is allowed to be pretty well determined. Wind North-East by East; latitude 27 degrees 10 minutes North; at noon Peak of Teneriff North 18 degrees 45 minutes, 74 miles.

3 – Como medir a Unidade Astronómica à custa do Trânsito de Vénus

O essencial é aproveitar o facto do Sol e Vénus não serem pontos: como ambos são vistos como discos (o de Vénus 32 vezes mais pequeno que o do Sol), definem-se *quatro pontos de contacto* entre Vénus e o Sol desde que o trânsito se inicia até que termina^h - Figura 13. Bastará, então, determinar os *instantes exactos* em que se dão os quatro contactos para dois locais (ou mais – quanto mais, mais exacto), o que estabelece um valor para a *paralaxe* do Sol. O caminho para o fazer, no entanto, é tortuoso e teremos de definir várias quantidades, inclusive matemáticas, para a sua total compreensão. Teremos, ainda, de simplificar o tratamento, encontrando uma aproximação de “ordem zero” para a determinação da UA.

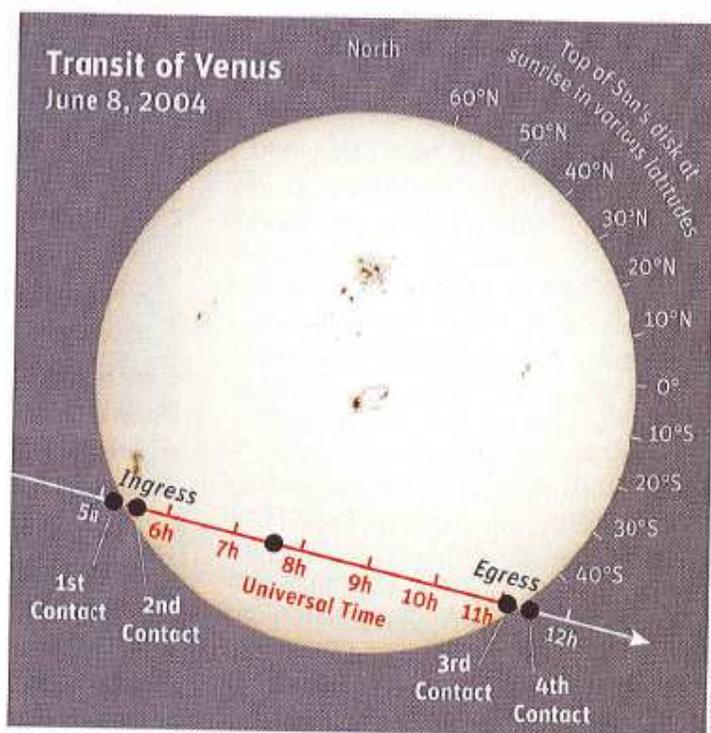


Figura 13[7]. O trânsito de Vénus de 8 de Junho de 2004 como exemplo de definição dos quatro instantes de contacto Vénus-Sol: ingresso (1º e 2º contactos) e egresso (3º e 4º contactos). A geometria do trânsito depende da latitude (à direita indica-se o topo do Sol quando nasce, em função desta).

^h Reside precisamente aqui a razão porque Vénus é (e foi, historicamente) muito mais importante que Mercúrio para a medição da UA: é bem maior; é muito mais difícil medir os pontos de contacto com Mercúrio, que é quase pontual (200 vezes mais pequeno que o Sol) e certamente o era, virtualmente, para os astrónomos de há séculos.

3.1 Definição de paralaxe

A forma mais simples de compreender esta quantidade é pela experiência própria: o que acontece quando esticamos um braço e olhamos para o polegar erguido contra uma qualquer vista distante à medida que alternamos o olho que está aberto? Vemo-lo “mover”. Com instrumentos adequados é possível medir o ângulo deste movimento (aparente). É a este que se chama *paralaxe* (p). A partir da paralaxe conseguimos determinar a distância (d) ao polegar: basta conhecer a distância (b) entre os olhos (mais perto de nós e, logo, mais fácil de conhecer) – Figura 14.

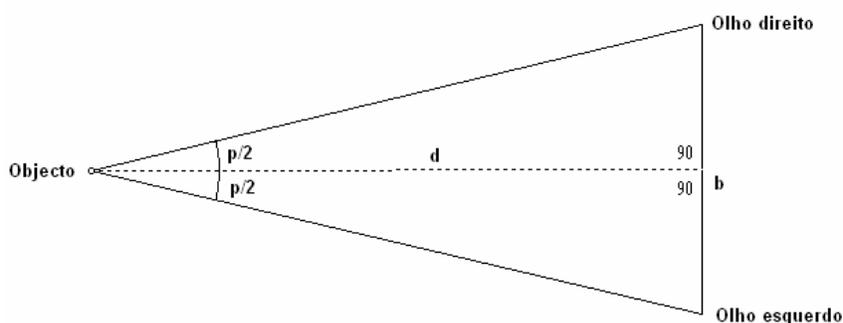


Figura 14. Conhecendo a paralaxe (ângulo p , na figura dividido em duas partes por triângulos rectângulos) e a distância base b entre as observações que a originaram (já que se trata sempre de um movimento aparente), calculamos d , a distância ao objecto que foi observado em “movimento” contra um fundo de objectos muito mais distantes (e, assim, virtualmente imóveis em relação ao mais próximo). Pela trigonometriaⁱ, $d = b / [2 \tan (p/2)]$.

É esta técnica (chamada de *triangulação*) que se utiliza para medir distâncias astronómicas, desde o nosso Sistema Solar até às estrelas. O Trânsito de Vénus permite determinar a paralaxe do Sol (graças à projecção do percurso de Vénus sobre este, conforme visto por dois observadores diferentes na Terra), logo a sua distância.

3.2 O Método de Halley

Este método depende da medição dos quatro pontos de contacto com grande precisão (menos de dois segundo de erro, de forma a determinar a paralaxe com uma precisão de 1 em 500), em locais da Terra tão afastados (na direcção norte-sul) quanto possível – Figura 15. Mais precisamente:

ⁱ A tangente de um ângulo é definida, num triângulo rectângulo, como a divisão do lado oposto ao ângulo pelo lado adjacente.

- i) medir, em pelo menos dois locais, os instantes em que acontecem os quatro contactos;
- ii) deduzir o comprimento angular de cada percurso independente sobre a superfície do Sol (fundamental: montagem equatorial^j);
- iii) calcular a *paralaxe* do Sol, pela determinação da separação angular dos dois percursos anteriores;
- iv) à custa da latitude (e longitude) dos lugares e do raio da Terra, calcular a distância (linear, *não* sobre a superfície da Terra) entre os mesmos;
- v) descontar o movimento do Sol durante o trânsito;
- vi) à custa da paralaxe e da distância linear entre os locais, por simples trigonometria, calcula-se a distância a Vénus e ao Sol.



Figura 15[13]. O percurso de Vénus em trânsito define uma corda sobre o disco solar que é diferente consoante o ponto de observação da Terra. O ângulo entre os mesmos dá-nos a paralaxe do Sol, que é também o ângulo definido por ambos os triângulos que, na Figura, têm vértice em Vénus.

3.3 O Método de Delisle

Como o método de Halley, este também requer grande precisão e locais afastados mas apenas precisa de um par de pontos de contacto (ou os do início ou os do final do trânsito – Figura 13). Estes até podem ser medidos do mesmo local, numa primeira aproximação.

3.4 O percurso

Neste artigo, apenas nos debruçamos sobre aproximações de ordem zero na determinação da UA. Assim, o fundamental trabalho recorrendo a trigonometria esférica e a utilização de mais informação (como as coordenadas na Esfera Celeste do Sol e Vénus; o valor da longitude dos locais de observação; a forma da Terra como geóide)

^j Se a montagem for altazimutal, o percurso aparente não será linear...

não são aqui tratados (ver [14,15]). Estes permitiriam resultados de primeira e segunda ordem, conforme o grau de exigência. Foi a este nível que Halley e Delisle propuseram os seus métodos.

3.4.1 A distância de Vénus ao Sol em UA

Começemos por determinar o valor da *elongação máxima* (θ) de Vénus. Esta é definida quando o conjunto Terra-Vénus-Sol faz um ângulo recto (90°) em Vénus – Figura 16. Vale (por medições que se podem reproduzir facilmente, por exemplo com um sextante):

$$\theta = 46.054^\circ$$

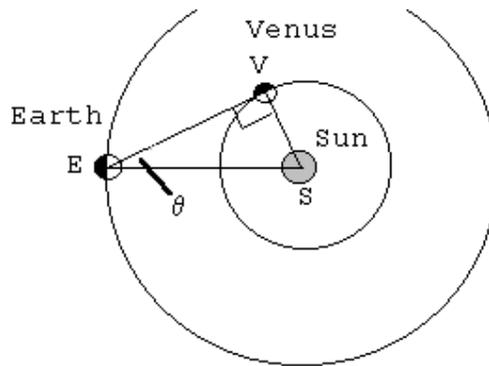


Figura 16[3] A Terra, Vénus e o Sol definem um *triângulo rectângulo* no espaço quando Vénus está na elongação máxima (θ). Por definição, o *seno* do ângulo θ é dado pela divisão do lado oposto do triângulo (distância Vénus-Sol, VS) pela hipotenusa (o segmento maior do triângulo) – a distância Terra-Sol (TS). Escreve-se: $\text{sen } \theta = \text{VS}/\text{TS}$.

Como a distância Terra-Sol (TS) é a UA vem, pela definição de *seno* feita na legenda da Figura 16:

$$\text{sen } \theta = \text{VS}/1\text{UA} \quad \Rightarrow \quad \text{sen } (46.054^\circ) = 0.72 = \text{VS}/1\text{UA} \quad \Rightarrow \quad \text{VS} = 0.72 \text{ UA}$$

para a distância Vénus-Sol. Claro que a distância Terra-Vénus (TV) vale $\text{TV} = 1 - 0.72 = 0.28 \text{ UA}$.

3.4.2 Medições de um trânsito de Vénus

Como vimos na Figura 15 e na Secção 3.1, o Trânsito de Vénus permite determinar a *paralaxe* do Sol. Precisamos de pelo menos dois observadores bem separados na Terra (no sentido norte-sul) como ilustra a Figura 17.

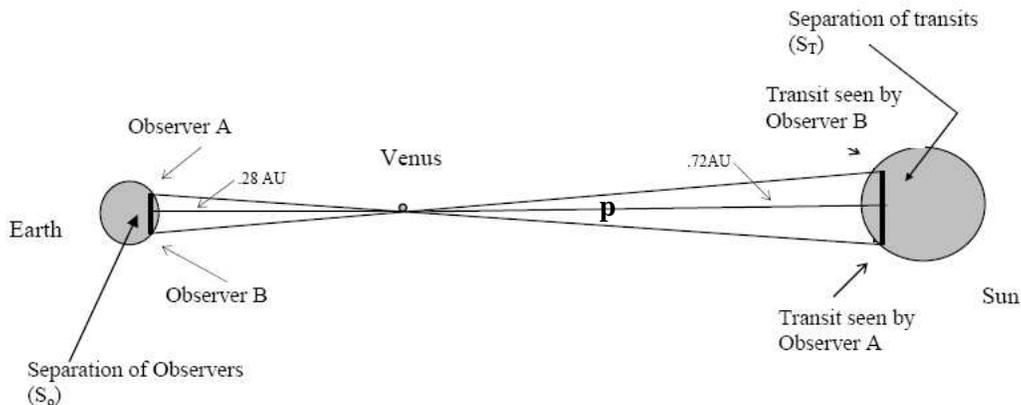


Figura 17[3] Conhecendo a separação de dois observadores na Terra (S_0) e à custa da separação dos percursos dos trânsitos medidos pelos dois observadores (S_T) conseguimos aplicar trigonometria para determinar o valor da *paralaxe* (p).

Os quatro instantes de contacto medidos (Método de Halley) definem um percurso para Vénus para cada observador. A *distância angular* entre estes percursos é a *paralaxe* p . Para a medir aproximadamente: i) usamos instrumentos apropriados (e.g. uma CCD tem o tamanho angular dos pixeis bem definido, assim que conhecemos a montagem observacional; basta, então, ver quantos pixeis separam os dois trajectos, após as sobrepor cuidadosamente); ii) sobreposmos as imagens (e.g. fotografias) e medimos o afastamento dos trajectos em relação ao diâmetro do Sol (conhecido há séculos como cerca de 0.5°).

No entanto, a ideia da medição dos instantes de contacto é permitir conhecer bem mais precisamente a separação angular entre os percursos (logo, a paralaxe). De facto, se sobrepuermos sobre um Sol com a mesma orientação (c.f. Figura 13) as imagens de Vénus tiradas no *mesmo instante* por dois observadores, medimos a paralaxe com exactidão (Figura 18), especialmente repetindo este exercício para tantos instantes simultâneos quanto possível.

3.4.3 Medições da separação linear entre observadores na Terra (S_0)

Consideremos a Figura 19. Mesmo que não haja simetria dos locais em relação ao equador podemos tirar facilmente S_0 (via triângulos rectângulos)^k:

^k Estamos, claro, a assumir que a longitude dos locais é irrelevante e, portanto, que o plano que contém os observadores, o centro de Vénus e o centro do Sol é o mesmo. Ainda, assumimos que a recta que une os centros da Terra, Vénus e do Sol intersecta S_0 no seu ponto médio.

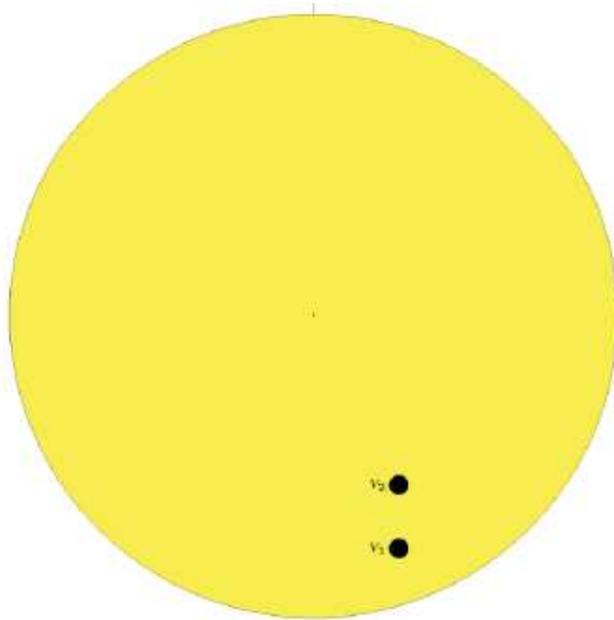


Figura 18[14]. Após as fundamentais correções (rotação para a mesma orientação; união dos centros solares; normalizar o Sol para o mesmo tamanho), duas imagens do trânsito de Vénus tiradas *exactamente* no mesmo instante por observadores separados e que se sobreponham, permitem estimar a paralaxe (p) pela distância angular entre as duas imagens (percursos de Vénus).

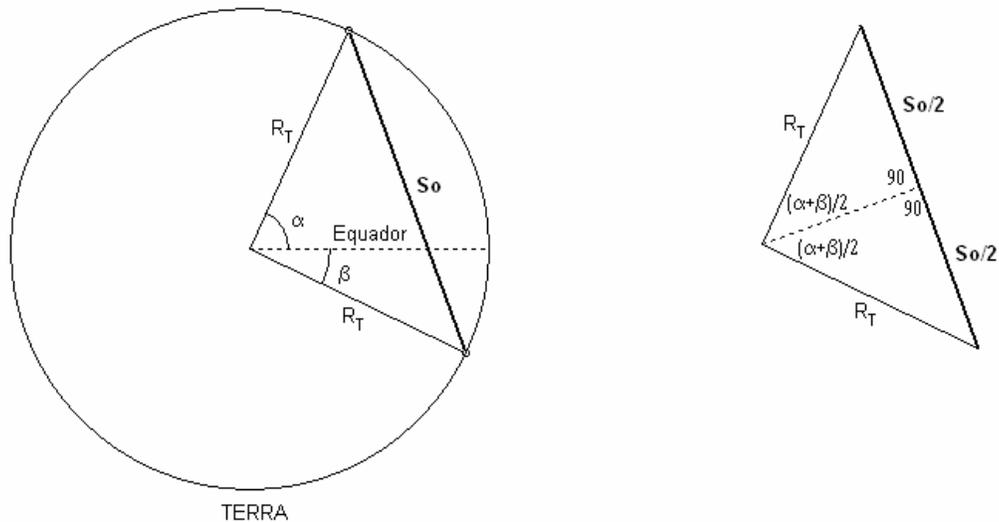


Figura 19. Conhecendo os ângulos α e β (a partir das latitudes dos lugares) e o raio da Terra, R_T , conseguimos determinar S_0 . Note-se que os dois observadores estão sempre em Hemisférios diferentes, neste trabalho.

$$\text{Sen } [(\alpha+\beta)/2] = (S_0/2) / R_T \Rightarrow S_0 = 2R_T \text{ Sen } [(\alpha+\beta)/2]$$

3.4.4 Obtenção de S_T em km

Os triângulos definidos: i) pelos dois observadores na Terra vs. Vénus; ii) pela separação entre os percursos dos trânsitos que ambos viram sobre o Sol vs. Vénus; são ditos *semelhantes* (Figura 17) e temos:

$$S_o / 0.28UA = S_T / 0.72UA \Rightarrow S_T = 2.57 S_o$$

Assim, combinando com o resultado de 3.4.3:

$$S_T = 5.14 R_T \text{ Sen } [(\alpha+\beta)/2]$$

3.4.5 A Unidade Astronómica

Finalmente, fazendo a separação do triângulo isósceles da Figura 17 em dois triângulos rectângulos, como fizemos na Figura 19 (ver Figura 20), obtemos:

$$\text{Tan } (p/2) = (S_T/2) / 0.72UA \Rightarrow 1 \text{ UA} = 0.69 S_T / \text{tan } (p/2)$$

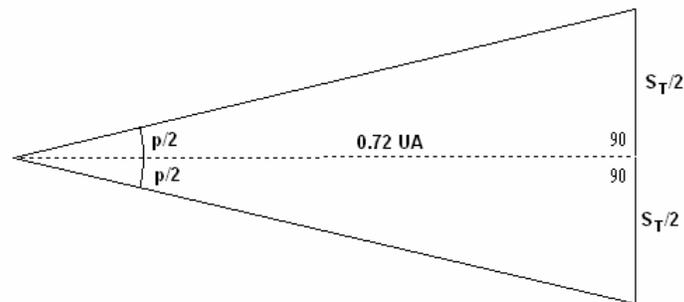


Figura 20. Podemos dividir qualquer triângulo isósceles em dois triângulos rectângulos (c.f. Figura 21).

Agora, aplicando o resultado para S_T de 3.4.4 vem, finalmente:

$$1 \text{ UA} = 3.55 R_T \text{ Sen } [(\alpha+\beta)/2] / \text{tan } (p/2)$$

4 – Medições do Trânsito de 2004

Devido à hora em que ocorreu (entre as 6:13 e 12:26¹, hora de verão em Portugal; os segundo e terceiro contacto tiveram lugar às 6:33 e 12:06, respectivamente – Figura 13), as regiões do mundo onde foi possível observar o trânsito por inteiro situaram-se na Europa (incluindo quase todo Portugal continental), Ásia, África e Austrália. No entanto, da Madeira e Açores só foi possível observar os dois últimos contactos, uma vez que Sol não nasceu cedo o suficiente – Figura 22.

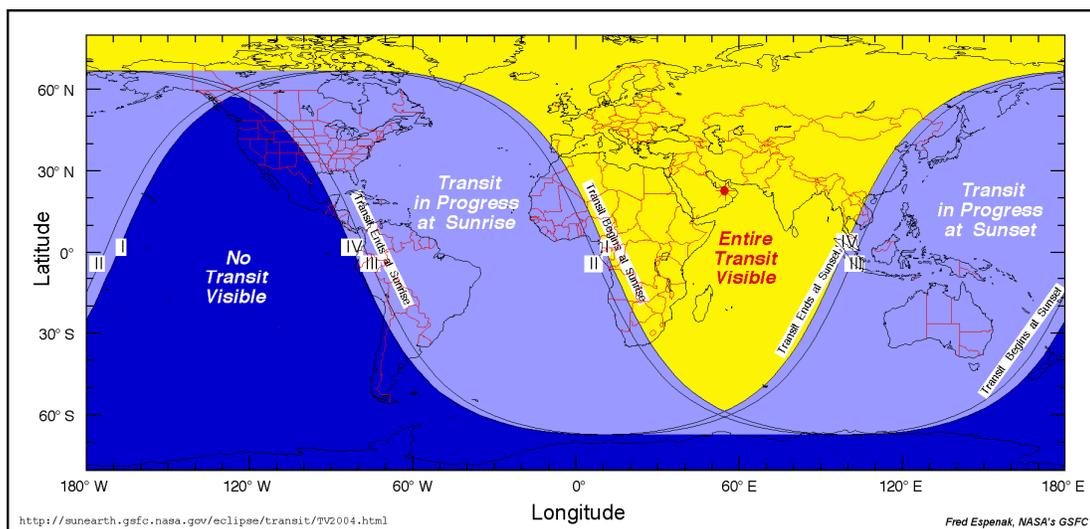


Figura 22[3]. A visibilidade mundial do trânsito de Vénus de 8 de Junho de 2004. Só na região amarela foi o trânsito visível na totalidade (quatro pontos de contacto – incluiu quase todo o continente português). Na região azul escura nada se vê, enquanto na azul clara (incluindo a Madeira e os Açores) foi possível ver dois pontos de contacto.

Claro que as técnicas de hoje em dia, mesmo ao dispor de não-profissionais, são muito mais avançadas do que as dos profissionais dos séculos passados. Recorre-se ao GPS para medir a localização exacta dos locais onde fizeram as medições, bem como se poder recorrer a emissões de onda curta com o tempo exacto. No entanto, devido à turbulência atmosférica e outros fenómenos, nunca se conseguirá medir o tempo com mais exactidão do que alguns segundos (ou seja, insuficiente para a medição da UA com a precisão que Halley ambicionou – Secção 3.2).

¹ De facto, estes tempos são calculados para um observador no centro da Terra. Os valores medidos nos vários locais da Terra podem diferir até 7 minutos. São estas diferenças que permitem a medição da UA.

Há, ainda, uma explicação adicional sobre o facto das imagens obtidas em diferentes locais do mundo e ao longo do trânsito terem Vénus em locais diferentes do disco solar (i.e. Vénus não fez sempre o percurso linear esperado). A questão é que a *orientação* do disco solar muda de local para local (ver Figura 13) e ao longo do dia, caso não se compense (neste último caso devem-se usar montagens equatoriais que se movimentam segundo um eixo paralelo ao equador terrestre).

A recente campanha mundial junto do público para estimar a Unidade Astronómica a propósito do trânsito de 2004 (VT-2004 – [1]) teve os seguintes resultados: 1510 grupos de trabalho mediram 4550 instantes de contacto. Como resultado, conseguiu-se medir a UA com a fantástica precisão de 0.008% (e erro, em relação ao valor definido, de 0.007%):

$$149608708 \pm 11835\text{km}$$

5 - Bibliografia

- [1] www.vt-2004.org
- [2] Boffin, H., West, R. (Dec 2004), *The Messenger*, vol.118, p.69.
- [3] sunearth.gsfc.nasa.gov/sunearthday/2004/
- [4] Boffin, H., West, R. (Jun 2004), *The Messenger*, vol.116, p.39.
- [5] West, R., Boffin, H.M.J. (Mar 2004), *The Messenger*, vol.115, p.49.
- [6] Krupp, E.C. (Jun 2004), *Sky & Telescope*, vol.107, n°6, p.48.
- [7] Westfall, J. (Jun 2004), *Sky & Telescope*, vol.107, n°6, p.73.
- [8] Gingerich, O. (Jun 2004), *Sky & Telescope*, vol.107, n°6, p.78.
- [9] Sinnott, R.W. (Jun 2004), *Sky & Telescope*, vol.107, n°6, p.79.
- [10] Gingerich, O. (Jun 2004), *Sky & Telescope*, vol.107, n°6, p.108.
- [11] Sheehan, W. (Mai 2004), *Sky & Telescope*, vol.107, n°5, p.33.
- [12] Aguirre, E.L. (Mai 2004), *Sky & Telescope*, vol.107, n°5, p.137.
- [13] Sheehan, W. (Fev 2004), *Sky & Telescope*, vol.107, n°2, p.47.
- [14] Backhaus, U. (2005), “The Transit of Venus 2004”, Univ. of Duisburg-Essen (Alemanha)
- [15] Mignard, F. (2004), “The solar parallax with the transit of Venus” (v.4.1), Observatoire de La Côte d’Azur (França)
- [16] Green C., Cook J. (1771), *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Vol.61, page 410
- [17] Dick S. J. (2004), *Proceedings of the IAU Colloquium No. 196, 2004*, D. W. Kurtz ed., p.100
- [18] Orchiston W., 2004, *Proceedings of the IAU Colloquium No. 196, 2004*, D. W. Kurtz ed., p.52
- [19] Pogge R., 2004, *How far to the Sun?, The Venus transits of 1761 & 1769*, Ohio State University, (www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Ast161/Unit4/venussun.html)
- [20] Wharton, W. J. L. 1893, *Captain Cook's journal during the first voyage round the world made in H. M. bark Endeavour 1768-71*, A literal transcription of the original MSS with notes and introduction edited by Captain W. J. L. Wharton, R.N., F.R.S., London.
- [21] Nautical Almanac Office, http://www.nao.rl.ac.uk/nao/transit/V_1769/