

L'Istituto di Fisica

L'Istituto di fisica di Pisa era stato costruito per Carlo Matteucci dal Granduca Leopoldo II di Toscana: fu completato nel 1844. In quanto struttura separata, progettata e costruita per l'insegnamento e la ricerca in fisica e nella fisica tecnologica, con cui condivideva lo spazio, l'Istituto di Pisa non ebbe uguali in Italia fino a quando fu aperto nel 1880 l'Istituto di Roma. La formazione di laboratorio per gli studenti probabilmente iniziò quasi subito, date le predilezioni di Matteucci in questo campo. Certamente il volume delle sue pubblicazioni e di quelle del suo assistente e successore Riccardo Felici indicano che le loro ricerche vi fiorirono negli anni Quaranta e Cinquanta. L'Istituto stesso fu costruito "su un solido progetto. [e] fornito di importanti e numerose apparecchiature scientifiche." Comprende sul piano principale una grande aula, uno spazioso museo per la conservazione di tutti gli strumenti, e almeno due laboratori. Il pianterreno conteneva officine e magazzini e la residenza del custode. Diverse stanze per ricercatori individuali e una grande stanza per le esercitazioni degli studenti furono ottenute con l'aggiunta di un secondo piano nel primo tentativo di ammodernare l'edificio nel 1894, che costò 18.000 lire per la costruzione e 5.000 lire per l'equipaggiamento. Il secondo allargamento, iniziato nel 1903 e finanziato con 100.000 lire, risultò in un istituto di dimensioni più che doppie rispetto all'originale.

Negli anni Settanta il personale dell'Istituto di fisica consisteva nel direttore, in un assistente e in un meccanico. Nello stesso edificio il gabinetto di fisica tecnologica comprendeva nel proprio personale un assistente e due meccanici, uno dei quali svolgeva anche le funzioni di custode. Verso la metà degli anni Ottanta l'Istituto di fisica ottenne un secondo assistente, e nel 1891 aveva anche un tecnico meccanico e un aiuto tecnico. Il finanziamento dell'Istituto, esclusi i salari, era di 3.000 lire annue nel 1878, mentre il gabinetto di fisica tecnologica riceveva 800 lire. Come indicato dalla Tavola 2.23, la somma di 3.000 lire annue per le spese di equipaggiamento e diverse dal personale era uguale a quella ricevuta dai gabinetti di fisica di Bologna, Padova, Palermo, Roma e Torino nello stesso anno; il gabinetto di Napoli riceveva 3.500 lire, mentre quello di Pavia riceveva soltanto 2.500 lire. Questo livello di sostegno per i gabinetti di fisica fu mantenuto per diversi anni. I professori potevano rivolgersi al Ministro per finanziamento straordinari per equipaggiamento o per rinnovamenti, ma non ho trovato evidenze che Felici l'abbia mai fatto.

I Professori – Riccardo Felici ed Enrico Betti

Riccardo Felici (1819-1902) fu il solo studente e il successore di Carlo Matteucci a Pisa. Era un abile matematico come pure un esperto sperimentatore, ed era convinto "che gli studi fisici separati da quelli matematici potrebbero giungere a molto poco." Così Felici univa in se stesso l'approccio sperimentale di Matteucci con l'approccio matematico di Ottaviano Fabrizio Mossotti (1791-1863), che fu professore di fisica matematica e meccanica celeste a Pisa dal 1841 alla morte nel 1863. In particolare, in molte delle proprie indagini Felici sintetizzò il lavoro sperimentale essenzialmente non matematico di Matteucci sull'induzione elettromagnetica con la teoria matematica dei dielettrici di Mossotti. Il suo metodo scientifico è stato descritto come dotato di una "intransigente austerità," incorporando una precisione concettuale che, sia che affrontasse questioni teoriche che sperimentali, era sempre matematica. A differenza di molti fisici del diciannovesimo secolo delle scuole tedesche e inglesi, era capace di pensare matematicamente senza ricorso a modelli meccanici, un'abilità che condivideva con un gruppo selezionato che includeva Helmholtz, Poincaré, Beltrami e Volterra. Personalmente Felici era un uomo estremamente modesto, con una disposizione gentile e pacata, tuttavia capace di sottile ironia e di pungente sarcasmo. Non incoraggiava gli studenti con complimenti ma li spronava e li ammoniva con epigrammi e motti piuttosto scherzosi. Dubbioso delle proprie scoperte, di cui non parlava mai, era più duro con se stesso che

con gli altri. Era uno sperimentatore cauto e attento a evitare di fare eccessive rivendicazioni dei propri risultati. Apparentemente egli vedeva il modesto edificio dell'istituto come un palazzo del quale era sorpreso di ritrovarsi padrone. Nel 1898 Felici e uno dei suoi primi studenti, Emilio Villari, furono eletti entrambi soci onorari della *Physical Society* di Londra.

Il lavoro meglio conosciuto di Felici, che apparve in traduzione nei *Klassiker* di Ostwald nel 1899, fu fatto negli anni Cinquanta mentre egli era il supplente ufficiale di Matteucci sulla cattedra di fisica di Pisa. Era una elaborata serie di accurati studi sperimentali progettati per estrarre le leggi dell'induzione elettrodinamica alla maniera di classici studi di Ampère sulle azioni meccaniche delle correnti continue usando il metodo dello zero. Gli articoli furono pubblicati nei piuttosto oscuri *Annali della università toscana*, nel *Nuovo Cimento* dopo la sua "resurrezione" nel 1855, e nei largamente diffusi *Annales de chimie et de physique*. Le leggi derivate sperimentalmente da Felici non erano in accordo con le predizioni toriche di Wilhelm Weber o di F.E. Neumann, e suscitavano lunghe discussioni nella letteratura. Nella sua "*Dynamical theory of the electromagnetic field*" del 1865 tuttavia Maxwell descrisse gli esperimenti di Felici insieme con quelli di Faraday come atti a fornire le basi per i fatti dell'induzione dipendenti dalla variazione della quantità che Faraday chiamava lo stato elettrotonico e Maxwell chiamò momento elettromagnetico. La situazione fu chiarita solo con le indagini sperimentali e teoriche di Helmholtz nel 1870-72.

Il lavoro precedente di Felici includeva un articolo sulla termoelettricità del mercurio e uno sulla teoria del circuito galvanico, entrambi pubblicati ne *Il Cimento* nel 1846 e nel 1847, uno sulla propagazione di una corrente dentro una sfera, pubblicato nel 1850 nella nuova rivista dell'Abate Barnaba Tortolini, *Annali di scienze matematiche e fisiche*, e uno sulla polarizzazione galvanica e la propagazione delle correnti nei liquidi, pubblicato negli *Annali della università toscana* nel 1851.

Dal 1862 al 1866 Felici pubblicò i risultati di una nuova serie di esperimenti sulla velocità di propagazione dell'elettricità e sulla natura e durata della scintilla, usando uno specchio rotante. Il suo risultato per la velocità di propagazione dell'elettricità era di circa 260.00 chilometri al secondo; e gli studi sulla scintilla furono pubblicati poco dopo le classiche fotografie di Berend Feddersen. Un'altra serie di ricerche nei tardi anni Sessanta riguardava il comportamento dei corpi non conduttori in presenza di quelli elettrificati. Questo lavoro servì a chiarire gli esperimenti di Matteucci negli anni Cinquanta e di molti altri sui meccanismi e i processi di polarizzazione degli isolanti. L'ultima importante ricerca di Felici, svolta nei primi anni Settanta, fu un'indagine sulla crescita e decrescita della magnetizzazione del ferro dolce a seguito della rapida attivazione e chiusura del circuito magnetico. Per questo progetto egli progettò e fece costruire dal suo meccanico il proprio "ben noto", "classico" interruttore, un interruttore che era capace di interrompere un circuito a intervalli esattamente misurabili di 1/20.000 di secondo.

Perseguendo il proprio proposito di legare gli approcci matematico e sperimentale alla fisica, Felici si prese il compito di "persuadere i propri colleghi matematici a occuparsi di questioni fisiche." Il lavoro del suo compagno di studi, compagno d'armi nel 1848, e collega Enrico Betti (1823-1892), che fu professore di analisi e di geometria superiore a Pisa dal 1857 e poi successore di Mossotti, certamente esibì un cambio di direzione dalla matematica pura alla fisica matematica negli anni Sessanta per l'influenza combinata di Felici, dell'amico di Betti Bernhard Riemann e della sua nuova cattedra. D'allora in poi Betti scrisse in modo prolifico sulla propagazione delle onde e del calore, sulla termodinamica, l'elettrodinamica, il magnetismo, la capillarità, l'idrodinamica, l'elasticità, e la teoria del potenziale. Il suo libro del 1879, *Teorica delle forze newtoniane e sue applicazioni all'elettrostatica e al magnetismo*, basato su articoli apparsi a partire dal 1863, fu tradotto in tedesco nel 1885 come *Lehrbuch der Potentialtheorie und ihrer Anwendungen auf Elektrostatik und Magnetismus*.

Insieme con i propri più giovani colleghi Francesco Brioschi (1824-1897), professore di meccanica a Pavia, e Felice Casorati (1835-1890), studente di Brioschi a Pavia, Betti intraprese un viaggio verso i centri matematici di Francia e Germania nel 1858 per fare la conoscenza dei grandi matematici dell'epoca, e per rendere noto all'estero il lavoro matematico italiano. La nascita di una scuola italiana di analisti fu dovuta agli sforzi infaticabili di questi tre nell'insegnamento, nella ricerca e nell'organizzazione dell'istruzione superiore. Inoltre Betti ed Eugenio Beltrami (1835-1900), per breve tempo collega di Betti a Pisa dal 1864 al 1866 poi in seguito professore a Bologna, Roma, Pavia e di nuovo a Roma, furono i due campioni della fisica matematica in Italia nell'ultimo terzo di secolo. A Betti è anche stato dato credito di aver reso la teoria dell'elasticità in *Nationalfrage* in Italia. Betti fu deputato al Parlamento nazionale dal 1862 al 1874; fu nominato senatore nel 1884. Fu Segretario Generale della Pubblica Istruzione dal 1874 al 1876 e in seguito per alcuni anni fece parte del Consiglio Superiore della Pubblica Istruzione. Dal 1864 fino alla morte fu il direttore della Scuola Normale Superiore annessa all'università.

Felici e Betti erano diventati gli editori della rivista pisana *Nuovo Cimento* dopo la morte di Piria nel 1865 e di Matteucci nel 1868. La rivista che aveva iniziato la propria vita come rivista di fisica, chimica e loro applicazioni, divenne nel 1877 specificamente dedicata soltanto alla fisica sperimentale e matematica, come conveniva al restringersi del *focus* degli interessi dei suoi editori.

I Laureati in Fisica Sperimentale e la loro Ricerca

Poiché Pisa fu un luogo di formazione per professori universitari di fisica sperimentale e matematica, un esame delle carriere e delle ricerche di alcuni dei laureati di Pisa in questi campi dall'Unità ai primi anni Ottanta è opportuna. Come si vede dalla Tavola 3.2, ci sono sette fisici sperimentali e nove attivi in fisica matematica e campi collegati che divennero professori universitari e si laurearono tutti all'Università di Pisa tra il 1860 e il 1882. Si noti che il trasferimento del più anziano laureato in fisica matematica, Ernesto Padova, da Pisa a Padova nel 1882 consentì al più giovane di questo gruppo, Vito Volterra, di ottenere una cattedra a Pisa all'età di ventitré anni. Gregorio Ricci, uno dei laureati del 1875, più tardi prese il nome di Ricci-Curbastro, con il quale è di solito noto agli storici della relatività generale.

L'impatto dei laureati in fisica sperimentale e fisica tecnologica può essere misurato dalla Tavola 3.3, nella quale sono indicati Felici, i suoi studenti e gli studenti dei suoi studenti che ottennero cattedre in fisica sperimentale e tecnologica.

Una frazione significativa del credito per questa concentrazione di talento a Pisa fu dovuta alla presenza della Scuola Normale Superiore, che dipendeva interamente dall'università per tutti i suoi docenti anziani. Sebbene fosse stata intesa per dare una speciale formazione a eccellenti potenziali insegnanti di scuola secondaria mediante un concorso nazionale per borse di studio, l'unico concorso di tal genere nel Paese, dopo la riorganizzazione da parte di Matteucci nel 1863 e sotto la direzione di Betti la Scuola Normale divenne rapidamente un incubatore per matematici e fisici a orientamento matematico di talento e orientati alla ricerca. La sezione di scienze si concentrava sulla fisica e la matematica e virtualmente escludeva le scienze naturali. I corsi speciali per i Normalisti includeva formazione addizionale ed esercizi dati dagli stessi professori universitari che insegnavano nei corsi ordinari, oltre che dal tutore di scienze interno delle scuole. I Normalisti avevano molto più laboratorio di fisica e di chimica che gli studenti universitari ordinari, specialmente prima del 1876, e la formazione avanzata di matematica si concentrava frequentemente sulla ricerca corrente dei professori. Ai candidati per l'abilitazione, il diploma della Scuola Normale, era richiesto di preparare una dissertazione originale in aggiunta alla tesi di laurea che l'università richiedeva. Tra i laureati dell'università elencati nella Tabella 3.2 quattro dei sette fisici e tutti i nove i fisici matematici erano anche Normalisti. Metà dei Normalisti, Ròiti, Bongiovanni, Poloni, Pinto, Ricci, Somigliana

TAVOLA 3.2 – LAUREATI DI PISA IN FISICA E FISICA MATEMATICA, 1860-1882, CHE DIVENNERO
PROFESSORI UNIVERSITARI

			Prima sede			Ultima sede		
Cognome	Laurea	SNS	Cattedra	Ateneo	Data	Cattedra	Ateneo	Data
Villari	?		Fis.sper.	Bologna	1871	Fis. sper.	Napoli	1889
Pacinotti	1860		Fis.sper.	Cagliari	1873	Fis.tecn.	Pisa	1881
Ròiti	1868	SNS	Fis.sper.	Palermo	1878	Fis. sper.	Firenze	1880
Poloni	1872	SNS	Fis.sper.	Modena	1885			
Bartoli	1874	SNS	Fis.sper.	Catania	1886	Fis. sper.	Pavia	1893
Bongiovanni	1874	SNS	Fis.sper.	Ferrara	1885			
Murani	1876		Fis.sper.	Milano	1899			
Padova	1866	SNS	Mecc.raz.	Pisa	1872	Mecc.sup.	Padova	1882
Pinto	1869	SNS	Fis.mat.	Napoli	1880			
Donati	1871	SNS	Fis.tecn.	Bologna	1877	Fis. mat.	Bologna	1880
Padelletti	1871	SNS	Mecc.raz.	Palermo	1877	Mecc.raz.	Napoli	1879
Pennacchietti	1874	SNS	Mecc.raz.	Catania	1888			
Venturi	1875	SNS	Geodesia	Palermo	1887			
Ricci	1875	SNS	Fis.mat.	Padova	1880	Algebra	Padova	1890
Somigliana	1881	SNS	Fis.mat.	Pavia	1892	Fis.mat.	Torino	1904
Volterra	1882	SNS	Mecc.raz.	Pisa	1883	Fis.mat.	Roma	1900

TAVOLA 3.3. – FELICI, I SUOI STUDENTI E I LORO STUDENTI TITOLARI DI CATTEDRE UNIVERSITARIE
DI FISICA SPERIMENTALE E DI FISICA TECNOLOGICA

<u>Università Primarie</u>			
Bologna	Villari	1871-1889	Padova
	Donati	1877-1921	Roma
Napoli	Villari	1889-1904	Torino
Palermo	Ròiti	1878-1880	
Pavia	Bartoli	1893-1896	
	Salvioni	1904-1923	
Pisa	Felici	1856-1893	
	Pacinotti	1881-1912	
<u>Università Secondarie</u>			
Cagliari	Pacinotti	1873-1881	Genova
Catania	Bartoli	1886-1893	Parma
Messina	Salvioni	1898-1904	Sassari
	Corbino	1904-1908	Siena
Modena	Poloni	1885-1887	
<u>Istituti</u>			
Firenze	Ròiti	1880-1913	
Milano	Murani	1899-1928	
<u>Università Libere</u>			
Ferrara	Bongiovanni	1885-1918	Urbino
Perugia	Salvioni	1892-1898	

e Volterra non sarebbero ordinariamente andati a Pisa senza il concorso nazionale per borse di studio. Vivevano fuori dalla Toscana, dalla Lombardia nel nord (Poloni e Somigliana) alla Puglia nel tacco dello stivale (Pinto) o avevano bisogno di borse di studio per poter frequentare una qualunque università (Donati e Volterra).

Forse più della stessa Università di Pisa, la Scuola Normale riorganizzata incorporava gli ideali che avevano motivato Matteucci, Mossotti e Piria nel loro sforzo di stabilire una scuola di scienze fisiche a Pisa negli anni Quaranta. I Normalisti erano un piccolo gruppo selezionato di studenti che, grazie allo speciale programma della scuola, venivano introdotti ai metodi di ricerca e all'accurata analisi degli esperimenti necessari per un buon insegnamento. Sotto la guida congiunta di Felici, tutore interno di scienze dal 1853 al 1869 oltre che professore di fisica all'università, e di Betti, direttore della Scuola Normale dal 1864 e professore di fisica matematica all'università, studenti e successori rispettivamente di Matteucci e di Mossotti, i Normalisti di fisica avevano accesso a formazione e opportunità che legavano la fisica matematica e quella sperimentale, non disponibili in nessun'altra università italiana fin oltre il 1880.

Per valutare l'impatto della visione della fisica di Felici e specialmente del suo principale interesse di ricerca – l'elettrodinamica sperimentale – sul lavoro dei laureati di Pisa, esamineremo le loro prime ricerche. Diventerà evidente che è difficile separare le influenze relative di Felici e di Betti sui fisici sperimentali che si laurearono a Pisa, poiché entrambi enfatizzarono un approccio fortemente matematico ai problemi fisici. Felici fu, comunque, assai più scettico nei confronti dei modelli meccanici di Betti, che essenzialmente lavorò nel quadro della tradizione continentale della meccanica molecolare. Non è realistico limitare l'atra dell'influenza di Felici sul lavoro degli studenti all'elettrodinamica, ma ci fu meno lavoro sperimentale in elettrodinamica di quanto ci si sarebbe potuti aspettare. Ciò che anche emerge è il fatto che ci fu poca ricerca sperimentale di qualunque tipo fatta a Pisa da persone che più tardi divennero fisici sperimentali, eccetto per quei pochi abbastanza fortunati da essere nominati assistenti all'istituto di fisica. La maggior parte degli studenti di fisica a Pisa scrisse tesi su argomenti matematici che chiaramente derivavano da uno dei molti aspetti della ricerca di Betti. E anche quelli che fecero lavori sull'elettrodinamica sperimentale grazie al fatto di essere assistenti spesso pubblicarono altre ricerche su argomenti di interesse per Betti.

Il più vecchio di costoro, Emilio Villari (1836-1904), non un Normalista, conseguì una laurea in medicina verso il 1860 mentre studiava anche fisica con Felici. Villari non intraprese ricerche fino al 1864, quando trascorse l'intero anno a Berlino nel laboratorio di Gustav Magnus, ben noto come apostolo dell'esperimento e dell'osservazione e avversario della speculazione, inclusa la matematica. Le prime ricerche di Villari, sull'influenza della trazione meccanica sulla magnetizzazione del ferro e dell'acciaio, lo condussero alla scoperta dell'effetto noto con il suo nome, l'inversione di Villari, ovvero, il fatto che la suscettività magnetica del filo di ferro è aumentata dalla tensione meccanica quando la magnetizzazione è sotto un certo valore, ma è diminuita quando la magnetizzazione è aumentata oltre quel punto. Il punto critico di Villari è quel valore della magnetizzazione per il quale un certo carico non produce nessun effetto sulla suscettività.

Le prime ricerche di Villari erano concentrate sulle interrelazioni degli effetti elettrici, magnetici, meccanici e termici sui corpi materiali, come l'effetto della tensione meccanica sulla magnetizzazione e sulla suscettività magnetica, l'influenza della magnetizzazione sulla conduttività elettrica, o il calore sviluppato dall'effetto della tensione meccanica sulla gomma d'India. Di conseguenza il suo lavoro può essere collegato agli interessi di Felici per gli effetti elettrodinamici sui corpi reali. Il lavoro di Villari era tuttavia sia meno matematico sia più teorico (nel senso fenomenologico qualitativo) di quello di Felici. Antonio Ròiti, studente di Felici e amico di Villari, indicò specificamente la "mancanza di cultura matematica" che era evidente nel lavoro di Villari, e che serviva a spiegare sia la sua sfiducia nei risultati della teoria sia il suo

metodo, che prendeva “troppo letteralmente l’antico motto dell’Accademia del Cimento”, *provando e riprovando*.

Antonio Pacinotti (1841-1912) è usualmente ricordato come inventore, anche se fu professore di fisica all’istituto tecnico di Bologna e in seguito all’Università di Cagliari dal 1873 al 1881, quando successe al padre sulla cattedra di fisica tecnologica di Pisa. Mentre era ancora uno studente a Pisa, dal 1858 al 1860, inventò il suo anello, nel corso della propria ricerca di un generatore di corrente continua che desse un’uscita più stabile di quelli allora disponibili. Egli pubblicò la descrizione del suo modello di macchina elettromagnetica sul *Nuovo Cimento* del 1864. Nel 1869 il belga Zénobe Gramme prese un brevetto francese (e brevetti inglesi e italiani nel 1870) per un’armatura molto simile per una dinamo, che fu descritto nei *Comptes rendus* del 17 luglio 1871. A differenza di Pacinotti Gramme ebbe l’idea di costruire dinamo commerciali e così gli fu dato largo credito per l’armatura ad anello. Pacinotti ricevette qualche riconoscimento tardivo con l’attribuzione di una medaglia all’Esposizione di Vienna del 1873, e all’Esposizione Elettrica Internazionale di Parigi del 1881, dove fece un intervento introdotto dal delegato italiano Gilberto Govi.

Oltre la macchina elettromagnetica con l’armatura ad anello Pacinotti inventò indipendentemente anche una macchina dinamolettrica con avvolgimento a disco e una con avvolgimento a tamburo. Entrambi questi assetti furono brevettati altrove in Europa anche prima che le sue descrizioni degli stessi fossero pubblicate. Le sue altre ricerche iniziali comprendevano due articoli sulle correnti elettriche generate dal calore e dalla luce nei primi anni Sessanta e diversi articoli su strumenti e macchine elettriche e sulle correnti indotte negli anni Settanta. Mentre Pacinotti non fu molto produttivo, egli comprese chiaramente la teoria della sua macchina elettromagnetica con l’armatura a d anello, poiché fece esperimenti al fine di svilupparne la teoria matematica ed incluse le extracorrenti dei commutatori nei suoi calcoli – una comprensione che Gramme probabilmente non aveva. Felici può ben avere influenzato il modo in cui Pacinotti sperimentò con la propria macchina una volta che l’ebbe inventata; a parte ciò e a parte un interesse generale per l’induzione, che Pacinotti potrebbe aver ricavato altrettanto bene da suo padre Luigi, che pubblicò alcune ricerche elettriche negli anni Quaranta, sembra esserci poca relazione tra il lavoro di Pacinotti e quello di Felici.

Olinto Cocchi fu probabilmente il primo assistente di Felici dopo che questi divenne professore ordinario nel 1859. L’unica informazione biografica disponibile su Cocchi indica che funse da assistente almeno dal 1860 e fino al 1868. Pubblicò un articolo nel primo volume del *Nuovo Cimento* nel 1855 sull’impatto di una corrente fluida su una superficie piana, e una serie di cinque rapporti a metà degli anni Sessanta su osservazioni meteorologiche fatte nel Gabinetto. Nessuna menzione di Cocchi è fatta nei resoconti disponibili sul lavoro di Felici o del Gabinetto di Pisa.

Antonio Ròiti (1843-1921) fu l’assistente di Felici dal 1868, l’anno in cui conseguì la laurea, al 1871, e ottenne l’abilitazione dalla Scuola Normale nel 1871. Ròiti presenta qualche problema in quest’analisi. Prima di tutto, egli chiese che alla sua morte non ci fossero commemorazioni, una richiesta che sembra sia stata assolutamente onorata. In secondo luogo, la sua tesi e i suoi primi lavori pubblicati nel 1871 e nel 1872 erano studi sperimentali altamente matematici del moto dei liquidi e dei fenomeni capillari, piuttosto che di elettrodinamica, anche se era assistente di felici. Ma il primo lavoro pubblicato di Felici nel 1844 era un’analisi critica del suggerimento da parte di Durochet di una nuova forza per spiegare alcuni fenomeni di coesione, e nel 1866 egli pubblicò un secondo articolo riferito all’argomento, riportando alcuni esperimenti sulle superficie di capillarità. A parte ciò, nello stesso anno 1866 Betti pubblicò un articolo sulla teoria matematica della capillarità, e altri due l’anno successivo. Un interesse per i fenomeni capillari sia dal lato sperimentale, sia dal lato matematico era quindi assai appropriato per uno studente di Pisa. Questa precoce esposizione può aver condotto all’interesse continuato di Ròiti per i liquidi, poiché egli pubblicò un

lungo articolo sulla viscosità nei liquidi nel 1878. Il lavoro successivo di Ròiti, pubblicato nel 1873 sul *Nuovo Cimento* e negli *Annalen der Physik* di Poggendorff, portava il titolo provocatorio "Se la corrente elettrica possa essere una corrente di etere". L'esperimento era una variazione del famoso esperimento di Fizeau sul trascinamento dell'etere. In esso Ròiti utilizzò un apparato interferometrico di Arago con soluzioni elettrolitiche attraverso le quali la corrente poteva passare in direzioni opposte. Egli non trovò alcuno spostamento delle frange di luce quando veniva fatta passare corrente e concluse che la corrente elettrica non era uno spostamento dell'etere. Erik Edlund, professore di fisica all'Accademia Svedese delle Scienze, nel volume successivo degli *Annalen* di Poggendorff fece riferimento alla "inammissibilità" dei ragionamenti di Ròiti. Nel 1874 e nel 1875 Ròiti pubblicò due articoli che chiaramente indicavano la sua adesione al lavoro di Felici sull'induzione elettrodinamica, sebbene di nuovo Felici avesse pubblicato soltanto un articolo specificamente sull'argomento: il solenoide neutro o chiuso. Ròiti usò e migliorò i risultati di questi studi sperimentali e teorici sull'induzione nella propria determinazione del valore assoluto dell'ohm nel 1884. Verso la fine degli anni Settanta egli pubblicò anche tre lavori sulla teoria molecolare della velocità del suono, e due su esperimenti con una macchina di Holtz. Le prime ricerche di Ròiti derivavano congiuntamente dagli interessi di Betti e di Felici sulla capillarità e mostrano la sua padronanza dell'intero apparato matematico dell'idrodinamica e della teoria del potenziale. I suoi lavori successivi tendevano a essere meno pesantemente matematici. Quelli sull'induzione e sulla misura assoluta dell'ohm avevano un chiaro debito con Felici, mentre quelli nei campi della teoria cinetica e dell'elettrochimica non avevano chiare sorgenti d'ispirazione a Pisa.

Il successore di Ròiti come assistente nel Gabinetto di Fisica a Pisa fu Luigi Donati (1846-1932), che si laureò nel 1871, ebbe l'abilitazione alla Scuola Normale nel 1873, ed ebbe il ruolo di assistente dal 1871 al 1876. Egli divenne professore di fisica tecnologica nella nuova scuola d'ingegneria di Bologna nel 1877 e insegnò anche fisica matematica nella locale facoltà di scienze dal 1879. Le prime ricerche di Donati erano perfettamente al centro degli interessi di Felici. Consistevano nelle investigazioni sperimentali delle forze elettromotrici delle correnti indotte (la sua tesi) e delle stesse correnti variabili, entrambe pubblicate nel 1873. Un breve articolo pubblicato l'anno successivo riguardava lo smorzamento delle oscillazioni di un elettrometro di Thomson. Il suo primo articolo, pubblicato nello stesso anno in cui si laureò, era una rivista di un recente articolo di Helmholtz sulla teoria matematica dell'elettromagnetismo. Tutti questi articoli furono pubblicati sul *Nuovo Cimento*; anche la sua tesi fu pubblicata negli *Annali* della Scuola Normale, un onore. Donati sembra aver usufruito pienamente delle opportunità presenti a Pisa sia per la teoria che per l'esperimento. Egli mantenne il proprio interesse per l'elettrodinamica matematica e sperimentale, anche se a un livello meno produttivo, quando si orientò verso l'ingegneria elettrica negli anni Ottanta sotto l'influenza della sua nuova posizione. Pubblicò due memorie sui campi vettoriali nel 1897, un'altra nel 1901, e un'esposizione completa della teoria di Maxwell nel 1909. Pubblicò anche un corso in due volumi di lezioni di fisica matematica nel 1899 e un'esposizione matematica della teoria della relatività ristretta nel 1922, l'anno in cui Einstein visitò Bologna. Il grosso delle sue ricerche dopo il 1880 fu su problemi di ingegneria elettrica, anche se nei primi anni a Bologna quando era privo di un laboratorio egli produsse tre sostanziali memorie sulla teoria matematica dell'elasticità, uno dei principali interessi di Betti.

Giuseppe Poloni (1851-1887), collaboratore di Donati in un progetto di ricerca, era uno studente della Scuola Normale, si laureò nel 1872, e ottenne l'abilitazione nel 1873. Dopo aver insegnato nei licei di Catania, Pavia e Palermo, e all'istituto tecnico di Milano dopo il 1878, Poloni divenne professore di fisica a Modena nel 1885, appena un anno prima della sua morte nel gennaio 1887. Ad eccezione di due brevi articoli sulla capillarità (secondario interesse pisano) pubblicati nel 1879 e nel 1880, e di due lavori su nuovi metodi per determinare le conduttività termiche relative e assolute dei fili metallici, pubblicati nel 1882 e nel 1886, tutto il resto dei quattordici articoli di Poloni era su varie questioni di elettromagnetismo. Il suo

primo lavoro fu pubblicato insieme con il suo compagno di studi Adolfo Bartoli (di cui si riparlerà in seguito) nel 1871, prima che entrambi avessero completato il corso di studi; era un breve esame di un aspetto dell'elettrolisi. (Bartoli continuò le ricerche elettrolitiche; Poloni non lo fece.) Il secondo lavoro di Poloni era un'analisi matematica della distribuzione delle correnti in alcuni corpi di forma determinata, pubblicato nel 1874 sul *Nuovo Cimento*, come lo fu la maggior parte dei suoi lavori, anche quelli pubblicati nei rendiconti o nelle memorie dell'Istituto Lombardo o dell'Accademia dei Lincei. Questa ricerca fu seguita nel 1882 da una verifica sperimentale dei risultati predetti. L'estesa ricerca congiunta di Poloni con Donati sulla magnetizzazione temporanea di una sbarra di ferro, pubblicata nel 1875, condusse a un progetto collegato sulla magnetizzazione permanente dell'acciaio a varie temperature, su cui pubblicò tre articoli. Uno di questi ottenne un riconoscimento d'incoraggiamento da parte dell'Accademia dei Lincei nel concorso per il premio del Ministero della Pubblica Istruzione nel 1881; in quel concorso non fu attribuito nessun premio. Poloni investigò poi le conduttività termiche ed elettriche dei fili metallici e le loro relazioni con le elasticità dei fili. Nel 1884 pubblicò un testo sull'elettricità e il magnetismo nella ben nota serie dei manuali Hoepli. Pubblicò anche nel 1878 un breve corso di lezioni elementari sulla teoria chimica per l'uso nei licei. Poloni sembra esser stato uno sperimentatore accurato e un teorico competente ma non innovativo. Il suo successivo lavoro sul magnetismo permanente piuttosto che indotto e sulle conduttività termiche piuttosto che su quelle elettriche indica che stava allontanandosi dalle ricerche enfatizzate a Pisa.

Adolfo Bartoli (1851-1896), collaboratore di Poloni in quello che fu per entrambi il primo articolo pubblicato, fu enormemente produttivo, avendo pubblicato in venticinque anni più di sessanta articoli a proprio nome e circa sessanta congiuntamente con uno o più colleghi. Studente della Scuola Normale a Pisa, si laureò nel 1874 e ottenne l'abilitazione nello stesso anno, poi fu assistente di Villari a Bologna per due anni, succedendo a Righi, che era passato al locale istituto tecnico). Dopo aver insegnato per due anni all'istituto tecnico di Arezzo in Toscana, dove mise in piedi un osservatorio meteorologico, e per meno di un anno all'Università di Sassari in Sardegna, fece ritorno in Toscana per succedere a Ròiti come professore di fisica all'istituto tecnico di Firenze, dove aveva insegnato anche Villari. Questa istituzione aveva un gabinetto di fisica ben equipaggiato, meglio che in molte università a quell'epoca, sostenuto dalla provincia piuttosto che dal governo nazionale. Bartoli vi stette fino al 1886, perfino declinando di accettare la cattedra di fisica matematica a Palermo in Sicilia, per la quale aveva vinto il concorso nel 1880. Nel 1886 divenne professore di fisica all'Università di Catania, sempre in Sicilia, dove egli accolse lo studente liceale Orso Mario Corbino nel proprio laboratorio e ne determinò la carriera. Nel 1893 fu chiamato a succedere a Cantoni a Pavia in Lombardia, sulla cattedra che era stata di Volta. Morì meno di tre anni più tardi all'età di quarantacinque anni.

Bartoli è oggi ricordato (anche nel mondo anglosassone) per un lavoro giovanile che egli pubblicò a Firenze nel 1876 sui moti prodotti dalla luce e dal calore, che conteneva una considerazione del radiometro di Crookes. Quest'articolo conteneva un resoconto storico dei punti di vista sulla pressione delle radiazioni luminose e termiche, oltre che un'investigazione sperimentale e teorica del radiometro di Crookes, nella quale Bartoli dimostrava "forse per la prima volta" che il moto delle palette non era dovuto alla pressione di radiazione ma al comportamento del gas residuo. Il nucleo del lavoro era la dimostrazione teorica di Bartoli, mediante un esperimento ideale, che il secondo principio della termodinamica sarebbe stato violato se non fosse stato necessario lavoro per comprimere un volume di radiazione in una cavità perfettamente riflettente. Un'interpretazione che Bartoli offrì di questo risultato era il fatto che la radiazione esercitava una pressione sulle pareti della cavità, ma poiché i suoi esperimenti non poterono confermare l'esistenza di questa pressione, egli avanzò quest'ipotesi con diffidenza e promise di discutere in un altro articolo varie altre ipotesi che avrebbero condotto allo stesso risultato. Nel 1883 Boltzmann combinò gli argomenti termodinamici di Bartoli con la teoria elettromagnetica di Maxwell, che non aveva

giocato alcun ruolo nelle considerazioni di Bartoli, al fine di fornire una derivazione teorica della legge sperimentale di Josef Stefan che stabiliva la proporzionalità dell'energia radiante emessa da un corpo nero alla quarta potenza della temperatura assoluta.

I primi lavori di Bartoli non rivelarono alcun tema coerente fino al 1877, quando egli iniziò una serie di studi sistematici sulla polarizzazione galvanica e la sua influenza sull'elettrolisi usando deboli forze elettromotrici. Questo lavoro gli fruttò il Premio Aldini di 1000 lire offerto dall'Accademia delle Scienze di Bologna nel 1879 e l'anno successivo il premio di 3000 lire del Ministero della Pubblica Istruzione, gestito dall'Accademia dei Lincei. Oltre a iniziare una lunga serie di studi di elettrochimica, specialmente concernenti la sintesi organica mediante l'elettrolisi, questo lavoro condusse Bartoli a sviluppare una teoria della costituzione degli elettroliti, pubblicata nel 1882-83, che alcuni dei suoi biografi sostengono essere "sostanzialmente la stessa" di quella di Svante Arrhenius, non pubblicata fino al 1887.

Bartoli era meglio conosciuto al suo tempo per i suoi studi di calorimetria, che iniziarono nel 1880 con una misura dell'equivalente meccanico del calore con un nuovo metodo. Molti di questi esperimenti furono condotti in collaborazione con Enrico Stracciati, un laureato del 1882 della Scuola Normale, a Firenze e Catania e forse anche a Pavia, così come Bartoli aveva collaborato con Giorgio Papasogli, assistente di chimica all'Istituto di Studi Superiori di Firenze, in molti dei propri studi sull'elettrolisi. Il lavoro calorimetrico includeva nuove misure ad alta precisione dei calori specifici di vari liquidi e metalli, e misure del calore solare e dei suoi effetti. Per questo lavoro Bartoli ottenne il Premio Reale dell'Accademia dei Lincei per la fisica per il 1894, annunciato soltanto nel 1897, dopo la sua morte.

Non sembra esserci un precedente a Pisa per il lavoro di Bartoli sulla calorimetria, né nella ricerca di Felici, né in quella di Betti o del professore di chimica, poiché Paolo Tassinari non aveva pubblicato nulla dalla metà egli anni Cinquanta, quando apparve sul *Nuovo Cimento* la sua intera produzione di due lavori, uno sulla sintesi organica e uno sulla chimica forense. Per il lavoro di Bartoli sull'elettrolisi e l'elettrochimica c'era un precedente. Felici aveva pubblicato un articolo nel 1851 sulla polarizzazione galvanica e sull'influenza del calore sul passaggio della corrente elettrica attraverso i liquidi. Tuttavia Ròiti ricordò nel proprio necrologio di Felici di non essere stato a conoscenza di questo articolo. Egli era assistente di Felici fino al 1871, all'epoca in cui Bartoli e Poloni fecero il loro primo lavoro sull'elettrolisi, pubblicato nel 1871. Non è quindi chiaro se il lavoro di Felici, vecchio di vent'anni, avesse fornito alcuna direzione o ispirazione a Bartoli. Questo dubbio certamente impedisce di porre l'elettrolisi tra i campi di una possibile tradizione di ricerca nella fisica sperimentale a Pisa.

Merita notare che il lavoro di Bartoli sulla termodinamica della radiazione fu fatto mentre egli era assistente di Villari a Bologna, e che Villari pubblicò un lungo articolo tre anni più tardi, alla fine del 1877, sull'emissione di differenti tipi di radiazione da corpi differenti scaldati a 100 C. (Villari s'impegnò in una disputa per la priorità con Ferdinand Kurlbaum nel 1900 sul credito per questo tipo di ricerca, che Kurlbaum aveva pubblicato indipendentemente nel 1898.) Per di più Ròiti, che era a Firenze dopo il 1880 (Bartoli vi fu all'istituto tecnico dal 1878 al 1886), pubblicò diversi articoli sia sull'elettrochimica sia sulla calorimetria. Il centro per il lavoro calorimetrico negli anni Settanta in Italia era Padova, come risulterà chiaro in seguito.

Se i vampi di ricerca di Bartoli non derivarono dall'interesse principale di Felici per l'elettrodinamica o dagli interessi di altri professori di Pisa, alcuni elementi dello stile del lavoro sulla radiazione assomigliano a quelli di Felici. Questo lavoro contiene sezioni sia sperimentali sia teoriche, e nelle sezioni teoriche l'argomento era sviluppato con il dovuto scetticismo verso le ipotesi meccaniche. Il suggerimento della pressione di radiazione come modo per evitare di violare il secondo principio della termodinamica era presentato con grande riserva. In un manoscritto depositato all'Accademia dei Lincei nel 1882, Bartoli offriva altre tre ipotesi in aggiunta alla pressione di radiazione che potevano render conto del risultato puramente

termodinamico che era richiesto lavoro per comprimere radiazione contenuta in una cavità nel suo esperimento pensato. Quando egli pubblicò queste ipotesi come appendice all'articolo del 1884 sul calore radiante e sul secondo principio della termodinamica, tuttavia, egli premise l'osservazione che alcune non erano molto probabili ed erano quindi di interesse più storico che scientifico.

Ci sono altri tre futuri professori universitari di fisica sperimentale tra i laureati di Pisa in questo periodo. Giuseppe Bongiovanni (1851-1918) probabilmente si laureò nel 1873; egli ricevette il suo diploma dalla Scuola Normale nel 1874. Insegnò nei licei per tutta la vita, prima quello di Aquila in Abruzzo, poi dal 1877 a Ferrara. Nel 1885 egli divenne anche professore straordinario di fisica alla libera Università di Ferrara e ivi direttore dell'osservatorio meteorologico. A quel tempo Ferrara aveva pochissimi docenti di scienze e forniva soltanto i programmi per la licenza (i corsi dei primi due anni). Bongiovanni non pubblicò fino al 1885, quando apparve il primo di due articoli sui moti di corpi pesanti. In seguito pubblicò alcuni articoli di ricerca, poche lezioni, inclusa una sulla teoria elettromagnetica della luce nel 1891, e un testo in due volumi su elettricità e magnetismo. Doveva essere ricordato principalmente per le sue ricerche di meteorologia e sismologia, e per gli studi sul clima di Ferrara.

Oreste Murani (1853-1937) conseguì la laurea nel 1876; non era un Normalista. Insegnò poi negli istituti tecnici di Chieti, Aquila, e dal 1886 al 1908 in quello di Milano. Nel 1887 Francesco Brioschi, direttore dell'Istituto Tecnico Superiore di Milano, gli diede l'incarico di insegnare l'introduzione alla fisica nella sezione preparatoria. Tenne anche corsi di ottica e di termodinamica. Fu nominato professore straordinario di fisica sperimentale nel 1899 e professore ordinario nel 1908; ciò gli consentì di lasciare la posizione all'istituto tecnico. La prima pubblicazione di Murani venne cinque anni dopo che si fu laureato, nel 1881; era un'esposizione dei principi elementari del lavoro meccanico e della termodinamica. Il suo lavoro successivo era di elettrochimica, sulle forze elettromotrici di contatto nei liquidi, un libretto pubblicato nel 1885. A Milano iniziò ricerche sulle scintille e le scariche, e intraprese lo studio delle onde Hertziane nei primi anni Novanta, come fecero molti altri. Il suo studio teorico e sperimentale dei parafulmini ottenne il Premio Cagnola dell'Istituto Lombardo nel 1893. Né il lavoro di Bongiovanni né quello di Murani sembra essere stato influenzato da Felici o da nessun altro a Pisa.

Gli scienziati che abbiamo preso in esame divennero tutti professori universitari di fisica sperimentale o tecnologica. Questo fatto dovrebbe testimoniare la loro abilità, sebbene il caso di Bongiovanni a Ferrara sia in qualche modo anomalo. È anche diventato chiaro che l'influenza di Felici sulla scelta dei campi di ricerca da parte di costoro non fu affatto profonda, anche se diversi assorbirono la sua cautela sulle ipotesi e la sua enfasi sul combinare investigazioni matematiche e sperimentali. La discussione del loro lavoro rivela tuttavia gli elementi di due schemi che emergeranno più nettamente nell'esame degli assistenti e degli studenti successivi, quelli degli ultimi quindici anni di Felici come professore. Il primo di questi schemi è quello per un argomento di tesi dello studente derivava principalmente dagli interessi di ricerca correnti di Betti piuttosto che da quelli di Felici. L'esperienza di Ròiti fornisce solo un suggerimento di questo schema, poiché i suoi lavori sulla capillarità e sui moti dei liquidi derivavano congiuntamente dalle ricerche matematiche di Betti e dal lavoro sperimentale di Felici. Gli studenti successivi forniranno molti esempi. Il secondo schema, meno ovvio a questo punto, è il fatto che i soli fisici pisani che partecipavano a una tradizione di ricerca in elettrodinamica sperimentale erano gli assistenti, essendo finora Donati l'unico esempio. Sembra che soltanto agli assistenti fossero forniti i mezzi per una ricerca personale. Mentre Felici certamente offriva le esercitazioni pratiche richieste per gli studenti avanzati e per gli studenti della Scuola Normale, egli non li incoraggiava a sperimentare per conto loro né offriva loro le attrezzature per farlo, e questo a dispetto del requisito di una tesi di abilitazione alla Scuola Normale a partire dal 1864 e di una tesi di laurea all'università a partire dal 1882 a livello nazionale, e probabilmente dal 1875 a Pisa. Abbiamo individuato un solo caso di ricerca sperimentale prima della laurea, quello di Poloni e Bartoli nel 1871, tra

tutte le informazioni disponibili su studenti e assistenti fino al 1893. Tutte le tesi sembrano essere fortemente matematiche e collegate piuttosto direttamente agli interessi di Betti, eccetto quelle degli assistenti. Le ricerche sperimentali erano effettuate dagli assistenti o in collaborazione con gli assistenti, anche quelle offerte come elaborati per l'abilitazione, come nel caso di Donati e in quello di Bazzi, descritto nel seguito. C'è evidenza a supporto di quest'asserzione da un necrologio di Luigi Pinto, che si laureò e ottenne l'abilitazione nel 1869. La commemorazione fu scritta da Michele Cantone, che era egli stesso un fisico sperimentale orientato matematicamente senza connessioni con Pisa. Cantoni suggerì che Pinto si era rivolto alla matematica invece che alla fisica o a causa dei fondi limitati disponibili per i gabinetti sperimentali o in quanto

“Felici non si mostrava disposto ad aprire le porte del laboratorio a studenti poiché, a dispetto dei grandissimi meriti di quest'uomo come insegnante e scienziato, egli era in qualche misura scettico sul beneficio che i giovani potevano derivare dalle esercitazioni pratiche, e pertanto in quel rigoglioso centro di studi, e per quel che vale in altre università italiane, un vero indirizzamento alle ricerche fisiche era assente.”

È interessante il fatto che quasi tutti questi studenti di fisica che scrissero tesi di fisica matematica si volsero a ricerche sperimentali appena ne ebbero l'opportunità – ricerche sperimentali che non erano in alcun modo tutte sull'elettrodinamica, come non ci si doveva aspettare che fossero. Sembrerebbe che questi giovani sapessero che volevano essere sperimentatori ma non venisse loro offerta l'opportunità finché erano a Pisa. Ci occuperemo ora dei successivi assistenti e studenti di fisica a Pisa, quelli che furono i prodotti dell'ultima decade e mezzo di Felici come professore.

Eugenio Bazzi fu presumibilmente il successore di Donati come assistente di Felici; abilitato dalla Scuola Normale nel 1877, fu in ruolo almeno dal 1878, se non dal 1876, fino al 1888. Egli passò poi all'insegnamento secondario e passò la maggior parte del resto della propria carriera all'istituto tecnico di Firenze, almeno dal 1891 al 1911. Il *Royal Society Catalogue* elenca nove articoli del solo Bazzi e un articolo in collaborazione, scritto con Giuseppe Cobianchi, suo compagno di corso a matematica alla Scuola Normale. Tutti questi lavori eccetto uno furono pubblicati mentre Bazzi era assistente a Pisa. Diversi di questi articoli erano connessi ad argomenti didattici, per esempio un apparato per la composizione grafica delle oscillazioni di un pendolo (1887), o un metodo per mostrare la legge d'oscillazione di una corda vibrante (1887). Altri tre erano sulla meccanica dei fluidi, sulle onde nei fluidi (1879), su un freno idraulico per un apparato dimostrativo (1886) e sulla fotografia di una corrente fluida (1886). I tre articoli più lunghi, incluso quello in collaborazione, erano studi sperimentali delle correnti indotte. Uno di questi, probabilmente tratto dalla sua tesi, era uno studio dello spostamento delle linee equipotenziali osservato in un disco metallico rotante attraverso il quale stava passando corrente, pubblicato negli *Annali* della Scuola Normale nel 1888. Il secondo era un'investigazione del calore sviluppato da una corrente durante il suo periodo variabile, pubblicato nelle *Memorie* dell'Accademia dei Lincei nel 1882. Il primo di questi articoli, pubblicato sul *Nuovo Cimento* nel 1878, era l'impegno congiunto con Cobianchi (che ottenne una seconda laurea, in fisica, nel 1886), uno studio dello sviluppo di correnti indotte ed extracorrenti. Dopo che ebbe lasciato Pisa, Bazzi pubblicò soltanto un lavoro, un articolo semidivulgativo sulla trasmissione senza fili.

Collega di Bazzi come assistente per parte del suo incarico fu (Francesco) Rinaldo Pitoni, che probabilmente ottenne la propria laurea nel 1885 e tenne la nuova seconda posizione di assistente dal 1886 al 1890. Pitoni pubblicò quattro articoli mentre era assistente e poi nessuno registrato negli anni Novanta. La sua ricerca a Pisa fece seguito al lavoro di Bazzi sulle linee equipotenziali in un disco metallico rotante; Pitoni introdusse un polo magnetico ed esaminò i cambiamenti prodotti. Questi articoli furono pubblicati sul *Nuovo Cimento* nel 1887 e nel 1888. Egli pubblicò anche un rapporto sui risultati di osservazioni meteorologiche effettuate nel gabinetto di fisica dal 1867 al 1888 nei rendiconti della Società Toscana di Scienze Naturali. In seguito

Pitoni insegnò nei licei di Correggio, Livorno e Torino e scrisse una popolare storia della fisica fino a poco prima della Prima Guerra Mondiale.

Gli ultimi due assistenti che Felici ebbe prima del pensionamento furono Ezio Crescini e Antonio Bartorelli. Crescini si laureò probabilmente nel 1889 ed ebbe il ruolo di primo assistente fino al 1893. In seguito insegnò nei licei di Palermo e Torino. Pubblicò un articolo nel 1889, probabilmente tratto dalla sua tesi, sul moto di una sfera che ruota su un piano fisso. Bartorelli si laureò nel 1890, fu assistente dal 1891 al 1893 e primo assistente (sotto il successore di Felici, Battelli) dal 1893 al 1896. Non pubblicò nulla mentre era a Pisa, anche se produsse un articolo nel 1900 sul comportamento dell'alluminio come elettrodo, e diversi altri negli anni Venti. Insegnò negli istituti tecnici a Piacenza e più tardi a Parma, dove divenne assistente nell'osservatorio e insegnò matematica agli studenti di chimica e di scienze naturali per incarico.

Il contrasto tra le attività di ricerca e le carriere di questi quattro successivi assistenti, specialmente degli ultimi due, con i precedenti, Ròiti e Donati, che ottennero cattedre universitarie rispettivamente dopo dieci e cinque anni dopo essersi laureati, colpisce. Felici stesso aveva cessato di fare ricerca a metà degli anni Settanta, circa all'epoca in cui Donati lasciò Pisa per la sua prima posizione. Sorge allora la domanda se gli studenti di fisica a Pisa erano declinati in risultati o aspirazioni negli ultimi dieci o quindici anni del ruolo di Felici come professore. La risposta sembra essere no. In effetti i risultati degli studenti superarono quelli degli assistenti in questo periodo.

Finora siamo stati in grado di identificare ventisette laureati in fisica a Pisa tra il 1878 e il 1893, l'anno in cui Felici andò in pensione. Uno di questi è il celebre fisico matematico Vito Volterra, che tratteremo in seguito. Degli altri ventisei, tre sono gli ultimi tre assistenti, Pitoni, Crescini e Bartorelli, considerati in precedenza. Dei restanti ventitré, solo otto non pubblicarono nulla nei dieci anni successivi al conseguimento della laurea. Uno di questi, Francesco Piola (1865-1926), fu per un anno assistente di Ròiti a Firenze, insegnò per circa venti anni negli istituti tecnici, e infine successe a Donati come professore di fisica tecnologica a Bologna. Piola pubblicò circa trentacinque articoli, iniziando tuttavia nel 1902, quattordici anni dopo essersi laureato. Altri quattordici dei ventitré laureati pubblicarono almeno quattro articoli nei dieci anni dopo essersi laureati, e sei di loro pubblicarono otto o più articoli in quei primi dieci anni.

Alcune di queste pubblicazioni erano probabilmente tratte dalle tesi di questi studenti, e la maggior parte di queste tesi sembra essere matematica piuttosto che sperimentale. Malgrado l'enfasi sull'aspetto matematico dell'approccio di Felici alla fisica, non lo si può definire un fisico matematico. Si ha l'impressione che con poche eccezioni molto significative (Volterra nel caso di Pisa) le tesi per la laurea in fisica dovessero essere sperimentali, o avere una significativa componente sperimentale, come per esempio nel caso di quella di Pitoni sull'induzione elettromagnetica in un disco rotante come risultato di un polo magnetico nelle sue vicinanze. Si ha anche l'impressione che con pochissime eccezioni (di nuovo Volterra) i potenziali fisici matematici si laureassero in matematica piuttosto che in fisica dopo il 1876. (Prima del 1876 la laurea in "matematica" poteva esser stata in matematica pura o in scienze matematiche e fisiche.) Queste impressioni possono ben derivare da un periodo successivo che si estende fino agli anni Venti, quando a Pisa Enrico Fermi sentiva di dover fare una tesi sperimentale per una laurea in fisica. A Roma nel 1900, e probabilmente già da molto tempo prima, la ricerca per la tesi in fisica doveva essere "preferibilmente" sperimentale. Può non essere appropriato estrapolare questi fatti indietro fino agli anni Ottanta. Tuttavia diversi tra questi studenti di Pisa, il cui successivo lavoro era nettamente sperimentale, fecero tesi matematiche, alcune delle quali furono perfino pubblicate nella ben nota rivista di Battaglini per studenti e insegnanti di matematica, il *Giornale di matematiche*. Esempi di questo fenomeno sono Annibale Stefanini, il cui primo articolo era sul movimento di diverse sfere in un fluido incompressibile indefinito; Bernardo Paladini, la cui tesi era sul moto rotazionale che un corpo, nel vuoto o in un fluido incompressibile, intraprenderebbe se sottoposto a particolari potenziali, e fu pubblicata negli *Annali* della Scuola Normale;

Enrico Boggio-Lera (1862-1956), la cui tesi era sulla cinematica dei mezzi continui e fu anch'essa pubblicata negli *Annali* della Scuola Normale; Carlo Bonacini (1867-1944), il cui articolo sul moto di un punto attratto da due centri fissi secondo la legge di Newton (una versione del problema a tre corpi) fu pubblicato in parti sul *Giornale* di Battaglini; e Adolfo Campetti (1866-1947), il cui articolo sulla distribuzione delle correnti su superficie fu anch'esso pubblicato sul *Giornale* di Battaglini. Tutti costoro si volsero rapidamente alla ricerca sperimentale. Un altro di questi ultimi studenti di Felici prese una strada diversa. Giuseppe Picciati (1868-1908) si laureò in fisica nel 1890 con una tesi sull'equilibrio e i moti infinitesimi di superficie flessibili inestensibili, pubblicata nel *Giornale* di Battaglini. Dopo essere stato per due anni assistente di Volterra, all'epoca professore di meccanica razionale, Picciati ottenne una posizione di insegnante a Venezia e prese una seconda laurea, in matematica, nella vicina Padova nel 1895. Egli lavorò sulle trasformazioni delle equazioni della dinamica, dell'elettrodinamica matematica e dell'idrodinamica, e vinse un concorso per la cattedra di meccanica razionale a Bologna pochi mesi prima di morire. Picciati fu l'unico di questi studenti di fisica, a parte Volterra, che divenne un matematico.

Oltre la loro formazione matematica abbastanza inusuale e il loro impegno di ricerca abbastanza industrioso, molti di questi laureati di Pisa ebbero decenti opportunità di carriera in quello che stava diventando un mercato del lavoro sempre più ristretto. Dei ventisette laureati, solo otto trascorsero tutta la loro carriera insegnando nelle scuole. Tredici furono assistenti, almeno brevemente, inclusi Pitoni, Crescini e Bartorelli. Almeno sette insegnarono nelle università per incarico, e quattro a un certo punto ottennero cattedre universitarie, Piola e Picciati sopra menzionati, Volterra che sarà discusso in seguito e Campetti, che ebbe cattedre a Sassari, Siena, Catania e Pavia dal 1920 fino al pensionamento nel 1936.

Sembra esserci poca evidenza di una tradizione di ricerca nell'elettrodinamica sperimentale a Pisa sotto l'influenza di Felici, salvo tra gli assistenti. Ma ci fu una curiosa concentrazione di interesse su termodinamica, calorimetria e teoria cinetica nei primi lavori dei laureati in fisica di Pisa. Si è già segnalato l'importante lavoro di Bartoli sulla termodinamica della radiazione, così come le sue successive estensive ricerche di calorimetria. La prima pubblicazione di Oreste Murani, cinque anni dopo essersi laureato nel 1876, fu un libro sui principi elementari del lavoro meccanico e della termodinamica. Enrico Stracciati, abilitato dalla Scuola Normale nel 1882, a quanto pare divenne l'assistente di Bartoli all'istituto tecnico di Firenze e poi passò a una posizione di insegnamento all'istituto tecnico di Catania quando Bartoli passò alla locale università nel 1886. Egli collaborò con Bartoli in circa trenta articoli sulla calorimetria e la termometria dopo il 1884. Alessandro Sandrucci, che probabilmente si laureò nel 1884, pubblicò prima del 1889 dieci articoli (tre di natura semidivulgativa) sulla teoria cinetica dei gas e la sua relazione con la termodinamica. Enrico Boggio-Lera, che si laureò nel 1890, cominciò a pubblicare sulla teoria cinetica della materia e sulle leggi dei gas nel 1890. E il primo articolo di Carlo Del Lungo, pubblicato nel 1891, l'anno dopo quello in cui si laureò, era sui vapori saturi, ed egli pubblicò diversi altri articoli sulla calorimetria e sulla teoria cinetica nei pochi anni successivi.

Gli interessi di Felici non rendono conto del fatto che diversi dei suoi studenti divennero interessati alla termodinamica e alla teoria cinetica negli anni Ottanta e nei primi anni Novanta. Un esame delle pubblicazioni di Betti rivela che egli può essere una sorgente principale per questo interesse, come era stato il caso dell'ispirazione per il lavoro di Ròiti sulla capillarità alla fine degli anni Sessanta. Betti pubblicò tre articoli nel 1868 sulla propagazione del calore nei corpi solidi omogenei e disomogenei, e un altro nel volume in onore di Domenico Chelini nel 1881. In quattro articoli pubblicati tra il 1880 e il 1888 Betti studiò le proprietà termodinamiche di una massa isolata di gas e di un sistema di particelle soggette a forze newtoniane in moto stabile. Per di più, gli articoli sulla capillarità incorporavano una teoria molecolare della materia, sebbene fossero nella tradizione di Laplace e Poisson piuttosto che in quella di Maxwell e Boltzmann, come ci si sarebbe potuti aspettare alla data del 1868. È difficile determinare quando

l'approccio alla teoria fisica basato su fisica molecolare/meccanica molecolare, che sembra essere stato pervasivo nella fisica italiana attraverso il diciannovesimo secolo, e i cui esponenti includevano Avogadro, Fusinieri e Mossotti così come la maggior parte dei fisici matematici della seconda metà del secolo, lasciò il campo a un approccio basato su una genuina teoria cinetica. I lavori di Betti incorporavano l'approccio di meccanica molecolare, come faceva il lavoro di Ròiti sulla capillarità; ma gli articoli teorici di Ròiti sulla propagazione del suono a metà degli anni Settanta avevano un approccio basato sulla teoria cinetica. Ci fu poco altro lavoro sulla teoria cinetica fino avanti negli anni Ottanta.