31/8/2006

INDAGINE SUI SITI DI MEDICINA E NOTO PER UN LORO UTILIZZO NELLA BANDA 90GHz (3mm)

A. Orfei

Rapporto Interno IRA 393/06

D:/Didattica/Teoria/Atmosfera/IRA393_06MedNoto90GHz.doc

INDICE

Indice delle tabelle e delle figure

1. Introduzione **pag. 3**

2. Scienza nella banda dei 90GHz **pag. 4**
2.1 Campi di ricerca a 3mm **pag. 4**
2.2 Richieste osservative a livello internazionale **pag. 4**
2.3 Radiotelescopi nella banda 3 mm **pag. 5**

3. Breve sommario della teoria dell'assorbimento atmosferico **pag. 6**
3.1 L'attenuazione atmosferica **pag. 8**
3.2 Temperatura di rumore dovuta all'atmosfera **pag. 8**

4. I radiotelescopi mm e submm esistenti **pag. 9**
4.1 Elenco e caratteristiche **pag. 9**
4.2 Valori di opacità nei vari siti **pag. 9**
4.3 Considerazioni **pag. 13**

5. I siti di Medicina e Noto **pag. 14**
5.1 Meteo e colonna di vapor d'acqua: serie storiche **pag. 14**
5.2 Valori stagionali di opacità a Medicina e Noto **pag. 20**

6. Prestazioni di Medicina e Noto a 3mm in termini di sensibilità **pag. 21**

7. Confronto di prestazioni tra telescopi operanti nella banda 3mm **pag. 23**

8. Conclusioni **pag. 24**

Ringraziamenti **pag. 24**

9. Riferimenti **pag. 25**

INDICE delle TABELLE e delle FIGURE

-Tab. 2.3.1 I radiotelescopi nella banda 3mm
-Fig. 3.1 Tipico grafico del coefficiente di attenuazione atmosferica
-Tab. 3.1 Coefficiente d'assorbimento K per diversi valori di densità di vapor d'acqua alla superficie
-Tab. 3.2a Valori di opacità τ_o a livello del mare ottenuti usando ATM, 10°C
-Tab. 3.2b Valori di opacità τ_o a livello del mare ottenuti usando ATM, 20°C
-Tab. 3.2c Valori di opacità τ_o a livello del mare ottenuti usando ATM, -5°C
-Tab. 3.2d Valori di opacità τ_o a livello del mare ottenuti usando ATM, 30°C
-Fig. 4.2.1 Measured opacity at 22GHz-band at the VLA (via TIP scans) compared with estimated precipitable water over the years 1995,1996,1997.
-Fig. 4.2.2 Measured opacity at 43GHz-band at the VLA (via TIP scans) compared with estimated precipitable water over the years 1995,1996,1997
-Fig. 4.2.3 Measured opacity at 225GHz-band at the KP compared with estimated precipitable water over the years 1997,1998
-Tab. 4.2.1: Precipitable Water at the KP and VLA Sites
-Fig. 4.2.4 % di tempo osservativo a diversi valori di opacità a 250GHz (Pico Veleta)
-Fig.4.2.5 Valori annuali di τ_o a 225GHz al Heinrich Hertz Telescope
-Fig. 4.2.6 Esempio di valori di τ_o a 225GHz per % di tempo osservativo al JCMT
-Tab. 4.2.2 Overview of the JCMT Telescope and Atmospheric Parameters
-Fig. 5.1.1 PWV Medicina anno 2002
-Fig. 5.1.2 PWV Medicina anno 2003
-Fig. 5.1.3 PWV Medicina anno 2004
-Fig. 5.1.4 PWV Medicina anno 2005
-Fig. 5.1.5 PWV Medicina anno 2006
-Fig. 5.1.6 PWV osservato dalle radiosonde e dal VLBI per la stazione di Medicina
-Fig. 5.1.7 ZWD dal 1987 al 2005 per la stazione di Medicina
-Fig. 5.1.8 ZWD dal 1989 al 2005 per la stazione di Noto
-Fig. 5.1.9: PWV valutato da osservazioni VLBI per la stazione di Noto, solo inverni.
-Fig. 5.1.10 correlazione τ_o–PWV a Medicina a 22GHz
-Tab. 5.1.1 N.ro di giorni in inverno per cui PWV≤10mm a Medicina
-Tab. 5.1.2 Esempio di variazione giornaliera di τ_o, Medicina 30/5/2006
-Tab. 7.1 Confronto di prestazioni a 90 GHz tra vari telescopi

1. INTRODUZIONE

I siti di Medicina e Noto hanno da tempo agito nella direzione di allargare le potenzialità osservative oltre le frequenze per cui le antenne vennero in origine progettate.
Sebbene entrambe lavorino proficuamente fino a 22GHz, sia come singola antenna sia partecipando alle reti VLBI, una estensione fino alla banda dei 90 GHz (3 mm) farebbe fare un notevole salto di qualità ad ambedue le stazioni in termini di produttività scientifica in campi che, anche dal punto di vista internazionale, non vedono tuttora la partecipazione di molte antenne per un prolungato periodo osservativo annuale.
Ciò è tanto più vero in quanto si stanno anche sviluppando entro l'Istituto di Radioastronomia ricevitori di nuova generazione, non solo in termini di prestazioni allo stato dell'arte, ma anche sposando la tecnica multifeed. Si tratta di ricevitori capaci di osservare più pixel contemporaneamente e quindi in grado di velocizzare, rispetto al tradizionale uso monoricevitore, la produzione di mappe. Inoltre essi possono essere usati per valutare ed eliminare il contributo atmosferico con la tecnica beam-switching.

Un primo passo è stato compiuto a Noto con l'installazione nel 2001-2002 della superficie attiva, assieme a pannelli dello specchio primario di accuratezza notevolmente migliore rispetto alla costruzione originaria (1988). Ora l'antenna ha esteso la sua possibilità osservativa a 43GHz.

Un secondo passo è stato la produzione di pannelli ulteriormente migliorati (questa volta sia per lo specchio primario che secondario) per la nuova antenna SRT (Sardinia Radiotelescope), pannelli che alla data di questo rapporto tecnico sono stati consegnati e misurati, e una nuova versione di superficie attiva, attualmente in fase di test, specifica per questa nuova grande antenna.

Un terzo passo dovrà consistere nell'approfondimento di conoscenze in tecniche di allineamento per riuscire a raggiungere prestazioni paragonabili al grado di accuratezza costruttiva dei pannelli (dell'ordine di 50 micron): una prima esperienza è stata appunto l'installazione di Noto, in cui si sono usate sia tecniche con teodolite sia fotogrammetriche; sono attualmente in corso esperienze con la olografia.

Il quarto passo essenziale è concludere questa successione di miglioramenti aggiungendo all'elenco delle antenne capaci di lavorare fino a 100GHz anche l'antenna di Medicina, che potrà quindi approfittare delle esperienze maturate sulle altre due antenne, così come Noto e SRT hanno approfittato per questi upgrade della esperienza e delle nuove conoscenze che i tecnici di Medicina hanno consolidato negli anni su quest'ultimo radiotelescopio.

Una obiezione che si muove alla richiesta di portare le antenne di Medicina e Noto a poter lavorare con sufficiente sensibilità nella banda dei 3mm è che entrambi i siti non furono originariamente scelti in altura, zona ove normalmente vengono eretti i telescopi millimetrici e submillimetrici, e quindi l'opacità dell'atmosfera a livello del mare renderebbe inutilizzabile (ma per esempio il radiotelescopio di Onsala è alivello del mare), sia come entità di attenuazione del segnale che come quantità di giorni utili, il lavoro di miglioramento.
Questo rapporto tecnico, sulla base di dati ai siti dei due radiotelescopi, sulla base del confronto con la filosofia di lavoro usata ai vari siti millimetrici e submillimetrici, sulla base di stime attendibili di opacità, ottenibili in vari modi, e sulla base della conseguente stima di prestazione in termini di sensibilità delle antenne ristrutturate, vuole mostrare come Medicina e Noto possono invece benissimo estendere la loro gamma di frequenze fino a 90GHz divenendo un potente strumento osservativo, in grado di competere con altri telescopi in grado di osservare a 3mm.

2. SCIENZA nella BANDA dei 90 GHz

2.1 Campi di ricerca a 3mm

I campi di ricerca in questa banda di frequenza sono molto vasti e coprono tutti gli osservabili in single-dish (continuo, spettroscopia, polarimetria) ed interferometria ad altissima risoluzione (VLBI).

Nel continuo
la banda 3mm aggiunge una frequenza per poter valutare lo spettro di emissione Blazar (Blazar monitoring) e comprendere le cause della loro forte variabilità. Gli studi di variabilità multifrequenza forniscono importanti indizi sulla dimensione, struttura e dinamica della loro regione irradiante.
Permette lo sviluppo di survey extragalattiche che se effettuate su larghe porzioni di cielo e a varie frequenze (per esempio da 1GHz fino al millimetrico) può avere notevole impatto astrofisico su problematiche molto attuali, quali:

- campionamento di classi di sorgenti a spettro piatto, ad esempio FSRQ (flat-spectrum radio quasars) e BL Lacs
- classi di nuove sorgenti con forte autoassorbimento di sincrotrone o free-free, quali GPS (extreme GHz Peaked Spectrum) o HFP (High-Frequency Peakers). AGN che si trovano nelle tarde fasi di evoluzione o evoluzione iniziale dei "radio afterglows" di gamma-ray bursts (GRB)
- indagine dell'effetto SZ (Sunyaev-Zeldovich) in cluster di galassie distanti, tramite cui favorire la comprensione della formazione delle strutture a larga scala e del riscaldamento del mezzo intergalattico.

In polarimetria
90 GHz costituisce probabilmente la frequenza più interessante, nel radio, per ciò che concerne studi della parte polarizzata della CMB, in quanto la contaminazione del "foreground" è al minimo.

In spettroscopia
le applicazioni sono innumerevoli, dalla valutazione del mezzo interstellare in zone di formazione stellare giovane di bassa e alta massa, alla rivelazione di una quantità notevolissima di molecole (DCO^+, N_2D^+, CO, HC_3N, HCO^+, N_2H^+, CS, SO,...) usate come traccianti per la cinematica di core ad alta densità molecolare, all'evoluzione di protostelle di bassa massa e allo studio di emissioni maser (SiO, OH, H_2CO, CH_3OH,...), così come lo studio dell'ambiente fisico di gas da oggetti ad alto z (CO).

2.2 Richieste osservative a livello internazionale

Tra i telescopi già attivi, oltre a lavorare single-dish, P. Veleta, Effelsberg, VLBA, Metsahovi, Onsala, (oltre all'interferometro Plateau de Bure) si riuniscono a formare quello che inizialmente era chiamato CMVA (Coordinated Millimeter VLBI Array), che ora ha preso il nome di "Global 3mm VLBI Array". Tale rete ha la necessità di allargare il numero di telescopi tanto che il consorzio considera come prossimi candidati GBT, Noto, Yebes.
La rete millimetrica VLBI consente la maggiore risoluzione angolare (tipicamente fino a 50-70 microarcosecondi) fino a quando la tecnica space-VLBI consentirà di osservare a lunghezze d'onda ben minori di quanto finora ottenuto (18 e 6cm).
La prossima generazione di satelliti space-VLBI promette infatti osservazioni fino a 7mm e pertanto occorre che i telescopi a terra siano pronti anche per questa opportunità.
Il mm-VLBI ha un altro vantaggio: in questa banda è possibile studiare emissioni in regioni che sono invisibili a più lunghe lunghezze d'onda a causa dell'autoassorbimento; ciò ha importanti

conseguenze per la conoscenza dei processi nei AGN (Active Galactic Nuclei) e nelle vicinanze di Buchi Neri supermassicci.
Il Global mm-VLBI consente di avere immagini dirette di radiosorgenti compatte, sia galattiche che extragalattiche, con una risoluzione finora non eguagliata da altri metodi osservativi.

La Corea del Sud sta installando una sua rete VLBI che lavorerà alle frequenze di 22,43,86,129GHz il cui inizio è previsto per il 2008. Questo paese entrerà dunque a far parte della rete mondiale, millimetrica e non. In particolare si sta pensando all'utilizzo delle frequenze più alte anche per una migliore valutazione del ICRF (International Celestial Reference Frame) e per studi di relatività generale (in quanto sarebbe possibile osservare sorgenti angolarmente molto più vicine al Sole).

Pico Veleta riserva un massimo di richieste a 3mm nel periodo *estivo*, dove la quantità di acqua precipitabile (PWV) è valutata la peggiore dell'anno e ammonta a un valore intorno ai 10mm (riservando i periodi migliori a richieste osservative a più alte frequenze). Nel prosieguo di questo rapporto si mostrerà come questo valore si verifica nei mesi *invernali* nei siti di Medicina e Noto, pertanto potenzialmente ponendosi come scelta alternativa e/o complementare.

2.3 Radiotelescopi nella banda 3mm

Di seguito viene riportato un elenco dei telescopi che già lavorano nella banda 90 GHz (in verde), assieme a quelli che più o meno a breve sono previsti aggiungersi (in rosso). Si allega anche il diametro dell'antenna, la banda a radiofrequenza del ricevitore, quella istantanea e la prestazione in termini di temperatura di rumore (non per tutte si è reperito il valore di temperatura di sistema)

RADIOTELESCOPIO	D(m)	Banda (GHz)	IF Bandwidth (GHz)	Tsys (^{o}K)
Pico Veleta (IRAM)	30	80-115	0.5	120
Effelsberg (MPIfR)	80	84-96	2	150-170
Onsala (Chalmers Un.)	20	84-116	1.2	250
Haystack (MIT)	37	82-116	0.6	200-400
FCRAO (UMASS)	14	85-115	15	50-80 Tric
VLBA (NRAO)	25	80-90	0.5	100
Sest (Chalmers Un.) (*)	15	78-116	1	100-180 Tric
Metsahovi (Helsinki Un.)	14	80-115	0.5	150
Nobeyama (NRO)	45	82-116	1	200-400
Nobeyama (NRO)	10	85-116	1	200-500
ATCA (CSIRO)	22	85-105	0.128	250-450
GBT (NRAO)	100			
Yebes (OAN)	40			
ALMA (US/EU)	12			
LMT (UMASS)	50			
CARMA (US Un.s)	6.1/10.4			
Noto (INAF)	32			
SRT (INAF)	64			

Tab. 2.3.1 I radiotelescopi nella banda 3mm

(*) Sostituito ora da APEX, una antenna singola ancora di 15m di diametro

3. BREVE SOMMARIO della TEORIA dell'ASSORBIMENTO ATMOSFERICO

Sono due le cause principali che determinano l'attenuazione atmosferica del segnale radio, l'assorbimento sulle righe dell'O_2 (per ciò che ci riguarda gli effetti delle code della riga a 60GHz) e il contenuto di vapor d'acqua. Ciascuno è descritto dal relativo *"Coefficiente di assorbimento"*, espresso in dB/Km che è una funzione molto complicata sia della frequenza che della quota. L'attenuazione complessiva è principalmente data dalla somma dei due coefficienti

$$K = K_{oss}+K_{acqua} \tag{3.1}$$

Infine l'integrale sulla quota della funzione K fornisce l'opacità dell'atmosfera τ_o allo zenith, che è il parametro direttamente usato in ambito osservativo per valutare gli effetti atmosferici. Si ha cioè

$$\tau_o = \int_0^\infty K(\upsilon, z)dz \tag{3.2}$$

Il valore di K, una volta fissata la frequenza, è funzione della distribuzione con la quota della Temperatura T(z), della Pressione P(z) e della colonna di vapor d'acqua $\rho(z)$. Organismi internazionali hanno definito *atmosfere standard*, cioè effettive funzioni delle tre grandezze, derivate da misure atmosferiche da sonde. Da queste, vari algoritmi sono stati sviluppati per calcolare, data la frequenza e parametri meteo valutati alla superficie del sito dell'antenna, K o τ_o. I più usati sono la routine MPM (Microwave Propagation Model) e ATM (Atmospheric Transmission at Microwave) dell'IRAM.
Di seguito si fornisce un grafico tipico di K(ν), ottenuto con MPM e valido per una combinazione meteo al livello del mare, e una tabella dove vengono riportati esplicitamente i coefficienti K, K_{oss}, K_{acqua} a 22, 40, 90GHz per diversi valori di ρ_o (densità di vapor d'acqua alla superficie).

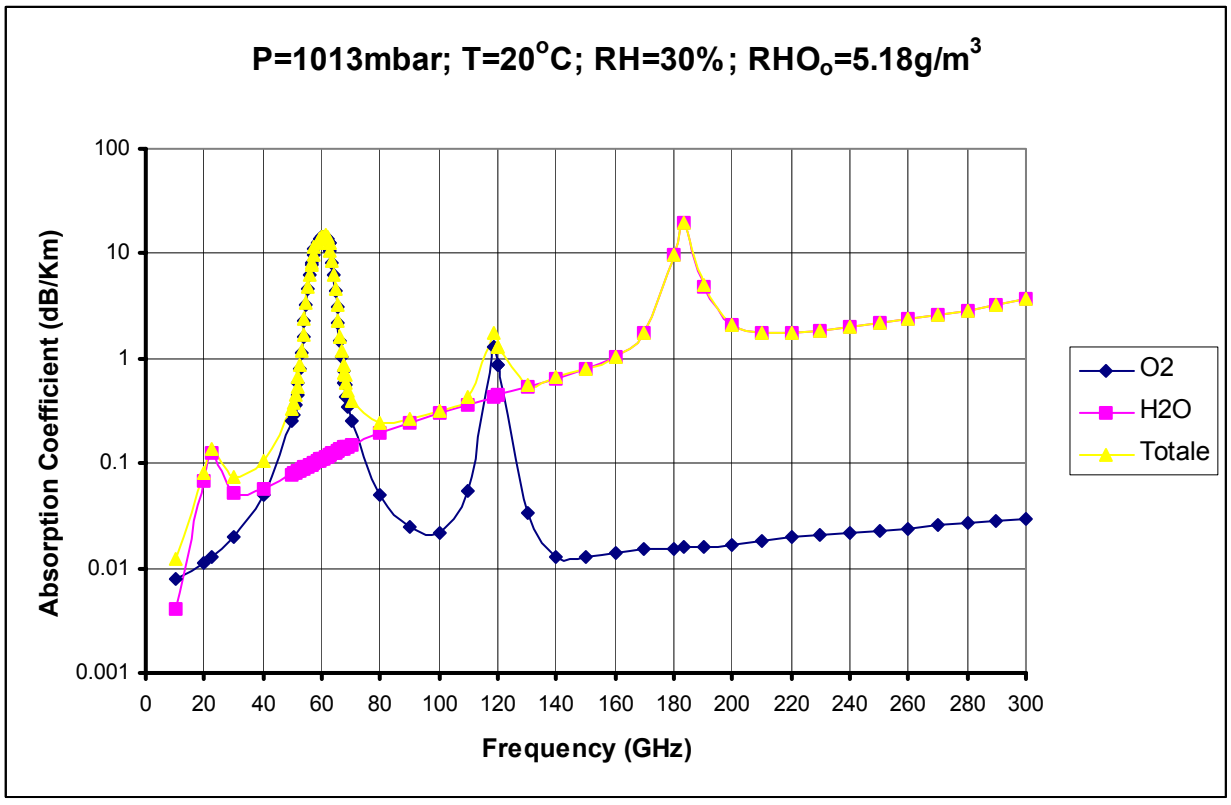

Fig. 3.1 Tipico grafico del coefficiente di attenuazione atmosferica

ρ_o(g/m^3)	2.82			7.26			13.82		
ν(GHz)	22.235	40	90	22.235	40	90	22.235	40	90
K(dB/Km)	0.083	0.086	0.168	0.188	0.132	0.385	0.345	0.231	0.836
K_{oss}(dB(Km)	0.014	0.054	0.029	0.013	0.048	0.025	0.012	0.048	0.025
K_{acqua}(dB/Km)	0.069	0.032	0.139	0.176	0.083	0.36	0.333	0.183	0.811

Tab. 3.1 Coefficiente d'assorbimento K per diversi valori di densità di vapor d'acqua alla superficie

Relativamente al valore di K si può ottenere τ_o usando ATM, un esempio sono le tabelle 3.2a,b,c,d sotto riportate (in blu e corsivo valori relativi a PWV≤10mm).

P = 1013 mbar T = 283 K			
	U = 80%	U = 50%	U = 30%
ρ_o-PWV	7.5 g/m^3 – 15 mm	4.6 g/m^3 – *9.2 mm*	2.8 g/m^3 – *5.6 mm*
22GHz	0.12	*0.08*	*0.054*
44 GHz	0.14	*0.12*	*0.113*
90 GHz	0.24	*0.17*	*0.125*

Tab. 3.2a Valori di opacità τ_o a livello del mare ottenuti usando ATM, 10°C

P = 1013 mbar T = 293 K			
	U = 80%	U = 50%	U = 30%
ρ_o-PWV	14 g/m^3 – 28 mm	8.6 g/m^3 – 17.2 mm	5.1 g/m^3 – *10.2 mm*
22GHz	0.21	0.135	*0.084*
44 GHz	0.166	0.136	*0.117*
90 GHz	0.37	0.246	*0.166*

Tab. 3.2b Valori di opacità τ_o a livello del mare ottenuti usando ATM, 20°C

P = 1013 mbar T = 268 K			
	U = 80%	U = 50%	U = 30%
ρ_o-PWV	2.7 g/m^3 – 5.4 mm	1.7g/m^3 – 3.4 mm	1 g/m^3 – 2 mm
22GHz	*0.054*	*0.04*	*0.03*
44 GHz	*0.127*	*0.121*	*0.116*
90 GHz	*0.140*	*0.113*	*0.094*

Tab. 3.2c Valori di opacità τ_o a livello del mare ottenuti usando ATM, -5°C

P = 1013 mbar T = 303 K			
	U = 80%	U = 50%	U = 30%
ρ_o-PWV	24 g/m^3 – 48 mm	15g/m^3 – 30 mm	9 g/m^3 – 18 mm
22GHz	0.34	0.22	0.127
44 GHz	0.207	0.16	0.129
90 GHz	0.55	0.36	0.24

Tab. 3.2d Valori di opacità τ_o a livello del mare ottenuti usando ATM, 30°C

Oppure, in prima approssimazione ma col vantaggio di essere immediato, si può ottenere

$$\tau_o = 0.2302 * K * H \qquad (3.3)$$

ove H=scale height, cioè quell'altitudine a cui si ottiene il 63% del valore di densità di colonna d'acqua rispetto al valore di superficie (in genere si considera H=2Km). Il coefficiente 0.2302 serve per passare da una attenuazione espressa in dB al τ_o normalmente espresso in Neper.

Nelle tabelle 3.2 compare un'altra grandezza espressa in mm, solitamente usata per esprimere la totalità della colonna d'acqua se essa precipitasse tutta a terra. Tale grandezza, che è intercambiabile con la densità di vapor d'acqua alla superficie ρ_o, si chiama PWV (Precipitable Water Vapor) ed è questa la quantità che solitamente i telescopi usano per porla in relazione al corrispondente valore di τ_o.

L'opacità dell'atmosfera influenza le prestazioni del sistema ricevente a terra sotto due aspetti:
- diminuisce il livello di segnale in arrivo, cioè l'atmosfera funge da attenuatore
- in quanto attenuatore l'atmosfera aggiunge temperatura di rumore alla intrinseca temperatura di rumore del sistema ricevente

Nei due paragrafi successivi si quantificherà ognuno dei due effetti.

3.1 L'attenuazione atmosferica

Il segnale proveniente dal cielo è descritto in termini di temperatura di brillanza, tale temperatura viene attenuata dall'atmosfera in direzione zenith dal coefficiente,

$$A = e^{-\tau o} \tag{3.1.1}$$

Per tutte le elevazioni si usa l'espressione

$$A = e^{-\tau o / \cos(90 - El)} \tag{3.1.2}$$

Questo effetto attenuante a tutti gli effetti si aggiunge, in modo moltiplicativo, al valore di guadagno d'antenna diminuendolo, quindi peggiorando la sensibilità. Se ne terrà conto nelle valutazioni che verrano fatte nel capitolo 6.

3.2 Temperatura di rumore dovuta all'atmosfera

Per valutare il contributo di rumore dovuto a un attenuatore vale la classica formula,

$$T_b = Tref(1 - A) = Tref(1 - e^{-\tau o}) \tag{3.2.1}$$

ove normalmente Tref = 290 ^oK, oppure è la effettiva temperatura ambiente.

La (3.2.1) fornisce un valore approssimato in quanto nel caso reale si ha a che fare anche con un elemento direzionale, l'antenna. La temperatura di brillanza è funzione della direzione θ e il rumore captato dall'antenna si ottiene pesando la funzione $T_b(\theta)$ per il diagramma di illuminazione d'antenna. Tuttavia per i nostri scopi è sufficiente l'uso della (3.2.1).
Esiste anche l'effetto della variabilità atmosferica, la quale però a livello osservativo può essere campionata e stimata con la tecnica osservativa detta wobbling (per esempio realizzata muovendo molto velocemente lo specchio secondario al fine di osservare on e off la sorgente).

4. I RADIOTELESCOPI mm e submm ESISTENTI

Allo scopo di valutare la "sensatezza" dell'uso dei telescopi di Medicina e Noto alla frequenza di 90GHz è opportuno dare conto di come si pongono alcuni siti millimetrici e submillimetrici rispetto alle frequenze per cui sono stati progettati e rispetto ai valori tipici di opacità a cui essi lavorano. Lo scopo è mostrare che in definitiva anche questi siti trattano la loro gamma di frequenze di lavoro in maniera simile a come si pongono i siti di Medicina e Noto nel proporre di estenderne l'uso fino alla banda 3mm.

4.1 Elenco e caratteristiche

Vengono considerati i seguenti osservatori, pur non essendo millimetrico viene aggiunto anche il VLA perchè anch'esso prevede miglioramenti in frequenza e perchè fornisce dati interessanti sull'opacità del sito:

	Altitudine(m)	Diametro(m)	Bande usate(GHz)
VLA	2124	25	fino a 43
Kitt Peak	1914	12	68÷180
Pico Veleta	2920	30	80÷281
JCMT	4092	15	150÷870
HHT	3186	10	230÷850

Tabella 4.1.1 Vari siti mm e submm: caratteristiche

4.2 Valori di opacità nei vari siti

Per i siti di cui sopra vengono forniti grafici e tabelle da cui si evince quali sono i valori usuali di PWV e la conseguente opacità a cui i telescopi lavorano.

VLA (Very Large Array)
Due grafici a 22 e 43GHz che pongono in relazione PWV, valutata da parametri meteo, con τ_o:

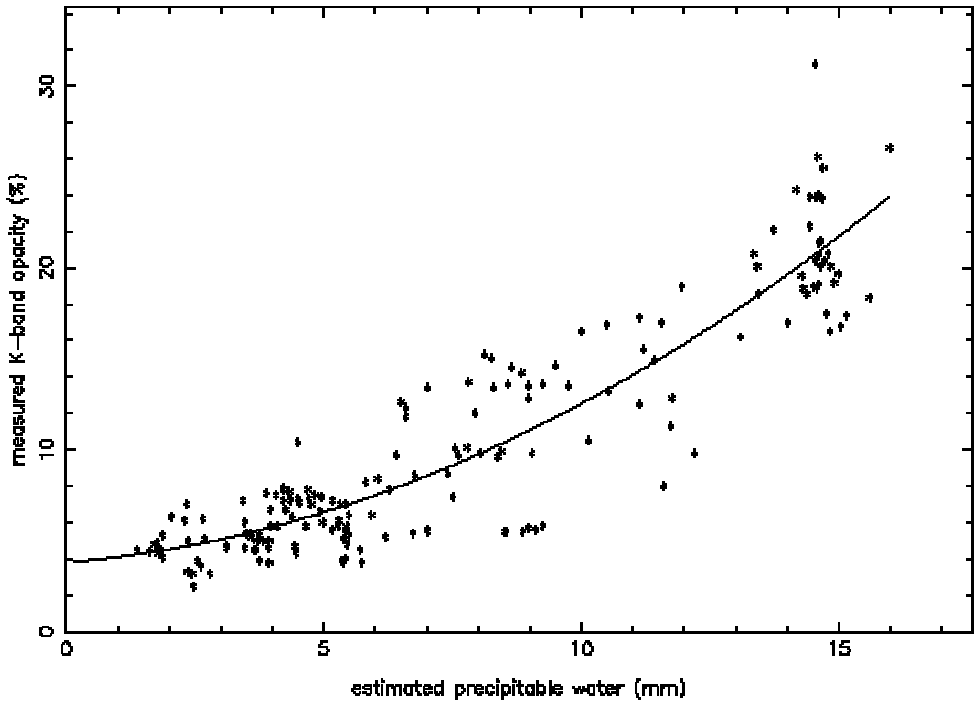

Fig. 4.2.1 Measured opacity at 22GHz-band at the VLA (via TIP scans) compared with estimated precipitable water over the years 1995,1996,1997.

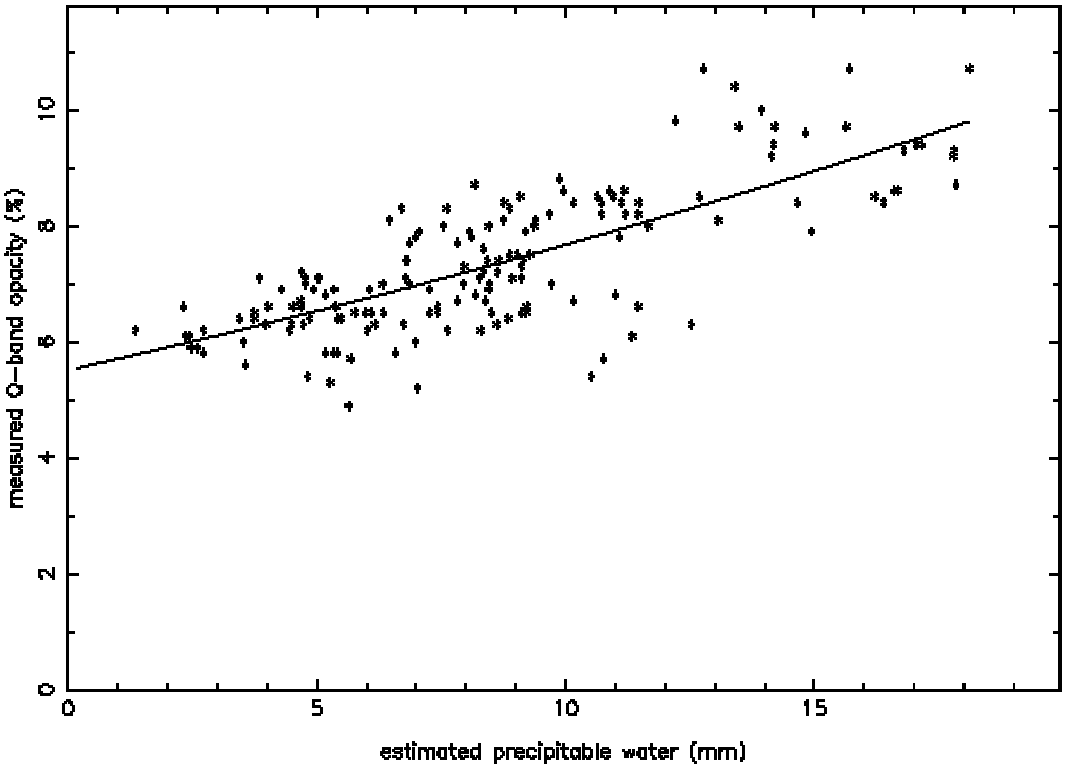

Fig. 4.2.2 Measured opacity at 43GHz-band at the VLA (via TIP scans) compared with estimated precipitable water over the years 1995,1996,1997

Kitt Peak

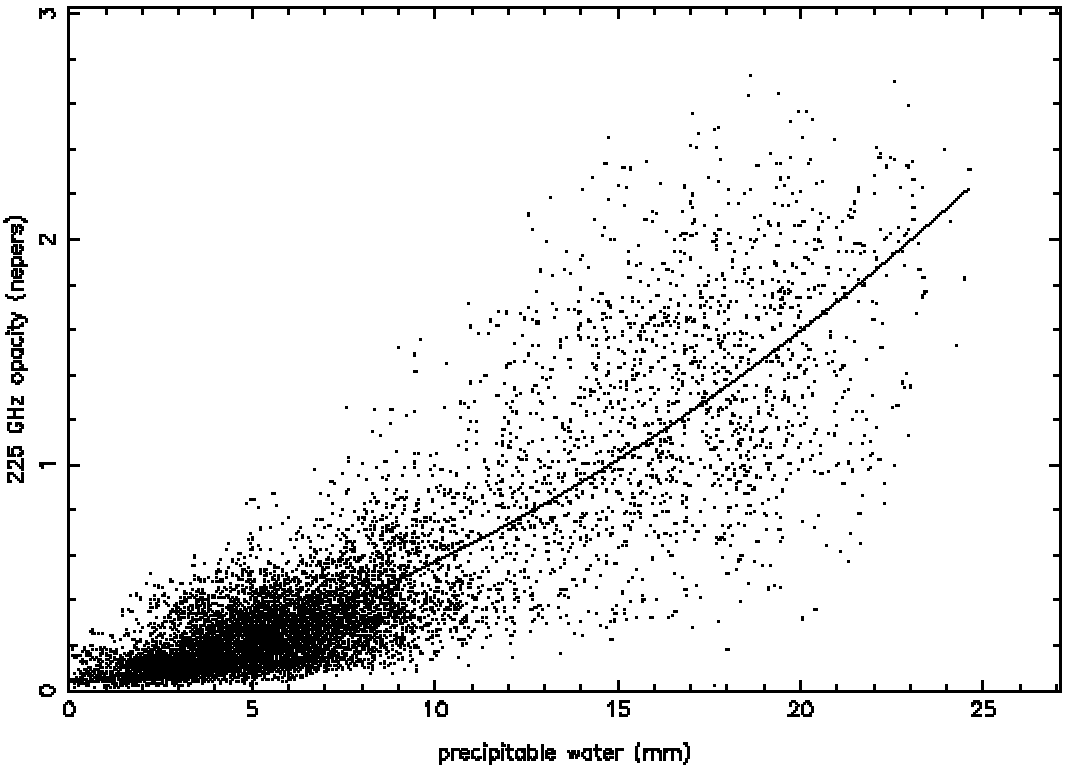

Fig. 4.2.3 Measured opacity at 225GHz-band at the KP compared with estimated precipitable water over the years 1997,1998

Month	KP		VLA	
	50th percentile	10th percentile	50th percentile	10th percentile
Jan	4.0	1.6	4.3	2.7
Feb	5.0	2.1	4.6	3.0
Mar	4.9	2.5	4.4	2.6
Apr	4.5	2.3	4.9	2.9
May	5.9	3.2	6.7	3.5
Jun	6.1	3.5	8.7	4.3
Jul	14.0	5.9	12.9	7.1
Aug	17.0	12.6	14.2	10.3
Sep	13.2	8.2	11.0	6.5
Oct	6.7	3.1	6.2	3.8
Nov	5.1	2.3	4.9	3.0
Dec	4.1	1.5	4.1	2.5

Tab. 4.2.1: Precipitable Water at the KP and VLA Sites

Per quanto riguarda il guadagno d'antenna, da
http://kp12m.as.arizona.edu/12_obs_manual/chapter_3.htm - 3.3_Receivers_
si evince poi che il rapporto tra Guadagno di antenna alla frequenza minima (circa 70GHz) e quello alla frequenza di 145GHz è 1.41.

Pico Veleta

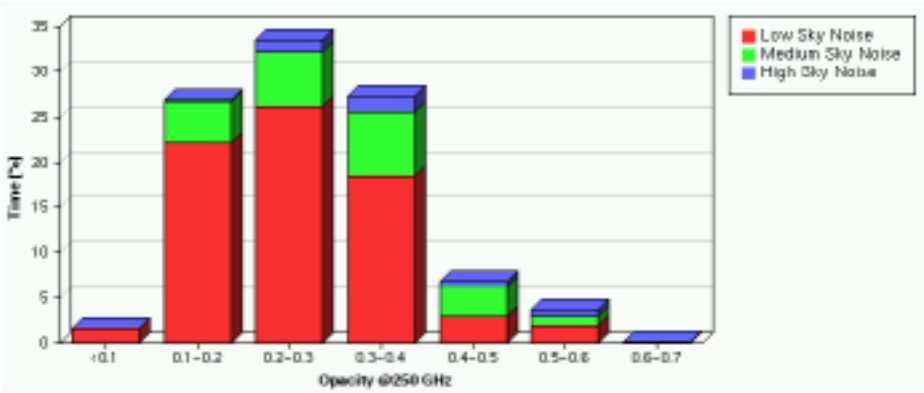

Fig. 4.2.4 % di tempo osservativo a diversi valori di opacità a 250GHz (Pico Veleta)

Da http://www.iram.fr/IRAMES/index.htm
si evince poi che il rapporto tra Guadagno di antenna alla frequenza minima (circa 80GHz) e quello alla frequenza massima di lavoro (280GHz) è 1.73.

HHT (Heinrich Hertz Telescope)

Si riporta un solo grafico relativo al 2004 come esempio; dati 2003, 2002 e di anni precedenti sono del tutto simili.

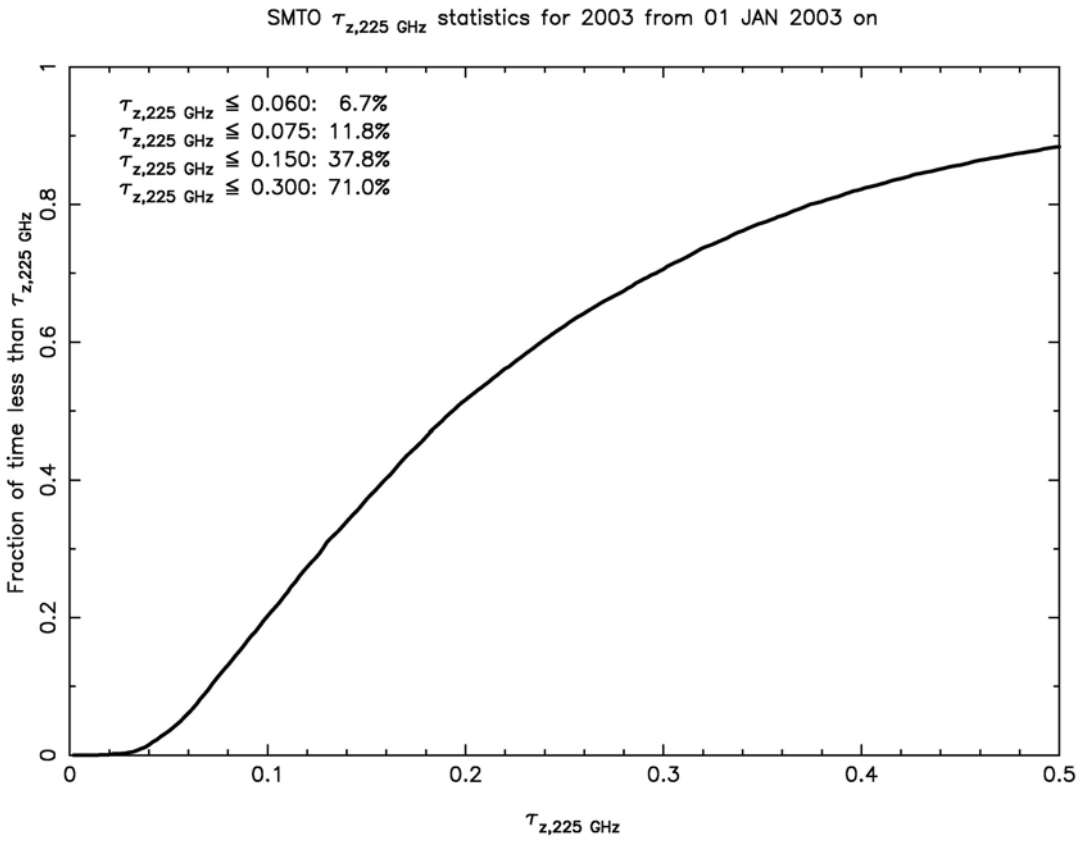

Fig.4.2.5 Valori annuali di τ_o a 225GHz al Heinrich Hertz Telescope

JCMT (James Clerk Maxwell Telescope)

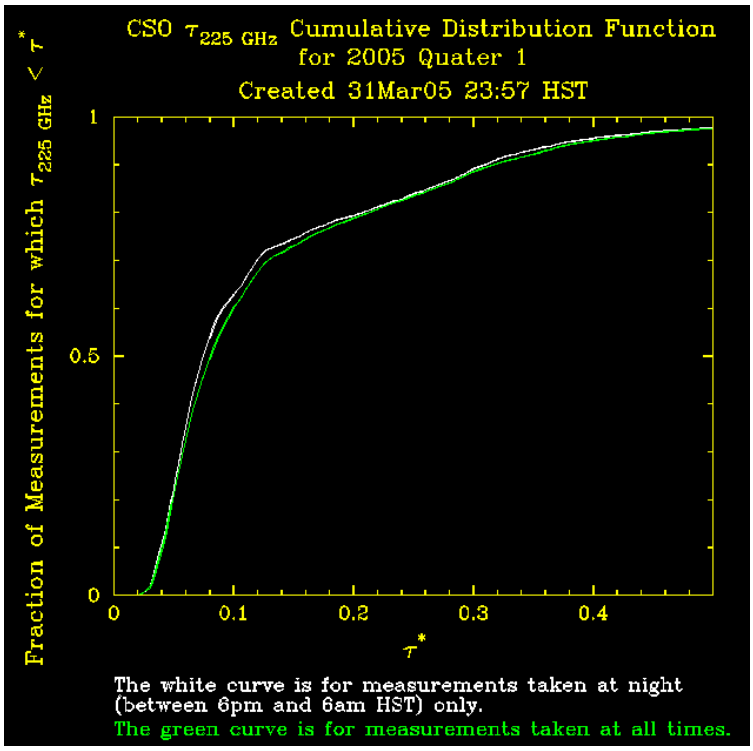

Fig. 4.2.6 Esempio di valori di τ_o a 225GHz per % di tempo osservativo al JCMT

Da http://docs.jach.hawaii.edu/JCMT/OVERVIEW/tel_overview/
si ottiene la tabella che segue, da cui si deduce che il rapporto tra Guadagno di antenna alla frequenza minima (circa 150GHz) e quello alla frequenza massima (870GHz) è circa 3 e che si accetta inoltre un degrado nella trasparenza di quasi un fattore 2 pur di lavorare a 870GHz.

Tab. 4.2.2: Overview of the JCMT Telescope and Atmospheric Parameters

Frequency	Wavelength	Aperture	Beamwidth	Atmos.	Nights
(GHz)	(μm)	Efficiency[(1)]	(arcsec)	trans.	(%)
150	2000	0.66	28	0.97	90
230	1300	0.63	21	0.96	90
345	870	0.56	14	0.88	70
492	610	0.46	12	0.43	20
690	435	0.32	8	0.44	25
870	345	0.21	6	0.53	30

[(1)]Aperture efficiency calculated assuming the rms surface accuracy is 30μm

4.3 Considerazioni

Da queste breve indagine risulta evidente:

a) anche i telescopi mm e submm, progettati per avere piena efficienza in certe bande di frequenza, tendono a lavorare a frequenze ben più alte, accettando il relativo degrado di prestazioni. Il caso più eclatante è JCMT che lavora a una frequenza massima quasi sei volte maggiore di quella a massimo guadagno.
b) comunque montati in altura, stante le frequenze di lavoro, tutti questi telescopi lavorano con valori di opacità, τ_o, per la maggior parte dell'anno (almeno il 70% del tempo) compresi tra 0.1 e 0.4.
c) i relativi valori di PWV si attestano fino a 10mm

Si terrà presente questo contesto al fine delle valutazioni sulla fattibilità a 90GHz di Medicina e Noto.

5. I SITI di MEDICINA e NOTO

5.1 Meteo e colonna di vapor d'acqua: serie storiche

Nel capitolo precedente è stata introdotta la grandezza PWV (precipitable water vapor) per caratterizzare, almeno in prima approssimazione, la situazione dell'opacità al sito (cfr. Fig. 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3).
Naturalmente una misura diretta di τ_o è la cosa migliore, tuttavia anche una collezione attraverso gli anni di PWV fatta al sito fornisce un'idea della situazione di trasparenza atmosferica.
Valori di PWV possono essere ottenuti da:
a) serie storiche di dati meteo (pressione P, temperatura T, umidità relativa RH)
b) serie storiche di dati provenienti da osservazioni VLBI, radiosonde, GPS. Tutte queste forniscono come osservabile il Zenith Wet Delay (ZWD) da cui si ottiene PWV in quanto esiste una relazione di proporzionalità tra le due grandezze

$$\frac{\mathrm{PWV(mm)}}{\mathrm{ZWD(mm)}} = 0.15 \pm 20\% \qquad (5.1.1)$$

Sia Medicina che Noto hanno serie storiche che si rifanno ad a) ed b).

a) Dati di PWV a Medicina ottenuti da misure con stazione meteo locale.
Esiste una relazione matematica che fornisce in prima approssimazione PWV una volta noti (P,T,RH). Di seguito vengono mostrati alcuni grafici relativi agli anni 2002, 2003, 2004, 2005, 2006.

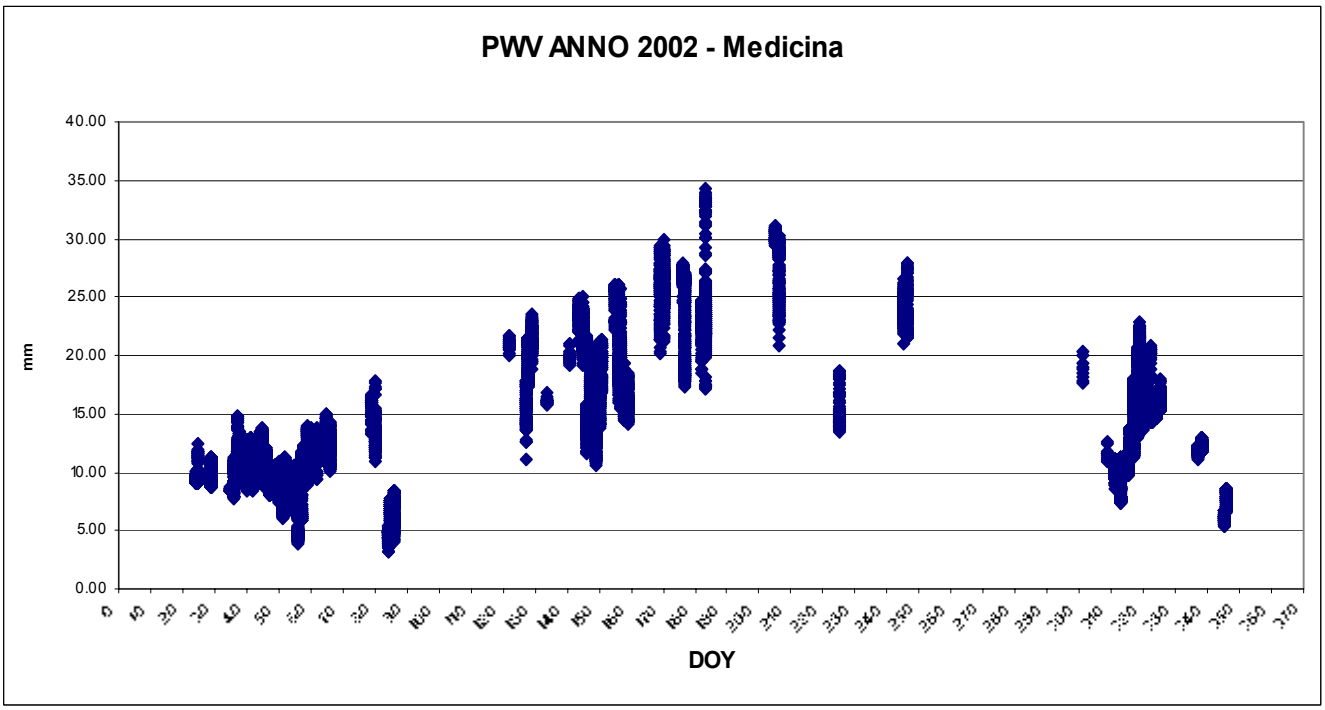

Fig. 5.1.1 PWV Medicina anno 2002

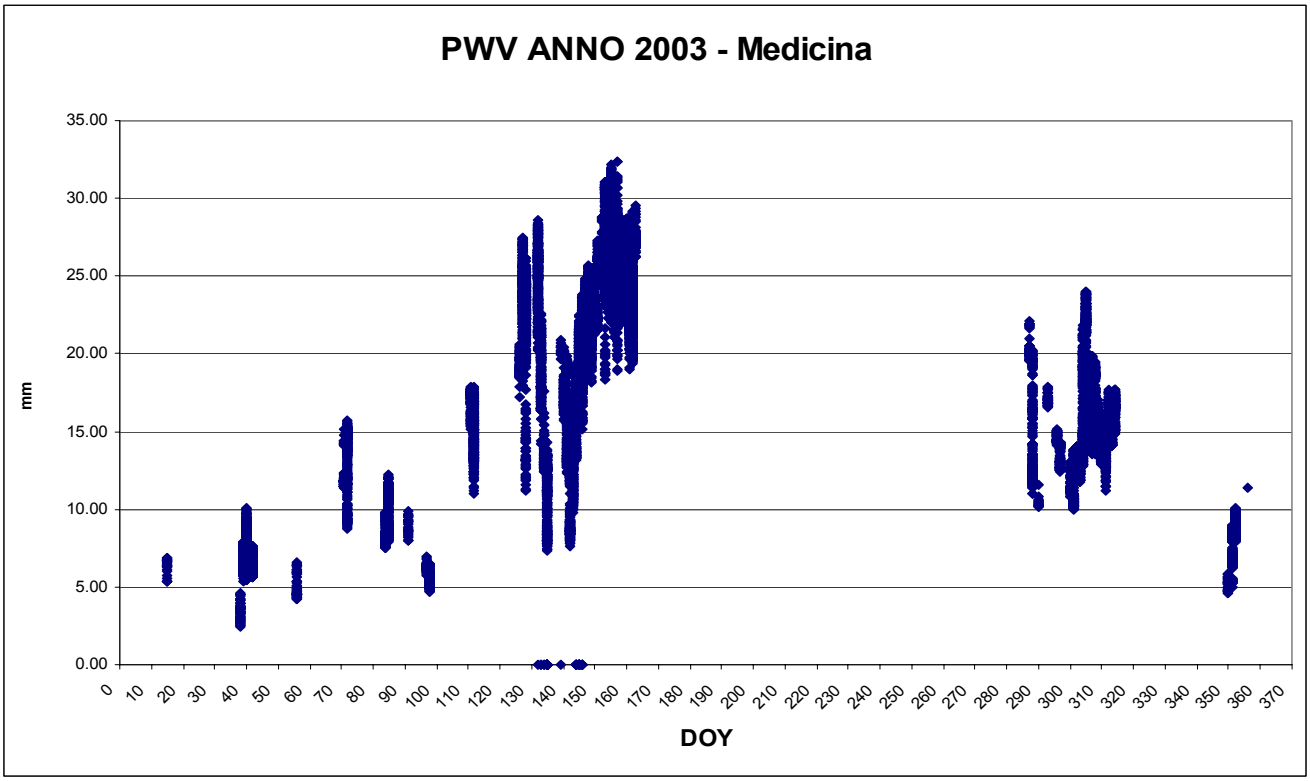

Fig. 5.1.2 PWV Medicina anno 2003

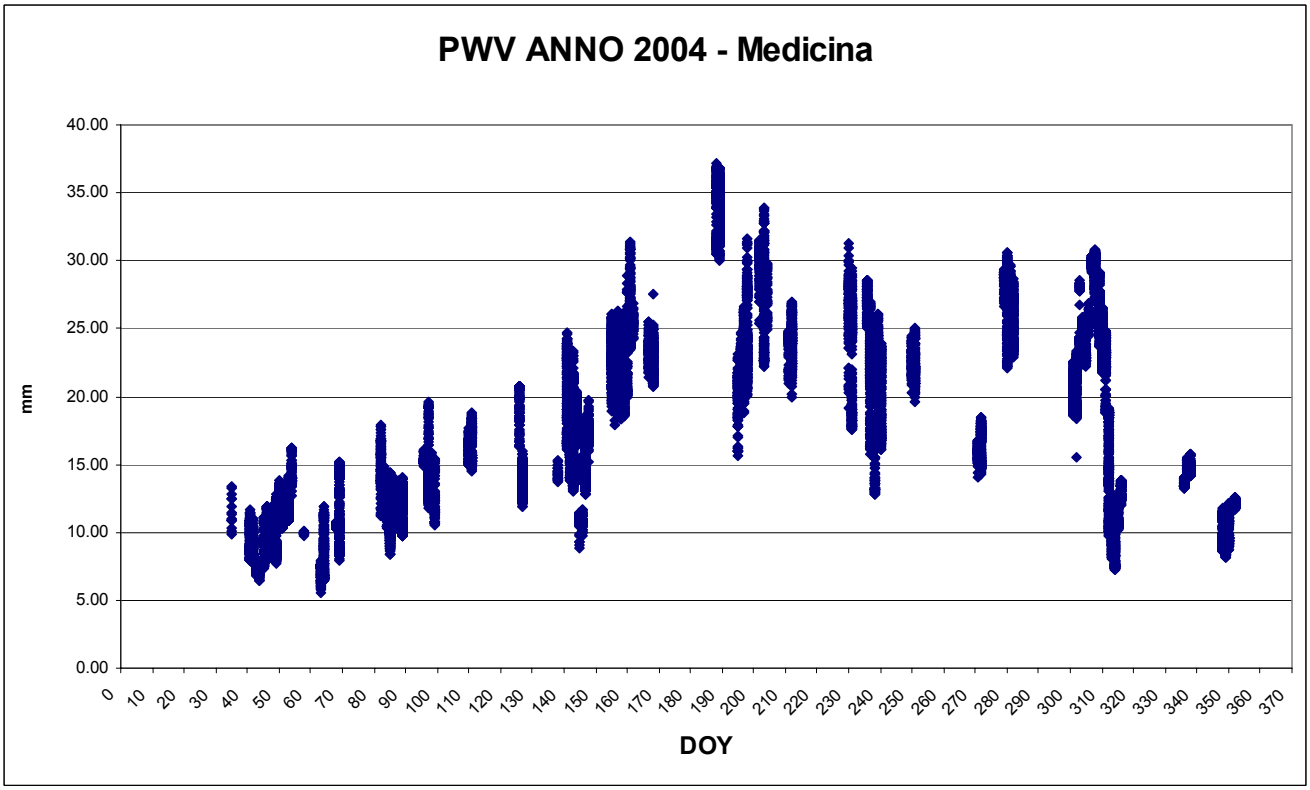

Fig. 5.1.3 PWV Medicina anno 2004

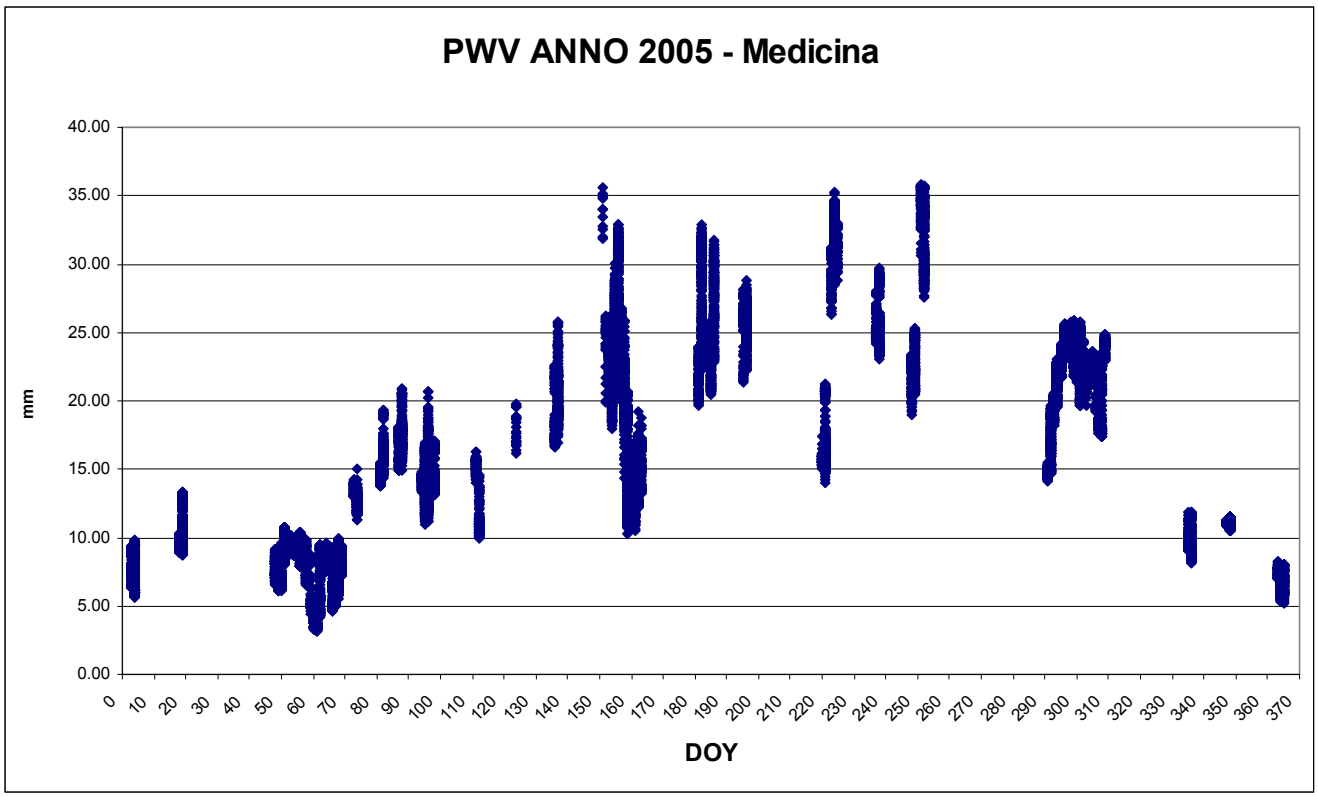

Fig. 5.1.4 PWV Medicina anno 2005

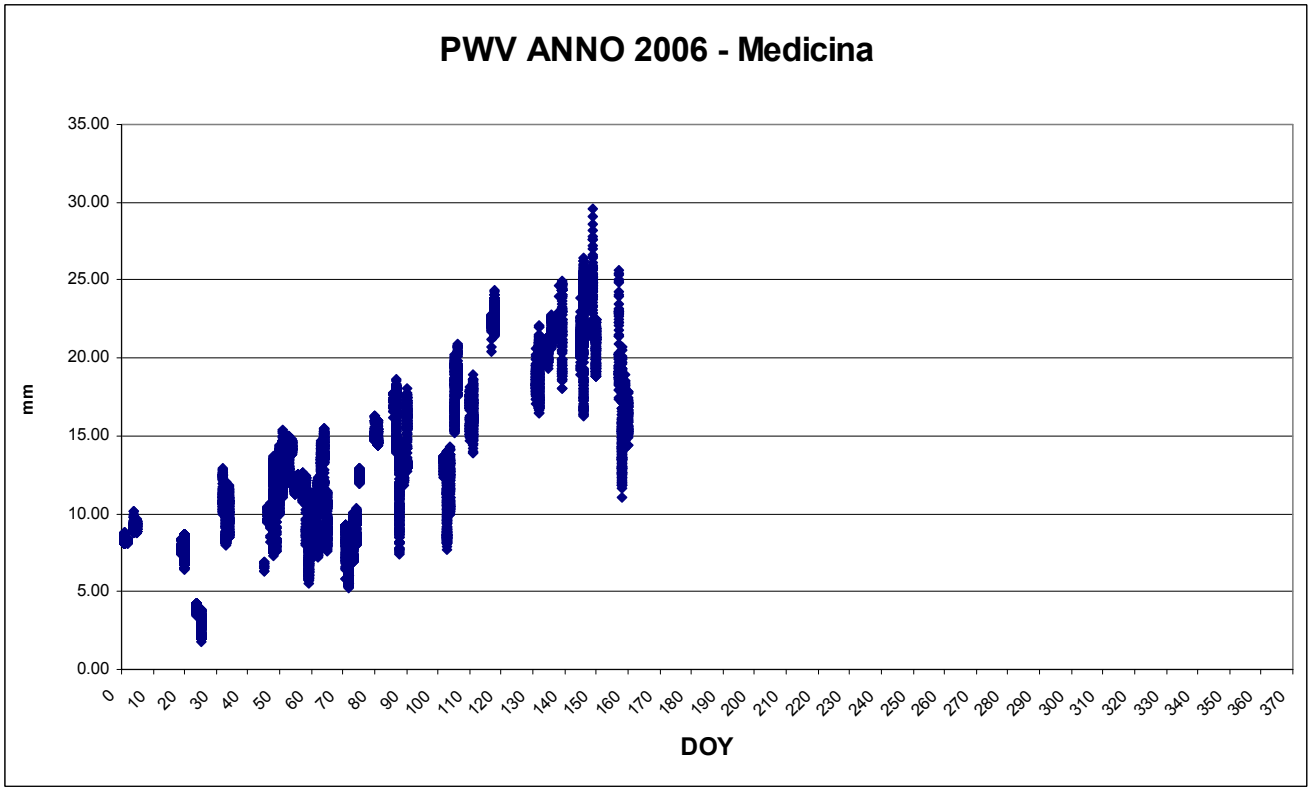

Fig. 5.1.5 PWV Medicina anno 2006

b) Dati di PWV a Medicina ottenuti da osservazioni VLBI e misure da radiosonde.

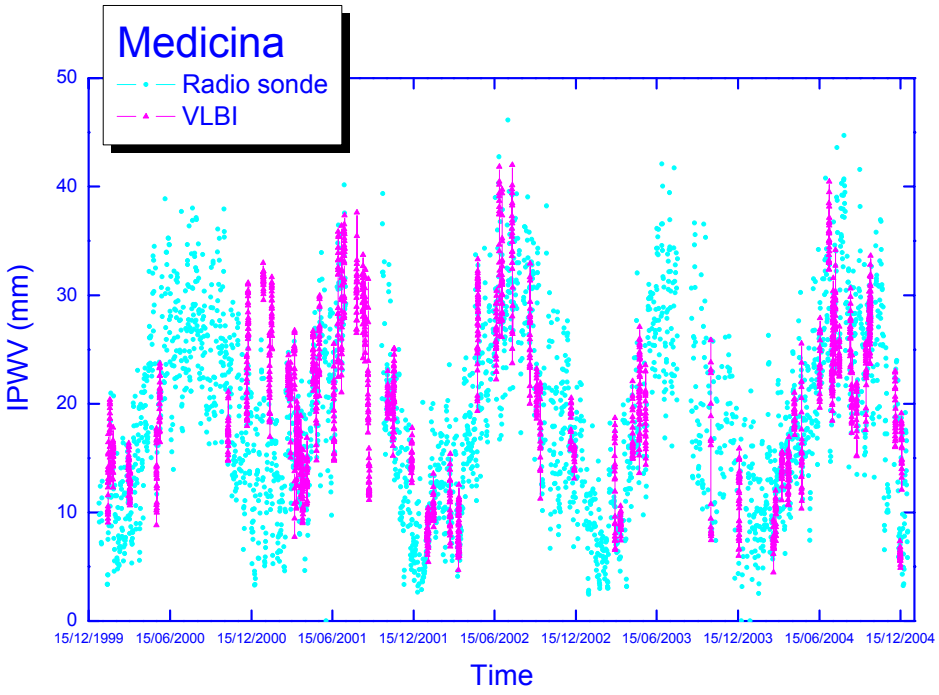

Fig. 5.1.6: PWV osservato dalle radiosonde e dal VLBI per la stazione di Medicina

c) Dati di PWV a Noto ottenuti da osservazioni VLBI .
I valori di Noto vengono mostrati per confronto con quelli di Medicina: il grafico che segue (Fig. 5.1.7, Zenith Wet Delay in funzione del tempo a Medicina), viene mostrato per essere confrontato con il suo omologo a Noto (Fig.5.1.8).

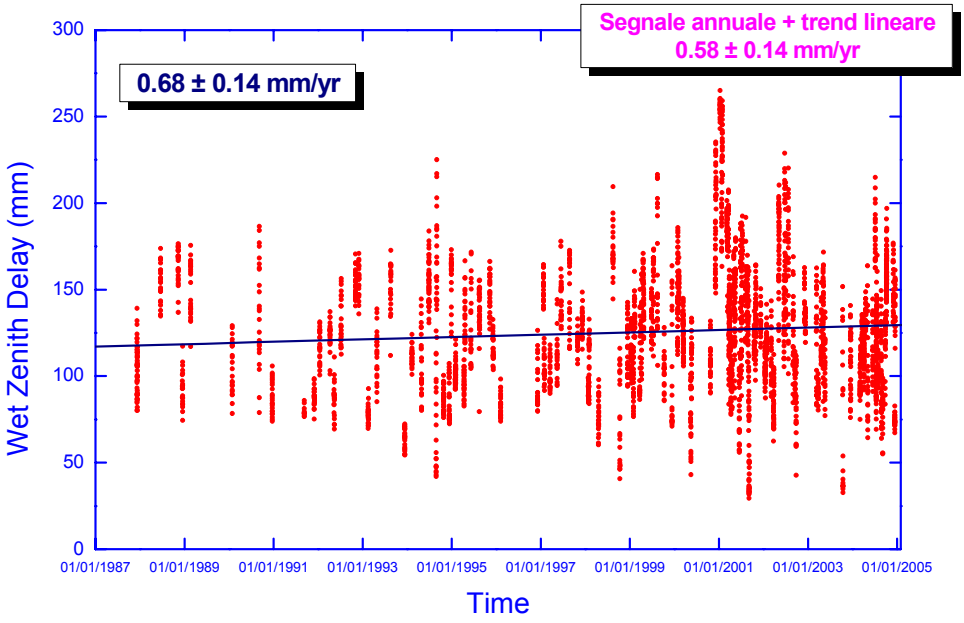

Fig. 5.1.7: ZWD dal 1987 al 2005 per la stazione di Medicina.

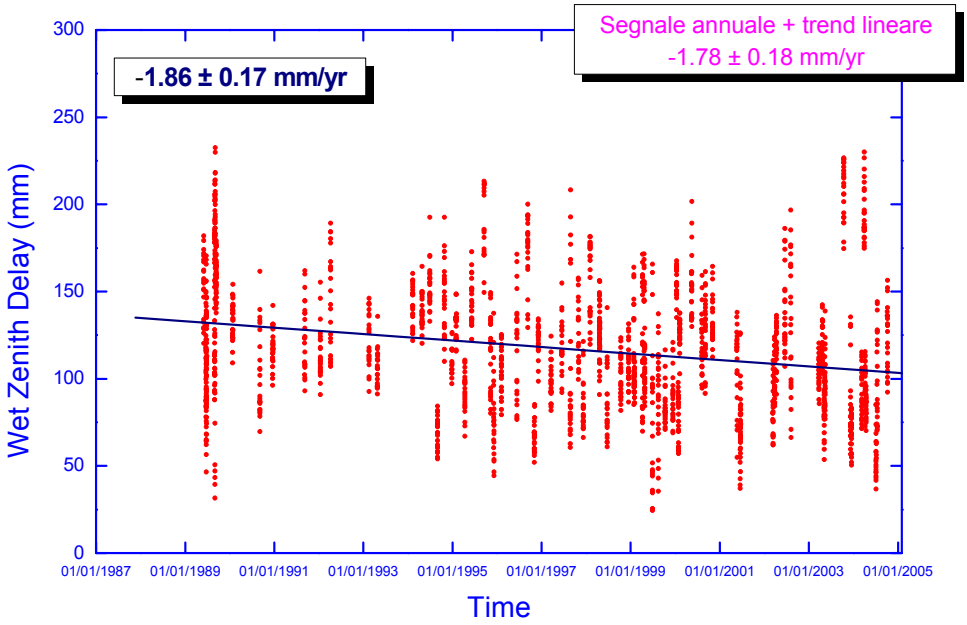

Fig. 5.1.8: ZWD dal 1989 al 2005 per la stazione di Noto

Moltiplicando i valori in ordinata per 0.15 si ottengono i mm di PWV (in Fig. 5.1.9 sono riportati valori presi nel periodo invernale di molti anni successivi), ma si vede che la situazione è piuttosto simile a quella di Medicina come mostrato in Fig. 5.1.6 o nelle figure da 5.1.1 a 5.1.5.

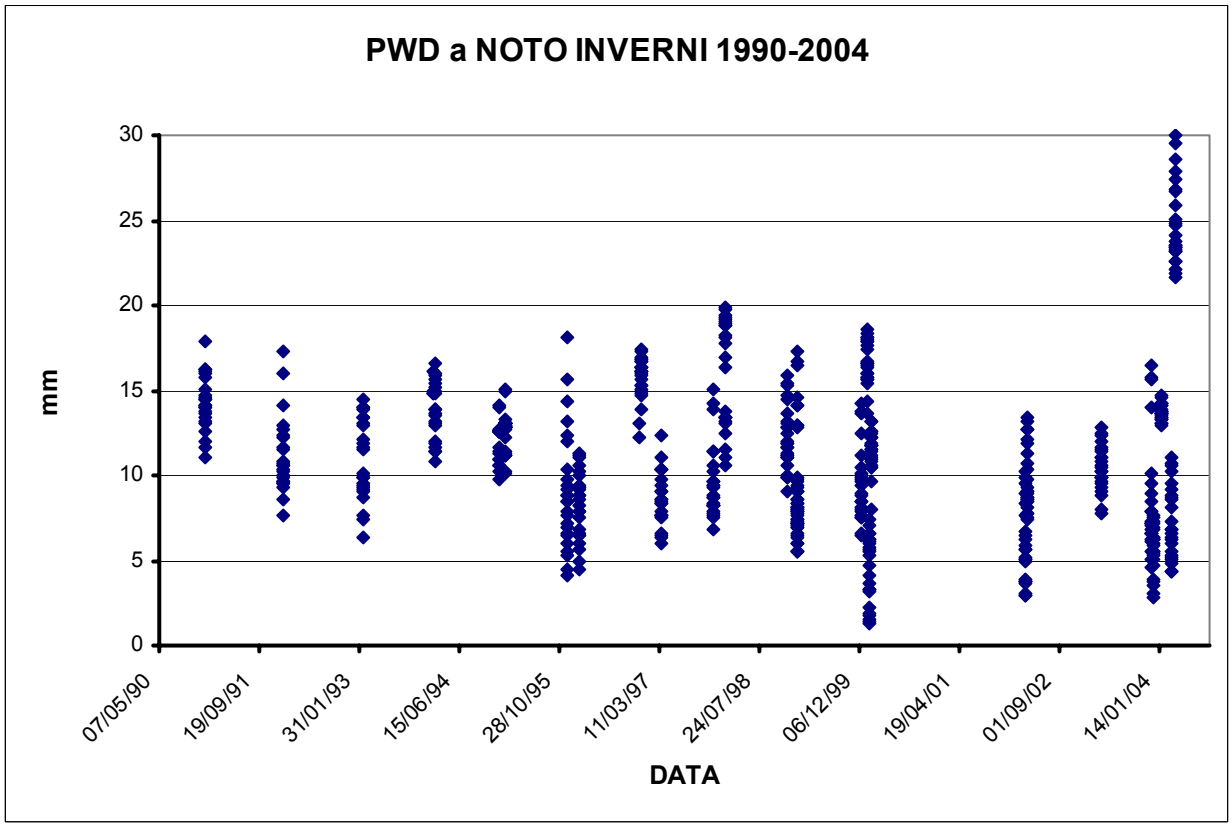

Fig. 5.1.9: PWV valutato da osservazioni VLBI per la stazione di Noto, solo inverni.

L'insieme dei grafici fin qui mostrati permette di asserire che nel periodo invernale, tipicamente nei mesi da dicembre al marzo successivo, il valore di PWV è ≤10mm per una quantità di tempo non trascurabile, fascia di valori contemplata anche in siti in altitudine (cfr, Fig. 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3 e Tab.

4.2.1) anche se per periodi più lunghi. Sulla base di questo primo risultato si è cercato di approfondire andando a consultare i dati presi giornalmente dalle sonde lanciate dalla base di S. Pietro Capofiume, pochi chilometri dal sito di Medicina
http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html
Ci si è concentrati solo nei mesi da dicembre a marzo di anni successivi, dal 1998 al 2006 (esistono comunque dati anche per anni precedenti)

2006			2005	2005			2004	2004			2003	2003			2002	
Mar	Feb	Gen	Dic	Mar	Feb	Gen	Dic	Mar	Feb	Gen	Dic	Mar	Feb	Gen	Dic	
14	14	15	11	12	28	25	14	11	16	19	8	16	26	17	3	TOTALI MENSILI
54				79				54				62				TOT. STAGIONALI

2002			2001	2001			2000	2000			1999	1999			1998	
Mar	Feb	Gen	Dic	Mar	Feb	Gen	Dic	Mar	Feb	Gen	Dic	Mar	Feb	Gen	Dic	
17	7	19	24	1	13	8	9	15	14	9	14	8	20	21	13	TOTALI MENSILI
67				31				52				62				TOT. STAGIONALI

Tab. 5.1.1 N.ro di giorni in inverno per cui PWV≤10mm a Medicina

Si nota che a parte il periodo 2004-2005 (probabilmente definibile come eccezionale) e il periodo 2000-2001 (inverno particolarmente umido e non freddo) normalmente sono osservabili con PWV≤10mm circa 60 gg./anno. Un dettaglio dei mesi considerati farebbe vedere inoltre che spesso i giorni "osservabili" si susseguono con continuità, soprattutto in febbraio e gennaio.
La situazione peggiore, sia a Medicina che Noto, è l'estate. Per questo periodo, a Medicina e a 22GHz, abbiamo dei valori misurati, con la tecnica sky dip, contestuali di PWV e di τ_o che dunque possono essere messi in relazione (Fig. 5.1.10),

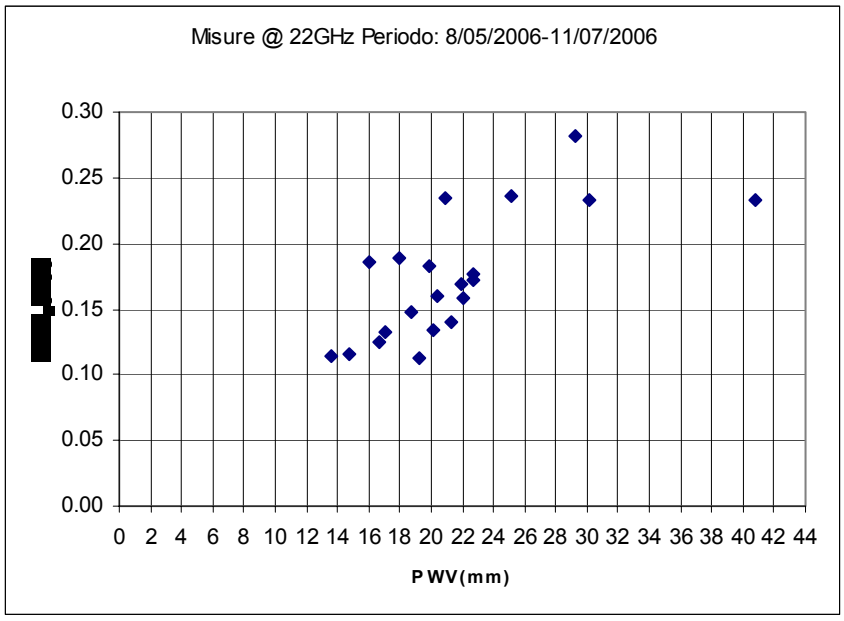

Fig. 5.1.10 correlazione τ_o–PWV a Medicina a 22GHz

Come aspettato PWV è ben maggiore di 10mm e τ_o si attesta a valori compresi tra 0.1 e 0.25, con variazioni anche notevoli a parità di PWV. Ma anche questo è aspettato, come sperimentano tutti i siti osservativi (ancora una volta cfr. con Fig. 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3). Come esempio è riportato un insieme di dati di Medicina del 30 maggio 2006 in cui si vede che con condizioni meteo leggermente diverse, che però fornirebbero due valori di PWV molto vicini, corrispondono invece due valori di τ_o molto diversi:

P (mbar)	T (^{o}C)	RH (%)	PWV (mm)	τ_o (@ 22GHz)
1003.9	14.3	63.8	16	0.185
1006.1	10.7	73.8	14.7	0.116

Tab. 5.1.2 Esempio di variazione giornaliera di τ_o, Medicina 30/5/2006

5.2 Valori stagionali di opacità a Medicina e Noto

A questo punto, nonostante non si abbia ancora a tutt'oggi una campagna di misure sistematica di opacità lungo tutto l'arco dell'anno sia per Medicina che per Noto, è possibile dedurre comunque alcuni importanti risultati:

1) Le serie storiche di misure meteo a Medicina indicano una non trascurabile quantità di giorni in cui PWV≤10mm (Figg. da 5.1.1 a 5.1.5), tali valori misurati localmente sono confermati da misure VLBI e anche da radiosonde effettuate nella zona medicinese (Tab. 5.1.1 e Fig. 5.1.6)

2) Dalle misure locali a Medicina di PWV e di τ_o, Fig. 5.1.9, effettuate in primavera-estate si può estrapolare che per valori di PWV≤10mm si hanno valori di $\tau_o \leq 0.1$ a 22 GHz. Tale considerazione implica un andamento decrescente della funzione τ_o(PWV), ipotesi confortata sia dagli andamenti della stessa funzione in altri siti (Figg. 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3) sia da misure estemporanee effettuate a Medicina durante il periodo invernale, qui non riportate per la loro mancanza di sistematicità.

3) Conservativamente si consideri ai siti Medicina e Noto un valore interessante di opacità ≤ 0.1 a 22 GHz, ma anche valori di 0.15-0.2 potrebbero essere considerati usabili. Del resto si confronti i valori di trasparenza atmosferica al JCMT riportati nella Tab. 4.2.2 in cui sono considerati usabili anche valori pari a 0.53, ovvero $\tau_o \leq 0.5$! Si tengano in conto quindi anche le considerazioni fatte nel paragrafo 4.3.

4) Ottenuti così plausibili valori di opacità a 22 GHz, e in mancanza di campagne locali di misura di trasparenza a 90 GHz, si può comunque stimare l'entità di τ_o a questa frequenza rifacendosi ai programmi di calcolo menzionati nel capitolo 3: le tabelle 3.2 indicano una opacità a 90 GHz che, per valori di PWV≤10mm, vanno da 0.094 a 0.17.

5) Le considerazioni fatte per Medicina vengono ritenute valide anche per Noto, stante la simiglianza delle serie storiche riportate in Fig. 5.1.7, 5.1.8, 5.1.9.

Definito in tal modo l'ambiente ai siti italiani, si è ora in grado di valutarne gli effetti in termini di sensibilità osservativa. E' ciò che si farà nel prossimo capitolo.

6. PRESTAZIONI di MEDICINA e NOTO in TERMINI di SENSIBILITA'

Di seguito si danno alcune valutazioni sulla prestazione in termini di sensibilità (espressa come SEFD, System Equivalent Flux Density, in Jy) a 90 GHz (3.3mm) delle antenne italiane. Per come è ora Medicina l'efficienza a 90 GHz è praticamente nulla, si propone dunque un upgrade dell'antenna.
Per ottenere il valore del SEFD, che è il rapporto tra Temperatura di Sistema, in K, e Guadagno d'antenna, in K/Jy, occorre valutare parecchie grandezze, che di seguito verranno elencate. La stima del SEFD è fatta alla elevazione di 45°, minore è il valore di SEFD migliore è la prestazione del sistema ricevente.

1) Opacità
Si assume $\tau_o \leq 0.2$, come esposto nel paragrafo 5.2
L'attenuazione atmosferica agisce nel senso di diminuire il segnale proveniente della sorgente, quindi essa verrà trattata come un coefficiente di diminuzione dell'efficienza complessiva d'antenna. Vale la 3.1.2, che a El=45° porge,
Fattore di perdita per opacità ≥ 0.75 in funzione del valore effettivo di τ_o nell'intervallo [0, 0.2]

2) Efficienza d'antenna.
Dipende da molti fattori, quello che qui interessa è quello dovuto alla accuratezza delle superfici, ovvero ai pannelli dello specchio primario, al loro allineamento, al subriflettore. Per Noto verrà considerata la situazione attuale. Per SRT e Medicina, la prima in costruzione, la seconda oggetto di proposta di miglioramento, verrà proposto quello che fornisce oggi lo stato dell'arte in termini di accuratezza degli specchi e due possibili scenari in termini di allineamento tra i pannelli dello specchio primario dopo l'esperienza effettuata a Noto.

Noto:
pannelli primario=0.085mm; subriflettore=0.2mm equivalente[1], allineamento=0.2mm
RMS complessivo=0.3mm $\Rightarrow$ Fattore di perdita di efficienza = 0.27

SRT:
allineamento 1^a fase=0.15mm; allineamento 2^a fase=0.050mm
RMS complessivo 1^a fase = 0.185mm [2] $\Rightarrow$ Fattore di perdita di efficienza = 0.61
RMS complessivo 2^a fase = 0.119mm [2] $\Rightarrow$ Fattore di perdita di efficienza = 0.81

Medicina:
allineamento 1^a fase=0.15mm; allineamento 2^a fase=0.050mm
RMS complessivo 1^a fase = 0.185mm [2] $\Rightarrow$ Fattore di perdita di efficienza = 0.61
RMS complessivo 2^a fase = 0.119mm [2] $\Rightarrow$ Fattore di perdita di efficienza = 0.81

3) Guadagno d'antenna in K/Jy

Il valore di guadagno d'antenna che tiene conto di tutti i fattori di perdita di efficienza, e ovviamente anche della dimensione dell'area geometrica dello specchio primario escludendo i fattori precedentemente menzionati, vale 0.16 K/Jy per le antenne di Medicina e Noto, 0.7 K/Jy per

[1] Sarebbe 0.35mm rms, ma viene usata la superficie attiva anche per recuperare una parte di inaccuratezza dello specchio secondario
[2] Cfr. contributo G. Zacchiroli al Workshop SRT del maggio 2006

SRT. La montatura dell'ipotetico ricevitore a 90 GHz è supposta nel fuoco secondario. Questi valori vanno diminuiti per i coefficenti di perdita riportati in 1) e 2), pertanto risulta:

Noto:
Guadagno(45°) $\geq$ 0.03 K/Jy in funzione del valore effettivo di τ_o nell'intervallo [0, 0.2]

SRT:
Guadagno 1^a fase(45°) $\geq$ 0.32 K/Jy in funzione del valore effettivo di τ_o nell'intervallo [0, 0.2]
Guadagno 2^a fase(45°) $\geq$ 0.42 K/Jy in funzione del valore effettivo di τ_o nell'intervallo [0, 0.2]

Medicina:
Guadagno 1^a fase(45°) $\geq$ 0.07 K/Jy in funzione del valore effettivo di τ_o nell'intervallo [0, 0.2]
Guadagno 2^a fase(45°) $\geq$ 0.1 K/Jy in funzione del valore effettivo di τ_o nell'intervallo [0, 0.2]

Come valore di riferimento, un guadagno di 0.1 K/Jy è il valore che ha *attualmente* Medicina a 22 GHz. Da questi numeri seguono le seguenti considerazioni.
La prima è che per lavorare a 90 GHz Noto ha bisogno di completare l'upgrade fatto con l'installazione della superficie attiva. Tale completamento deve prevedere un subriflettore con accuratezza di specchio migliore e un migliore allineamento dello specchio primario. La strada è quella di utilizzare il lavoro fatto, e che si completerà su SRT, anche sulle antenne già esistenti, in questo modo i numeri di Noto si attesteranno su quelli dell'ipotetico upgrade di Medicina.
La seconda è che, a differenza degli altri telescopi già in attività, sulle tre antenne italiane il guadagno d'antenna riportato sarà costante a tutte le elevazioni, stante la presenza della superficie attiva, il che è un enorme vantaggio in termini di prestazioni in sensibilità.
L'ultima considerazione è che, sebbene SRT abbia il notevole vantaggio di avere un guadagno maggiore, data la sua conformazione shaped ha un campo di vista di dimensioni inferiori a quelle di un parabolico, come appunto sono Noto e Medicina. Ciò significa che sulle due antenne già esistenti si potranno collocare ricevitori a multifeed, in questo caso a 90 GHz, con un numero molto più elevato di pixel, con l'evidente vantaggio di una più veloce copertura di area di cielo osservata.

4) Temperatura di rumore di sistema
La Temperatura di Sistema (Tsys) è data dal contributo della temperatura di rumore del ricevitore, di brillanza del cielo (che a sua volta è la somma di vari contributi) e effetti di spillover dal cielo e dal terreno. Di seguito alcune stime a 90 GHz su ciascuno dei contributi,
Tric $\approx$ 65 K
Tsky $\leq$ 53 K in funzione del valore effettivo di τ_o nell'intervallo [0, 0.2][3]
Tspill $\approx$ 10 K
Quindi Tsys $\leq$ 130 K, in funzione del valore effettivo di τ_o nell'intervallo [0, 0.2].

5) Calcolo del SEFD
Noto:
SEFD(45°) $\leq$ 4300 Jy in funzione del valore effettivo di τ_o nell'intervallo [0, 0.2]

SRT:
SEFD 1^a fase(45°) $\leq$ 400 Jy in funzione del valore effettivo di τ_o nell'intervallo [0, 0.2]
SEFD 2^a fase(45°) $\leq$ 310 Jy in funzione del valore effettivo di τ_o nell'intervallo [0, 0.2]

[3] Si è usata la 3.2.1, il calcolo preciso riportato in [3] conforta tale valore.

Medicina:
SEFD 1ª fase(45°) ≤ 1900 Jy in funzione del valore effettivo di τ_o nell'intervallo [0, 0.2]
SEFD 2ª fase(45°) ≤ 1300 Jy in funzione del valore effettivo di τ_o nell'intervallo [0, 0.2]

In confronto al valore ipotizzato dall'autore della tabella comparativa che verrà mostrata nel prossimo capitolo si è qui valutato un valore più conservativo di rumore di sistema. Tuttavia al solo scopo del confronto che verrà fatto nel cap.7 si assumerà Tsys = 100 K.

7. CONFRONTO di PRESTAZIONI tra TELESCOPI OPERANTI nella BANDA 3mm

A questo punto è importante confrontare le possibili prestazioni di Medicina, Noto, SRT con ciò che gli altri telescopi forniscono attualmente (o promettono di fornire nel breve periodo) per ciò che concerne la banda 90GHz.

La tabella 7.1 è presa da

T. Krichbaum "The role of millimeter VLBI observations in AGN research",
Proceedings of SRT: the impact of large antennas on radioastronomy and space science,
Cagliari 7-10 Novembre 2001

ed è stata aggiornata con i valori per SRT, Noto e Medicina secondo le considerazioni del capitolo precedente. Non è dato sapere che valore di opacità, ammesso che venga considerato, è stato assunto dai vari siti al fine di dichiarare il SEFD, nè a quale elevazione. Siccome è consuetudine fornire il guadagno d'antenna massimo (e quindi intorno ai 45° di elevazione) si assume che anche la Tsys, e dunque il SEFD, sia dato a quella elevazione.

Station	D (m)	Tsys (°K)	Gain (°K/Jy)	Antenna efficiency	SEFD (Jy)
Effelsberg, Germany	100	170	0.14	0.05	1214
Haystack, MA, USA	37	150	0.058	0.15	2590
Pico Veleta, Spain	30	120	0.14	0.55	860
VLBA, USA	25	150	0.032	0.18	4680
Onsala, Sweden	20	250	0.045	0.40	5550
Sest, Chile	15	200	0.038	0.60	5260
Metsähovi, Finland	14	300	0.017	0.30	17650
Nobeyama, Japan	45	150	0.17	0.30	880
Ovro, CA, USA	6x10.4	200	0.084	0.50	2380
Hat Creek, CA, USA	9x6.1	200	0.050	0.55	4000
Quabbin, MA, USA	14	300	0.026	0.47	11540
KittPeak, AZ, USA	12	150	0.026	0.64	5770
P. de Bure, France	6x15	100	0.18	0.51	560
ALMA, Chile	64x12	100	1.82	0.70	55
GBT, WV, USA	101	100	1.00	0.35	100
CARMA, CA, USA	6x10+9x6	100	0.14	0.55	710
SRT 1ª fase, Italy	64	100	0.32(1)	0.37	312(1)
SRT 2ª fase, Italy	64	100	0.42(1)	0.48	238(1)
LMT, Mexico	50	100	0.43	0.60	230
Yebes, Spain	40	100	0.13	0.30	770
Noto, Italy	32	100	0.03(1)	0.14	3333(1)
Medicina 1ª fase, Italy	32	100	0.07(1)	0.32	1428(1)
Medicina 2ª fase, Italy	32	100	0.1(1)	0.46	1000(1)

Tab. 7.1 Confronto di prestazioni a 90 GHz tra vari telescopi

Legenda: Antenne che regolarmente lavorano, o hanno lavorato, a 3mm.
Antenne che lavoreranno a 3mm.
Antenne italiane che lavoreranno o potrebbero lavorare a 3mm.

(1) $\tau_o = 0.2$ ed El = 45°

8. CONCLUSIONI

La frequenza massima di lavoro delle antenne italiane esistenti è attualmente 22 GHz per Medicina e 43 GHz per Noto.
Lo stato dell'arte per un ricevitore a 22 GHz può essere valutato in circa 60 K di Tsys a elevazione 45° a questi siti.
Si avrebbe allora un SEFD=545 Jy a Medicina a 22 GHz, mentre si ha un SEFD=600 Jy attualmente a Noto a 43 GHz. Dall'esame dei calcoli forniti nel capitolo 6 si evince che Medicina e Noto, con l'opportuno upgrade, avrebbero un degrado di efficienza di meno di un fattore 2 spostando verso l'alto di ben 4 volte la frequenza massima di lavoro. Tale degrado è minore o uguale di ciò che si accetta su altri telescopi (cfr. paragrafo 4.3).
Anche le stime locali di opacità (cfr. paragrafo 5.2), non solo in termini di valori di τ_o ma anche di numero di giorni all'anno disponibili per osservare a 90 GHz, rendono appetibili i siti italiani, nell'ottica non di specializzarli nella banda 3 mm, bensì di allargare e potenziare le possibilità osservative ritagliandosi un periodo ben preciso nell'arco dell'anno. Sessanta giorni non sono pochi, del resto anche al TNG (Telescopio Nazionale Galileo) gli strumenti più usati montati sul telescopio risultano effettivi per 120 notti all'anno, più o meno equivalenti a 60 giorni di un radiotelescopio in quanto utilizzabile per tutte le 24 ore. Di più, la particolarità di poter cambiare frequenza in pochi secondi permetterebbe al telescopio di Medicina di adottare una schedulazione dinamica dell'antenna, ovvero di decidere un altro tipo di osservazione se il particolare valore di opacità del momento non è compatibile con una osservazione a 3 mm.
Il confronto di prestazioni ottenibili rispetto ad altri telescopi (cfr. Tab. 7.1), mostra inoltre che sfruttando tecnologia allo stato dell'arte le prestazioni ottenibili sono o del tutto comparabili o migliori di alcuni "siti storici" millimetrici o vicine a quelle dei nuovi candidati nel breve termine.
Se ne conclude quindi che sia Medicina che Noto possono benissimo candidarsi, a livello internazionale, per far parte di una rete scientifica, VLBI e singola antenna, fino alla banda dei 3 mm.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano Enzo Natale per il proficuo scambio di idee sull'argomento, Monia Negusini per le informazioni sulle misure di acqua precipitabile ai siti di Medicina e Noto, Franco Mantovani per la revisione della prima stesura del documento, K.H. Mack e L. Olmi per la revisione della seconda stesura, e in particolare G. Maccaferri e A. Orlati per il collezionamento dei dati di opacità e meteorologici al sito di Medicina.

9. RIFERIMENTI

1. J.W. Waters
"Absorption and emission by atmospheric gases" in Methods of Experimental Physics vol. 12/B pag. 142 1976
2. A.R. Thompson, J.M. Moran, G.W. Swenson Jr.
"Interferometry and Synthesis in Radioastronomy", Wiley 1986
3. G. Cortès
"Antenna Noise Temperature Calculations", SKA Technical Memo Series 20/10/2004
4. B. Butler
"Precipitable Water at the VLA, 1990-1998", MMA Memo n. 237 NRAO 13/11/1998
5. B. Butler
"Precipitable Water at KP, 1993-1998", MMA Memo n. 238 NRAO 30/11/1998
6. H.E. Matthews, J. Leech
"Overview of the JCMT" , 10/11/2004
7. J.A. Quesada
"Precipitable Water Vapor content above Pico Veleta", Astronomical Society of the Pacific p.441-444, 1989
8. M. Negusini
"Uso della tecnica VLBI nello studio del contenuto di vapore d'acqua in atmosfera e della sua variazione a medio e lungo termine."
Dottorato di Ricerca in Geofisica (XVI CICLO), Marzo 2005